



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

NADSON RENAN TOMÉ DE SOUSA

**ANÁLISE DE ENGENHARIA E PROPOSIÇÃO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO
DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MEDIÇÃO DE VOLUME DE ESTOQUE DE
CARVÃO DO PÁTIO DE UMA TERMELÉTRICA**

FORTALEZA

2018

NADSON RENAN TOMÉ DE SOUSA

ANÁLISE DE ENGENHARIA E PROPOSIÇÃO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE
AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MEDIÇÃO DE VOLUME DE ESTOQUE DE CARVÃO DO
PÁTIO DE UMA TERMELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Gonzalez
Nogueira

Coorientador: Prof. Dr. Bismark Claure
Torrico

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S697a Sousa, Nadson Renan Tomé de.

Análise de engenharia e proposição de um sistema automático de aquisição de dados para medição de volume de estoque de carvão do pátio de uma termelétrica / Nadson Renan Tomé de Sousa. – 2018.
68 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira.

1. Sensor Lidar. 2. Carvão Mineral. 3. Carvão Mineral. 4. Sistema Automático de Aquisição de Dados. I. Título.

CDD 621.3

NADSON RENAN TOMÉ DE SOUSA

ANÁLISE DE ENGENHARIA E PROPOSIÇÃO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE
AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MEDIÇÃO DE VOLUME DE ESTOQUE DE CARVÃO DO
PÁTIO DE UMA TERMELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Bismark Claire Torrico (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Wilkley Bezerra Correia
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Marcelo Aguiar Oliveira

Dedico este trabalho a Deus por sua infinita graça, aos meus pais e ao meu irmão que sempre me incentivaram a estudar e lutaram para que eu pudesse ter oportunidades na vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus por sua indescritível bondade de permitir que eu pudesse concluir o curso de Engenharia Elétrica, por estar sempre me guiando em relação as minhas decisões de vida, por ter me dado de presente a oportunidade de conhecer tantas pessoas maravilhosas ao longo da minha jornada acadêmica na Universidade Federal do Ceará e lugares por onde passei por ter sido tão cuidadoso em colocar as pessoas certas nas horas certas em cada momento de minha vida.

Sou profundamente grato à minha mãe Conceição e ao meu pai Valder, por terem colocado como prioridade máxima a minha educação em detrimento de qualquer outra necessidade que surgiram. Pelos conselhos amorosos que me deram ao longo de toda minha vida. Pelo suporte em decisões importantes da vida. Pela formação do meu caráter e minha ética.

Ao meu irmão Nickson que me estimulou desde pequeno a estudar. Que mesmo sem perceber, me influenciou a escolher Engenharia Elétrica quando eu o observava fazendo os projetos das disciplinas em casa. Que em muitos momentos se dispôs a ajudar na minha educação, com curso de inglês para que eu pudesse me capacitar, possibilitando minha classificação para ingressar no programa Ciências sem Fronteiras.

À minha noiva amada Caroline, que tem sido meu porto seguro em momentos que mais precisei de consolo e conselhos. Sua parceria me acompanha desde a época do nosso ensino médio. Desde de lá, sua presença tem me presenteado com momentos maravilhosos, que me transportam para longe dos problemas da vida diária, sendo essenciais para minha saúde e bem-estar.

À minha sogra Helenita que sempre me acolhe em sua casa como filho. Por todo amor e cuidado que ela dedica a mim, e pela compreensão e cumplicidade em vários momentos de convivência.

Ao meu amigo Thiago Alves Lima, por seu companheirismo para todas as horas, desde o começo do curso de Engenharia Elétrica, me acompanhando até no estágio do intercâmbio do Ciências sem Fronteiras. Que sempre me incentiva a buscar o meu melhor e a alcançar os meus sonhos. Por ser um grande exemplo de profissional para mim, sempre focado e determinado.

Ao meu amigo Alan Batista de Oliveira, que conheci já no final do curso mas que tem se tornado um grande amigo. Por ter acreditado nas minhas ideias de querer mudar o mundo e colaborar com uma UFC melhor e, assim, ter se aventurado comigo na criação do grupo acadêmico "Robótica, Automação, Inteligência Artificial e Tecnologias"(RAITec), mesmo

sabendo que não seria fácil.

Ao meu co-orientador prof. Dr. Bismark que deu suporte na elaboração e ideação deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Fabrício Nogueira, que tem me orientado não só neste trabalho mas desde que cheguei do intercâmbio acadêmico. Sou muito grato por sua solicitude e disponibilidade de me atender, mesmo em momentos de seu próprio descanso. Além disso, por sua disposição na tutoria do RAITec. É um exemplo pra mim de dedicação e amor a profissão, tendo em vista que ainda no seu primeiro semestre na UFC abriu mão do seu limite de carga horária para que parte da turma de Métodos Numéricos não ficasse atrasada por falta de professor da disciplina.

Ao meu irmão em Cristo e futuro mestre Eng. Marcus Davi que deu todo suporte na elaboração deste trabalho e tem sido um excelente companheiro de projetos. Além disso, sou muito grato pela participação do conselho do RAITec, tendo sempre a disponibilidade e boa vontade em nos ajudar.

Aos meus colegas do PET Elétrica Guilherme Lawrence, Valessa Viana e Henrique César por terem acreditado que eu poderia gerenciar o DTec2017 e por terem dado todo o suporte necessário para o sucesso do evento. Isso tudo em um momento que eu menos queria e que não acreditei que poderia fazer o evento. Esse momento foi essencial, pois me proporcionou crescimento profissional e experiências que motivaram a criação do RAITec.

À família RAITec, em especial ao Wandick Landry, Sâmulo Mendonça e Matheus Albuquerque, por terem se empenhado com o desenvolvimento de um grupo inovador. Por se dedicarem aos projetos e acreditarem em ideias que surgiram de experiências minhas e do Alan para auxiliar a UFC e o Estado do Ceará a se tornarem locais mais atrativos à investimentos financeiros na área de tecnologia.

Aos meus amigos que fiz durante as disciplinas e projetos que desenvolvi ao longo de todo curso de Engenharia Elétrica. Cada projeto tem sua marca e sua estória que ficarão pra sempre em minhas recordações. Assim, gostaria de agradecer ao Dênio, Janderson, Kalil, Edson, Judá, Débora, Jander, Natan e Eduardo.

Aos amigos que fiz durante meu estágio na Porto do Pecém Transportadora de Minérios (PPTM), em especial Italo Rossi, Marcio Leal, Egston Jacsonlaffite, Josimar Moreira, Julio Dias, Marcelo Aguiar e Charles Nobre. Todos tiveram uma grande participação no meu aprendizado como estagiário, gostaria de destacar o que mais me marcou de cada. Ao Italo por ter

sido um grande mentor dentro da empresa, qual eu pude aprender muito em relação a automação industrial e outros assuntos de engenharia da planta. Ao Marcio, que por seu companheirismo me aturou várias vezes quando eu ligava à noite e ficávamos no telefone até de madrugada para eu conseguir montar minuciosas análises de falha. Além disso, o Marcio, o Italo, o Josimar e Egston foram essenciais pois atuaram como professores que me passaram muito conhecimento técnico sobre equipamentos elétricos e sobre os processos da planta, cooperando para meu crescimento profissional como engenheiro. Além disso, eles lutaram para que eu pudesse ter os melhores recursos e oportunidades de aprendizado dentro da empresa. Ao Julio por ter me convidado para auxiliar nas análises de falha, que foram importantes para que eu pudesse vivenciar com mais profundidade a importância da multidisciplinaridade na indústria para solução de problemas. E ao Marcelo que pude aprender observando a importância da paciência e mansidão na liderança durante a execução das atividades e planejamento de projetos. Com o Charles, pude aprender sobre a importância da objetividade, prudência e competência técnica em cargos de gestão na indústria.

Aos amigos estagiários da EDP, principalmente Thiago Barbosa, Amanda Gabriele, Willamy Siqueira e Samuel Falcão. Ao Thiago Barbosa e Amanda Gabriele por muitas vezes compartilharmos conhecimento de determinadas tarefas um com o outro e desenvolver atividades juntos. Foi muito bom trabalhar com a Amanda no projeto dos estagiários que iniciamos e foi uma excelente amiga que me ajudou em muitos momentos. O Thiago Barbosa é um excelente profissional qual eu pude observar e aprender com sua postura de trabalho e agilidade e *expertise* no MS Excel, além disso é um excelente amigo. Ao Willamy pelas conversas na volta na van e ter sido a ponte inicial para o desenvolvimento deste trabalho. Ao Samuel por ter sido um excelente profissional qual eu pude me espelhar em sua proatividade e também por ter sido a ponte para a minha experiência de estágio. Além disso, gostaria de agradecer aos demais estagiários que tive contato, pois todos são pessoas fantásticas que levarei pra sempre em minhas memórias ao tornarem sempre as voltas mais divertidas e agregaram algo na minha formação como pessoa e profissional. Sou muitíssimo grato por todo apoio e companheirismo de todos eles.

Aos meus amigos Ednardo Moreira Rodrigues por sua parceria e disponibilidade ao conselho do RAITec e pela adequação, junto com o Alan Batista, do *template* utilizado neste trabalho para que a formatação fosse ajustada de acordo com as normas da biblioteca da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Aos meus amigos de intercâmbio em Oswego, que foram como uma família para

mim num período longe da família. Em especial Valdery Rodrigues, Luis Henrique Aguiar, Sofia Moreira, Danielle Guedes e Manuela Martins. Sou muito grato a todos, pois foram como irmãos pra mim por compartilharmos juntos momentos únicos que vão ficar pra sempre em minha memória.

Aos meus amigos de intercâmbio em Brockport, todos foram muito importantes também para mim e foram como uma grande família que me auxiliaram quando precisei e que fizeram dessa temporada de aprendizado de inglês mais divertida. Em especial, gostaria de agradecer à Jéssica Campos, à Geshica Soares, ao George Leal, ao João Neves, ao Cleber Griff, ao Valdery Rodrigues e ao Michel Siqueira que foram os que eu mais me aproximei nesse período.

À Ana Rebouças e ao Thiago Alves Lima que foram minha equipe no projeto do Nanook e da taxonomia na Capitol Technology University. Formamos uma equipe impecável e determinada. Sou grato por ter feito parte de uma equipe com dois grandes talentos. Pude aprender muito com os dois. Por conta da Aninha, despertei um interesse maior em aprender sobre liderança e gestão, qual ela possui como característica nata liderando e motivando nossa equipe.

E também ao nossos amigos Alex Petrov, Anh Ho e Ryan Schrenk que foram incansáveis em tentar nos ajudar e muitas vezes deram suporte logístico para nós brasileiros dentro de uma floresta nos EUA sem transporte público.

Ao Michael Comberiate por ter proposto a vinda no Nanook para UFC, qual tem sido maravilhoso para a pesquisa no Ceará com o crescimento do Grupo de Pesquisa em Automação, Controle e Robótica da UFC (GPAR-UFC).

Aos professores Me. Patrick Stakem e Dr. Alex "Sandy" Antunes da Capitol Technology University que deram todo apoio nos projetos que realizamos tanto do Nanook quanto da elaboração do projeto PHOENIEx.

À CAPES pelo apoio financeiro durante o programa Ciências sem Fronteiras nos Estados Unidos. A experiência do intercâmbio era algo que sempre sonhei, e que graças ao apoio financeiro da CAPES foi possível tornar o meu sonho realidade, vivenciando uma experiência única para o meu amadurecimento cultural, profissional e pessoal.

À Universidade Federal do Ceará, à *State University of New York at Oswego* e à *Capitol Technology University* pela excelência no ensino, que foram fundamentais para a minha capacitação profissional e acadêmica, proporcionando um campo aberto de oportunidades de

trabalhos e atividades que foram fundamentais para lapidar meu conhecimento tanto no âmbito pessoal quanto profissional.

“As pessoas que são loucas o suficiente para pensar que podem mudar o mundo são as que conseguem.”

(Steve Jobs)

RESUMO

Neste trabalho é realizada análise de engenharia de cinco proposições para implementação de um sistema automático de aquisição de dados para medição de volume de estoque do pátio de armazenagem de matéria-prima de termelétricas a carvão mineral. Essa análise de engenharia é baseada na breve revisão sobre a logística do carvão em termelétricas localizadas em complexos industriais portuários, as técnicas utilizadas atualmente para a medição de volume e de densidade do carvão mineral na planta e a problemática que envolve a taxa de refletividade do carvão mineral e a sensibilidade dos sensores LiDAR à taxa de refletividade dos materiais. Assim, será estabelecidos critérios de análise para que seja possível discernir entre as cinco proposições aquela que seja viável, que possua o menor grau de custo e o maior grau de praticidade, sendo a complexidade um fato a ser analisado em âmbito de desempate, tendo em vista o tempo de desenvolvimento. Com base nas análises realizadas é mostrado que a proposição que tem o maior potencial é a que utiliza o VANT industrial como plataforma do sistema de aquisição de dados.

Palavras-chave: sensor LiDAR. Carvão Mineral. VANT. Sistema Automático de Aquisição de Dados.

ABSTRACT

This work conducts an requirements analysis of five proposition for implementation of an automatic data acquisition system for mineral coal volume measurement at a coal-fired thermal power plant stockyard. That engineering analysis is based on a brief review of the coal logistics for plants located at industrial park close to ports, current techniques applied to volume and density measurement in the plant, and the issue between mineral coal reflectivity rate and the sensibility of LiDAR sensors to materials reflectivity rate. Then, it is established criteria in order to distinguish the best proposition, based on viability, cost and practicality assessment. The complexity of the system is used just as a resolution criteria, affecting the time of project completion. Finally, it is shown that the most potential proposition is the one which uses industrial UAV as a platform for data acquisition.

Keywords: LiDAR sensor. Mineral Coal. UAV. Automatic Data Acquisition System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vistas aéreas do Porto do Pecém.	24
Figura 2 – Etapas do processo de descarregamento de carvão pelo GSU	25
Figura 3 – Ilustração do Descarregador Contínuo de Navios (CSU) disponível no Porto do Pecém	26
Figura 4 – Fluxo do carvão pelo descarregamento via CSU.	27
Figura 5 – Ilustração do Pátio com referências.	29
Figura 6 – Tipos de carvão	33
Figura 7 – Sensibilidade do sensor NAV-245 da SICK sobre a taxa de refletividade . . .	34
Figura 8 – Sensibilidade do sensor LD-MRS400001S01 da SICK sobre a taxa de refletividade	34
Figura 9 – À esquerda a imagem ilustrativa do RIEGL VZ-400 e à direita o seu gráfico "alcance <i>versus</i> refletividade do material"	35
Figura 10 – À esquerda a imagem ilustrativa do RIEGL VZ-2000i e à direita o seu gráfico "alcance <i>versus</i> refletividade do material"	35
Figura 11 – Esquemático geral do sistema automático de medição de volume do estoque de carvão	37
Figura 12 – Ilustração do Pátio com referências.	40
Figura 13 – Ilustração do acúmulo de água na correia em períodos chuvosos	41
Figura 14 – Ilustração da vista superior do conceito de torres de varredura das pilhas de carvão com sensor de alcance máximo de 50m em 10% de refletividade. . .	45
Figura 15 – Diagrama vertical do pátio que mensura a altura mínima viável	46
Figura 16 – Vista superior das torres de varredura com sensor de alcance máximo de 400m em 10% de refletividade.	47
Figura 17 – Ilustração da proposição do robô autônomo de braço articulado de longo alcance	49
Figura 18 – Ilustração da vista superior do sistema de varredura de sensor acoplado em sistema de roldanas.	54
Figura 19 – Ilustração da vista superior do sistema de varredura em VANT industrial . .	56
Figura 20 – Container-escritório de 20 pés	58
Figura 21 – Modelo de drone sugerido: DJI MG-1S	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo de custo operacional com a contratação de serviço de fotogrametria	31
Tabela 2 – Refletividade de tipos diferentes de carvão chinês	33
Tabela 3 – Informações e orçamento dos sensores LiDAR	36
Tabela 4 – Levantamento do custo dos sensores - Proposta 1	42
Tabela 5 – Resumo da análise da proposta 1: Sistema de varredura distribuído	44
Tabela 6 – Levantamento do custo dos sensores - Proposta 2	47
Tabela 7 – Resumo da análise da Proposta 2: torres de varredura	49
Tabela 8 – Custo dos sensores - Proposta 3: robô terrestre de braço articulado de longo alcance.	50
Tabela 9 – Resumo da análise da Proposta 3: robô de braço articulado de longo alcance	52
Tabela 10 – Custo dos sensores - Proposta 4: Sistema de Varredura em Roldanas	54
Tabela 11 – Resumo da análise da Proposta 4: Varredura em sistema de roldanas	56
Tabela 12 – Custo dos sensores - Proposta 5: Sistema de Varredura em VANT industrial	57
Tabela 13 – Resumo da análise da Proposta 5: Sistema de varredura em VANT industrial	60
Tabela 14 – Custo com sensores das propostas	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
CT	Correia Transportadora
CTE	Complexo Termelétrico
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPAR	Grupo de Pesquisa em Automação, Controle e Robótica
GPS	<i>Global Positioning System</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas
TCLD	Transportador de Correias de Longa Distância
TMUT	Terminal de Múltiplas Utilidades
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
VANT	Veículo Aéreo Não-tripulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação	17
1.2	Estado da arte	18
1.3	Objetivos	21
1.4	Estruturação	21
2	SITUAÇÃO-PROBLEMA	23
2.1	Logística do carvão: do porto à usinas termelétricas	23
2.2	O pátio de carvão e sua operação	27
2.3	Métodos aplicados na estimação de volume de carvão	29
2.3.1	<i>Arqueação</i>	30
2.3.2	<i>Balanças dinâmicas</i>	30
2.3.3	<i>Fotogrametria aérea</i>	31
2.4	Método aplicado na estimação da densidade do carvão	31
2.5	Sensores LiDAR e a refletividade do carvão	32
2.6	Definição do problema	36
3	ANÁLISES DE ENGENHARIA E PROPOSIÇÕES	37
3.1	Escopo básico da solução	37
3.2	Critérios de análise utilizados	38
3.3	Propostas de sistemas de aquisição de dados	39
3.3.1	<i>Sistemas terrestres</i>	39
3.3.1.1	<i>Proposta 1: Sistema de varredura distribuído</i>	40
3.3.1.2	<i>Proposta 2: Torres de Varredura</i>	43
3.3.1.3	<i>Proposta 3: Robô autônomo com um braço articulável de longo alcance</i>	48
3.3.2	<i>Sistemas aéreos</i>	53
3.3.2.1	<i>Proposta 4: Varredura em sistema de roldanas</i>	53
3.3.2.2	<i>Proposta 5: Sistema de Varredura em VANT industrial</i>	55
4	DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	61
5	TRABALHOS FUTUROS	64
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho foi realizado com o intuito de se analisar diversas maneiras de solucionar dificuldades no gerenciamento de estoques de carvão mineral no pátio de uma usina termelétrica em estudo. Para isso, idealizou-se um sistema inteligente de gestão de estoque da matéria-prima. Esse sistema inteligente tem que necessariamente acompanhar os valores de massa, volume e densidade do minério para que possa estimar a quantidade de material que constantemente entra e é estocado ou consumido pela usina.

1.1 Motivação

Um rigoroso controle do estoque deve ser realizado pelo setor de operação do pátio de matéria-prima de usinas termelétricas a carvão mineral a fim de garantir a disponibilidade de geração de energia elétrica da usina e manter a eficiência do planejamento financeiro da empresa. Usinas localizadas em complexos industriais portuários possuem a tendência de utilizarem sistema de correias para o transporte de minério, assim, utilizam balanças integradoras (balanças dinâmicas) para manter o controle de entrada e saída de material.

As balanças dinâmicas, como são mais conhecidas, são equipamentos que pesam o material transportado sobre as esteiras e medem a velocidade de deslocamento obtendo o fluxo em toneladas/hora e o total transportado. Tais balanças monitoram a entrada e saída de carvão mineral do pátio das usinas.

Além da utilização de balanças, é possível contratar serviços de estimação de volume via fotogrametria aérea e estimação de densidade das pilhas de carvão no pátio da usina baseados na ABNT, NBR 7185 (2016). Tais serviços têm um alto custo, uma vez que necessitam da presença de técnicos qualificados para a realização de testes e coletas de amostras em campo nas pilhas de carvão. Assim, é possível estimar a quantidade de carvão mineral disponível em estoque a partir das informações coletadas pelas balanças e por relatórios técnicos gerados pelos serviços terceirizados contratados.

Apesar do sistema de balanças ser dedicado a estimação do fluxo de matéria-prima, é necessário que o sistema seja constantemente calibrado para que possa ser eficaz. Isso se deve a dois fatores. O primeiro é que para funcionar o sistema necessita do contato mecânico, e isso gera constantes desgastes e desalinhamentos das balanças dinâmicas causados pelas vibrações. O segundo fator é a continuidade do sistema de transporte, pois as esteiras de usinas termelétricas

de grande porte possuem um grande fluxo de material. Isso quer dizer que o sistema é submetido a vibrações por um longo período de tempo, gerando a necessidade de manutenções preventivas mais frequentes.

1.2 Estado da arte

O desenvolvimento e implementação de soluções de automação e controle para a indústria de processamento e transporte de minério requerem medições precisas da massa de material no processo, permitindo assim o monitoramento da produção e/ou consumo do volume de minério (Siriba; Matara, 2015). Os métodos/tecnologias para essa medição podem ser divididos em duas categorias: on-line ou off-line.

O primeiro tipo é caracterizado por medições em tempo real da vazão mássica no processo, através de sensores instalados na correia transportadora de carvão mineral. O instrumento mais comum nessa categoria é a balança integradora, que gera resultados de medição satisfatórios quando devidamente calibrada. Entretanto, pequenos erros de calibragem da balança podem gerar um grande erro final na estimativa de massa por causa da constante amostragem do equipamento.

Por outro lado, os métodos offline são baseados no processamento de um conjunto de dados adquiridos previamente durante ensaios. Nesta categoria se enquadram desde os métodos clássicos baseados em normas até métodos baseados em sensores modernos para levantamento de volume e densidade em pilhas de armazenamento de minérios para fins de estimativa de massa estocada.

Considerando o caso específico para levantamento de volume de pilhas de carvão, as técnicas offline mais comuns são: taqueometria, posicionamento cinemático por meio de GPS, fotogrametria aérea e varredura a laser. A taqueometria é um método convencional de monitoramento, onde distâncias e alturas são determinadas a partir da leitura de instrumentos como o teodolito e estação total. Esse procedimento é demorado, e tedioso, além de que necessita de operação manual. O segundo método utiliza os sistemas de *Global Positioning System* (GPS) e *Global Navigation Satellite System* (GNSS) para obter coordenadas tridimensionais da superfície terrestre, que podem ser usadas para estimação de volume (EL-RABBANY, 2006). No entanto, uma desvantagem apresentada por esse método é a necessidade de ter operadores em alguns pontos da pilha, ocasionando uma situação de risco. Além disso, essa técnica é mais adequada para mapeamento de relevos de grande extensão.

As tecnologias com maior potencial na atualidade são a fotogrametria aérea e a varredura a laser. A primeira consiste na utilização de câmeras digitais para obtenção de relevos tridimensionais, e apresenta a vantagem de dispensar os operadores que ficariam sobre as pilhas de carvão.

A varredura a laser, por sua vez, é um método de medição que pode ser utilizado tanto a noite como durante o dia (Vosselman; Maas, 2010). Essa técnica se tornou comum para gerar representações 3D de alta qualidade a partir da captura de nuvens de pontos. Esses sensores possuem capacidade de precisão milimétrica e a captura de dados pode ser realizada de forma aérea ou terrestre (Karsidag & Alkan, 2012). Um caso particular de sensores laser é o denominado *Light Detection and Ranging* (LiDAR). A tecnologia LIDAR é capaz de medir distâncias até um objeto emitindo feixes laser (luz infravermelha invisível) e processando a onda de resposta refletida (Amann *et al.*, 2001).

A aplicação de VANTs como plataformas para aquisição de dados em problemas de mapeamento de áreas industriais ou rurais vem se tornando cada vez mais comum. Tal técnica permite a geração precisa de uma superfície e posterior cálculo de volume. Contudo, perturbações no voo e limitações da operação humana são fatores que podem impactar na qualidade da medição.

Recentes avanços em sensores, atuadores e microprocessadores, aliados ao desenvolvimento de recentes complexas estratégias de controle, tornam possível a automação segura de navegação de VANTs (Remondino *et al.*, 2011). Publicações recentes em periódicos bem qualificados demonstram a importância e a relevância desta ativa área de pesquisa.

Em Mac *et al.* (2018) são apresentadas estratégias para a navegação autônoma de um VANT comercial, sendo propostos algoritmos de fusão sensorial para estimação de posição/localização do VANT a partir de sensores óticos e unidade de medição inercial (IMU). Além disso, algoritmos para desvio de obstáculos e seguimento de trajetórias em ambientes desconhecidos são avaliados. Testes experimentais validam a efetividade das técnicas propostas.

Em Siebert e Teizer (2014) um VANT é utilizado como um meio para aquisição de dados e geração de modelos 3D de pilhas em áreas de escavação reais. São explicados detalhes sobre os componentes do sistema VANT (*hardware* e *software* de controle) para o planejamento e seguimento de trajetórias. Além disso, é apresentado um programa de planejamento de voo para fotogrametria e a geração de uma nuvem de pontos 3D. Os resultados de campo apresentados no trabalho comprovam a eficiência no mapeamento automático de uma área de mais de 24 mil

metros quadrados.

O problema de modelagem e controle de VANTs é uma área ativa na literatura técnica especializada (Pounds *et al.*, 2010). Características como tolerância a falhas em sensores e atuadores, robustez à perturbações e adaptação de parâmetros para diferentes condições de operação, vêm sendo fortemente estudadas a fim de permitir a integração de VANTs em ambientes críticos como parques industriais e comerciais.

Em Liu *et al.* (2017) um VANT com múltiplos rotores é modelado através de um modelo não linear sujeito a incertezas paramétricas, perturbações externas e atrasos de transporte. Um controlador robusto é proposto para garantir a estabilidade de seguimento de trajetórias e ensaios experimentais de laboratório avaliam a efetividade dos resultados. Em Liu *et al.* (2015) é apresentado uma estratégia de controle não linear robusta para UAVs em ambientes com perturbações e obstáculos. Esta estratégia permite estimar a força das perturbações e planejar a trajetória online por meio do controle preditivo baseado em modelo (MPC), além disso, restrições para evitar colisões com obstáculos são considerados pelo controlador.

A extensão para o caso mais crítico onde os controladores possuem tolerância a falhas em atuadores e sensores é apresentado em Caliskan e Hajiyev (2015). Módulos de detecção e isolamento de falhas são implementados, tal que no caso de falha em sensores, o mesmo é isolado e um estimador baseado em filtro de Kalman é utilizado para estimar a variável de realimentação. No caso de falhas em atuadores uma lei de controle reconfigurável é utilizada a fim de manter a estabilidade do sistema. Resultados de simulação avaliam a estratégia no controle longitudinal e lateral de um VANT.

Em recente trabalho desenvolvido no PPGEE/UFC (De Paula, 2017) é proposta uma abordagem de controle tolerante a falhas para robôs móveis baseada em sistemas lineares a parâmetros variantes LPV, uma aproximação para sistemas não lineares. Falhas em atuadores e sensores são detectadas e identificadas em tempo real através de uma técnica denominada de sensor e atuador virtual. A estabilidade do robô móvel durante o seguimento de trajetórias pré-definidas é garantida mesmo quando sujeito a faltas totais em sensores ou parciais em atuadores. Tal metodologia possui grande potencial para aplicação no problema de controle de trajetória de VANTs. Outros trabalhos recentes do grupo GPAR-UFC abordam o problema de controle e localização de robôs móveis em um ambientes desconhecidos através de fusão sensorial de sensores mecânicos e sensores LIDAR (Rocha *et al.*, 2017) (Lima *et al.*, 2016) (Souza *et al.*, 2016) (Batista *et al.*, 2013). Estratégias de controle adaptativo não linear e preditivo foram

propostas para o controle de robôs móveis respectivamente em Lobo (2016) e Ogawa (2014).

1.3 Objetivos

Tem-se por objetivo deste trabalho a produção de uma análise de engenharia das proposições de sistema automático de aquisição de dados para medição de volume de estoque do pátio de carvão de uma termelétrica visando a escolha do sistema que demonstre maior potencial a ser desenvolvido. Esse sistema visa auxiliar a gestão e controle de estoque de pátios de termelétricas a carvão.

Essas proposições consistirão basicamente de sistemas de aquisição de nuvem de pontos. Tais sistemas deverão subsidiar o sistema de processamento com dados precisos para que seja possível estimar o volume das pilhas com o menor margem de erro possível.

1.4 Estruturação

Este trabalho foi organizado em capítulos com o intuito de facilitar a compreensão da análise de engenharia do problema.

Assim, este trabalho se divide em cinco capítulos conforme a seguinte sequência:

- Capítulo 1: este capítulo é dedicado à introdução do presente trabalho, que contém a motivação, o estado da arte e os objetivos gerais desta monografia.
- Capítulo 2: este capítulo aborda sobre em que contexto o problema está situado. Ou seja, abordou-se sobre a logística do carvão, do porto aos silos da usina, para que fosse possível entender o motivo da escolha e posicionamento dos sensores das soluções proposta. Métodos atualmente aplicados para estimação do volume do carvão no inventário. Além disso, discorreu-se sobre a propriedade de refletividade do carvão que impacta diretamente na escolha do sensor.
- Capítulo 3: este capítulo fala sobre as proposições para a solução do problema e a análise de cada uma delas, com base em critérios criados para padronizar a avaliação.
- Capítulo 4: este capítulo visa comparar as proposições e escolher a melhor ideia e a mais viável de ser implementada, tendo em vista os critérios estabelecidos no início do capítulo 3.
- Capítulo 5: este capítulo tem o objetivo de propor as etapas de condução do

projeto para por em prática a proposição escolhida.

2 SITUAÇÃO-PROBLEMA

O controle do volume de sólidos disponíveis em depósitos ou mesmo em pátio de estocagem é um grande desafio em sistemas dinâmicos que possuem um grande fluxo de escoamento de materiais, tanto na agricultura quanto nas diversas áreas da indústria. Por isso, é importantíssimo que existam métodos que possam auxiliar no controle de estoque através do levantamento da massa e do volume do material a ser controlado.

No caso da geração termelétrica a carvão, um dos processos relacionados a produção de energia é o do armazenamento do estoque da matéria-prima e a realização da medição e controle da quantidade disponível de carvão em seus pátios.

O processo logístico do transporte de minério acontece desde o Porto do Pecém, localizado em São Gonçalo do Amarante, e finda nos silos que armazenam o carvão para a queima nas caldeiras da usina térmica. Ao longo de todo o percurso, existem vários processos intermediários até que o carvão seja estocado no pátio, sendo posteriormente retomado para geração de energia elétrica.

Basicamente, este capítulo visa contextualizar o leitor sobre o processo de transporte do carvão para que seja possível discernir com maior clareza as etapas do processo logístico e onde especificamente o problema da estimação do volume de carvão deve ser tratado para que seja possível gerir com maior precisão a quantidade de carvão armazenada e consumida pelas usinas termelétricas.

2.1 Logística do carvão: do porto à usinas termelétricas

As reservas de carvão mineral disponíveis no Brasil estão localizadas no Sul do país e são de baixa qualidade e alto teor de impurezas, o que dificulta o transporte e, conseqüentemente, o comércio interno do minério (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008). Por isso, a maior parte do carvão mineral consumido em termelétricas a carvão no Brasil são provenientes de outros países. Segundo dados de 2009 em DNPM (2015), os países dos quais o Brasil tem importado carvão mineral para bens primários são provenientes do Estados Unidos (35%), da Colômbia (20%), do Austrália (18%), de Canadá (9%) e da Federação Rússia (6%).

Dessa forma, o carvão mineral das usinas térmicas brasileiras, que ficam longe da extração, vem para o Brasil de navio e é descarregado nos portos, como o caso do Porto do Pecém, no município de São Gonçalo do Amarante.

Em geral, existem duas formas de descarregar a matéria-prima de dentro dos porões dos navios cargueiros em portos. Uma dessas formas acontece com a utilização de uma máquina chamada "GSU", do inglês *Grab-type Ship Unloader*, que em tradução literal quer dizer "Descarregador de Navio Tipo-Agarro". A outra forma é através da utilização de uma máquina chamada "CSU", do inglês *Continuous Ship Unloader*, que quer dizer "Descarregador de Navio Contínuo". Essas são duas máquinas usadas para retirada de materiais à granel, não limitando-se ao carvão.

Para este trabalho é considerado o Porto do Pecém como planta em estudo. O Porto do Pecém, por exemplo, detém esses dois tipos de descarregadores de navio, assim, tem-se a possibilidade da utilização desses dois sistemas.

Figura 1 – Vistas aéreas do Porto do Pecém.

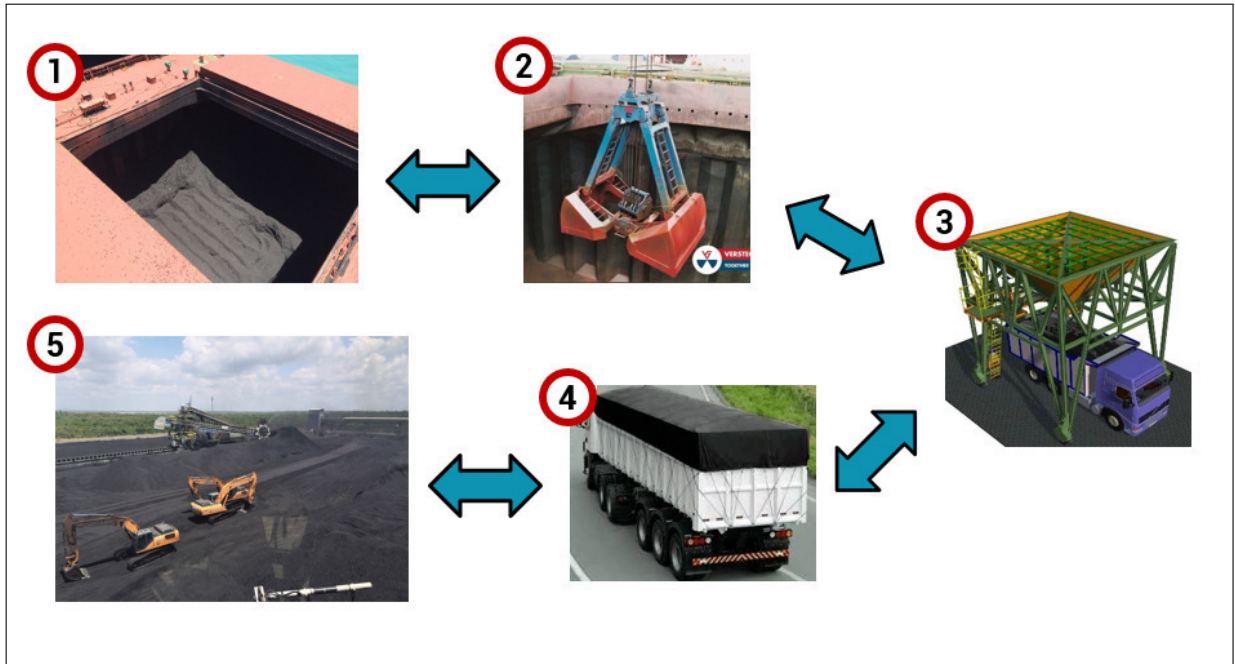


Fonte: (a)<<https://goo.gl/EQdu6y>> (b)<<https://goo.gl/nz1H2q>>

O primeiro descarregador de navio é o GSU, que fica localizado no Terminal de Múltiplas Utilidades (TMUT) Terminal de Múltiplas Utilidades (TMUT) do Porto do Pecém, item (a) da Figura 1. Existem duas características importantes para ressaltar a respeito dessa máquina. A primeira é que seu processo de descarregamento é intermitente. Isso quer dizer que o GSU transfere somente uma certa quantidade de minério de cada vez para um caminhão. O segundo é que o GSU não foi projetado para ser utilizado juntamente com as esteiras de transporte de minério, e isso é ruim pois o transporte é realizado através do carregamento de caminhões, que ficam debaixo de um grande funil com uma peneira, como ilustrado na Etapa 3 da Figura 2. Após o carregamento, o caminhão é liberado para levar a matéria-prima para o pátio. Ao chegar na usina, o peso do caminhão é verificado através de uma balança estática na

entrada de veículos, ao lado da portaria. Depois de verificado o peso, o veículo é liberado para realizar o descarregamento no pátio de carvão. Após essa última etapa, o caminhão volta para o porto e o processo é repetido até que o descarregamento do navio esteja completo.

Figura 2 – Etapas do processo de descarregamento de carvão pelo GSU

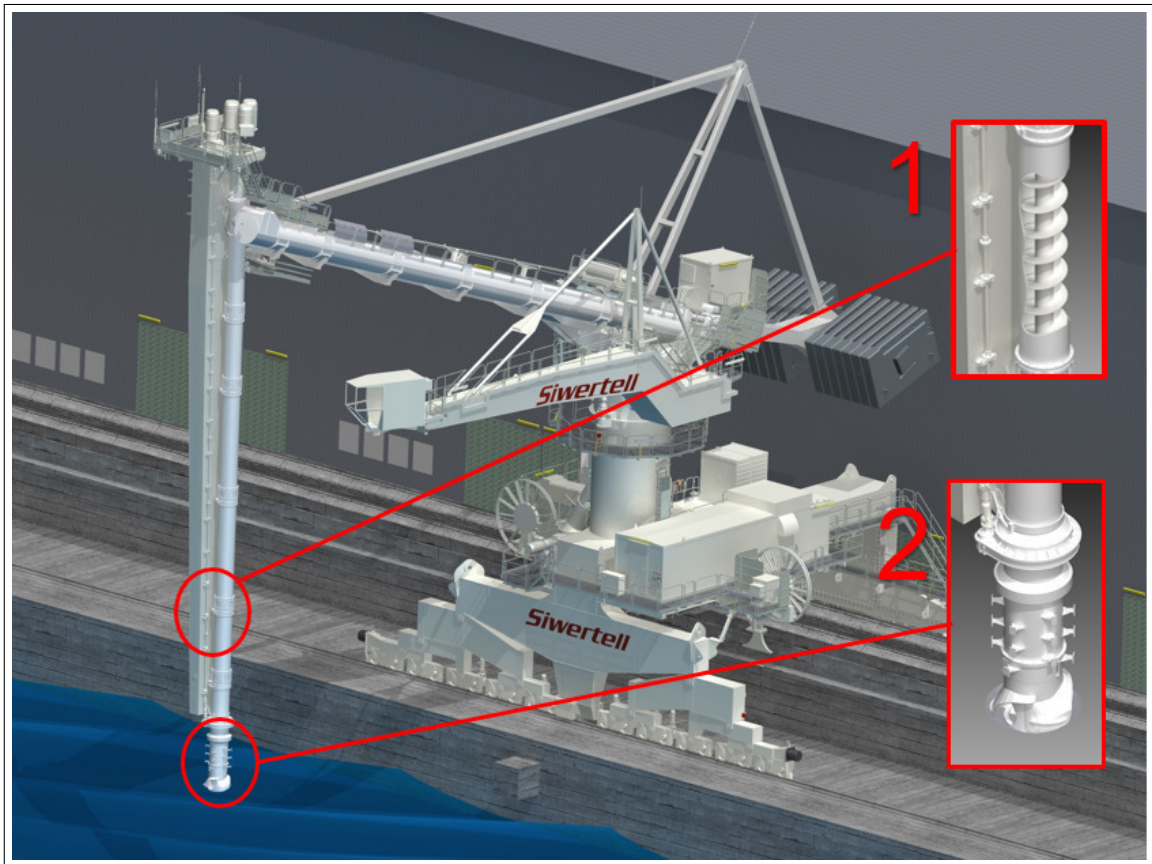


Fonte: 1. Autor; 2. <<https://goo.gl/9nMgnt>>; 3. <<https://goo.gl/d9grpZ>>; 4. <<https://goo.gl/GmL64P>>; 5. Autor.

O segundo descarregador de navio é o CSU, que fica localizado no Píer 1 do Porto do Pecém, item (b) da Figura 1. Existem duas características importantes para salientar a respeito dessa máquina. A primeira, como é possível visualizar na Figura 3, o CSU possui uma estrutura mecânica muito robusta, projetada para retirar o carvão dos porões dos navios de modo contínuo. É possível ainda verificar, por sua estrutura, a superioridade técnica em relação à máquina do tipo *grab* (GSU), tendo-se em vista que o seu princípio de funcionamento é semelhante ao de uma broca de perfuração. A segunda característica importante é que pelo fato de ser um descarregador contínuo, o CSU é projetado para funcionar em conjunto com a esteira de transporte de minério. Assim, o carvão retirado dos porões caem diretamente na primeira correia transportadora (CT-01), que possui correia aberta.

A infraestrutura de correias do Porto Pecém até o CTE Pecém, como pode ser vista na Figura 4, possui 7 Torres de Transferências do Trecho (TTT) e 7 Correias Transportadoras (CT). Em conjunto, o sistema é chamada de Transportador de Correias de Longa Distância (TCLD). A TTT é a parte do sistema responsável pela transferência do carvão de uma Correia Transportadora (CT) para outra. Dessa forma, elas garantem que as CTs, em sua extensão, não

Figura 3 – Ilustração do Descarregador Contínuo de Navios (CSU) disponível no Porto do Pecém

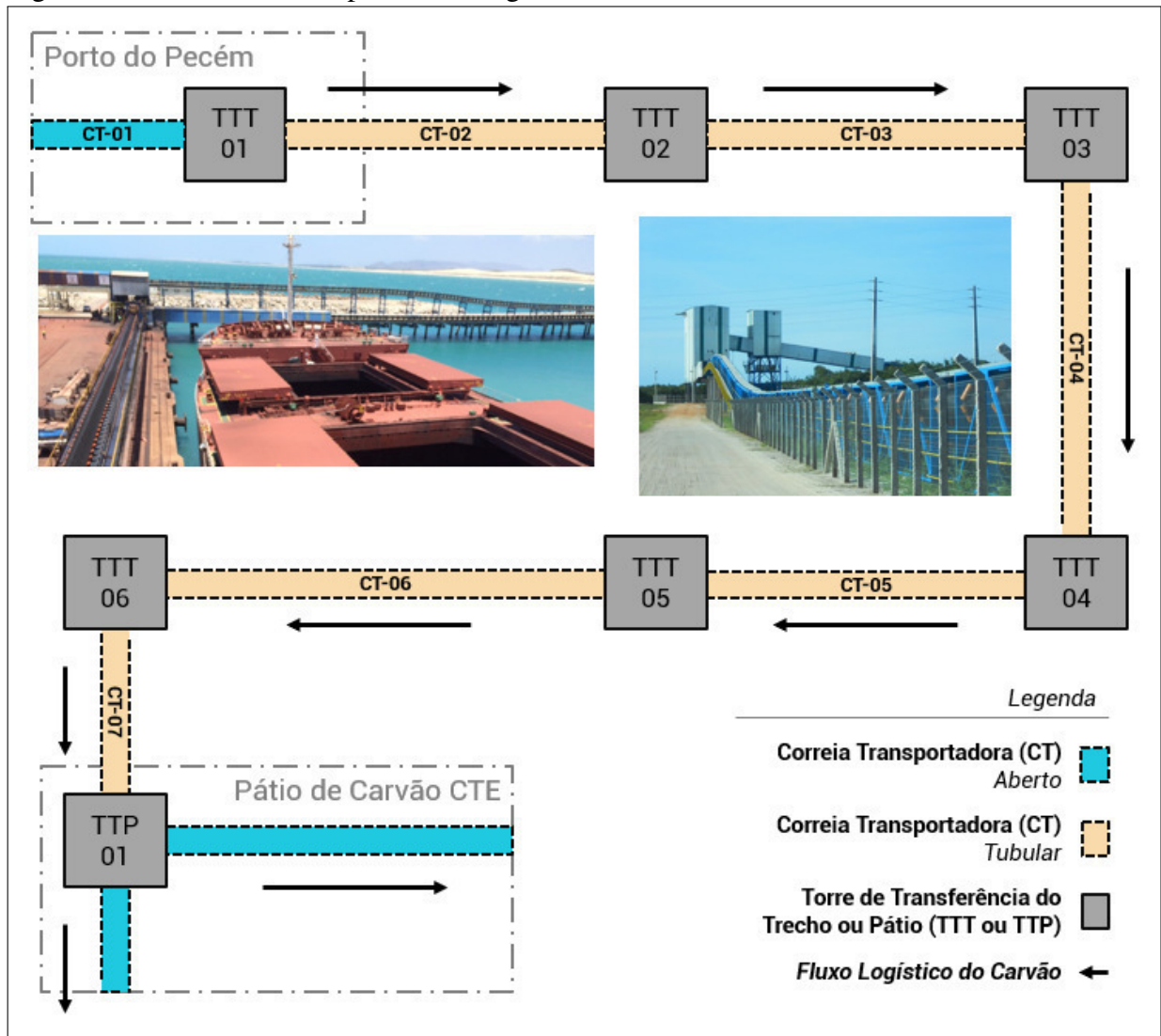


Fonte: Adaptado de <<http://www.siwertell.com/products/ship-unloaders>>

possuem curvas muito acentuadas, o que ocasiona rasgos constantes e tensões extremas sobre as correias. O processo de transição de correia aberta para tubular é realizado de forma gradual no início da CT-02, ou seja, na saída do Píer 1. A razão de se utilizar correias tubulares deve-se ao fato de sua eficiência tanto em termos de transporte a curta distância quanto em questões referentes a gestão de impactos ambientais, pois sendo tubular não há dispersão de poeira de carvão ao longo do transporte do minério.

Ao chegar no pátio da usina, existem dois caminhos que o carvão pode seguir. O primeiro é seguir diretamente para o silo da usina, o segundo é ser armazenado no pátio. Se ele seguir para o silo de carvão, que antecede o processo de moagem, ele passará por uma esteira que subirá para o topo da usina e será armazenado no silo selecionado pela operação através da utilização de uma máquina chamada "*tripper*", que se localiza exatamente em cima dos 3 silos de cada unidades geradora. Caso o carvão siga para o armazenamento no pátio, ele será direcionado para a máquina responsável por essa ação, chamada em tradução literal de Empilhadeira e Recuperadora, do inglês *Stacker&Reclaimer*. O próprio nome da máquina já corresponde aos seus três modos de operação. O primeiro modo é chamado de "empilha",

Figura 4 – Fluxo do carvão pelo descarregamento via CSU.



Fonte: Ilustração e foto da esquerda do autor; foto da direita disponível em <<https://goo.gl/P6DKZe>>.

o segundo é "retoma" e o terceiro é "retoma/empilha". O modo "empilha" armazena 100% do carvão que vem da esteira no pátio. No modo "retoma", o carvão é 100% recuperado do pátio, e não pela esteira. Já o modo "retoma/empilha", a *stacker&reclaimer* desvia uma parte do carvão para o armazenamento no pátio e deixa passar o restante para os silos da usina.

2.2 O pátio de carvão e sua operação

O pátio de carvão de usinas termelétricas é uma região grande e espaçosa. Nessa região, há pessoas que trabalham na manutenção e operação do pátio, transitando à pé. Além do fluxo de pedestres, também há fluxo de veículos automotores, tanto de carros e caminhões quanto de retroescavadeiras. Normalmente, o fluxo de carros é justificado pelo transporte de colaboradores da empresa para realizarem atividades nos arredores do pátio e para realizarem

vistoria de atividades, de segurança e do estoque. Já o fluxo das retroescavadeiras são justificadas pelas atividade de operação, exercidas pelos técnicos responsáveis pela separação das pilhas e compactação da matéria-prima para estocagem.

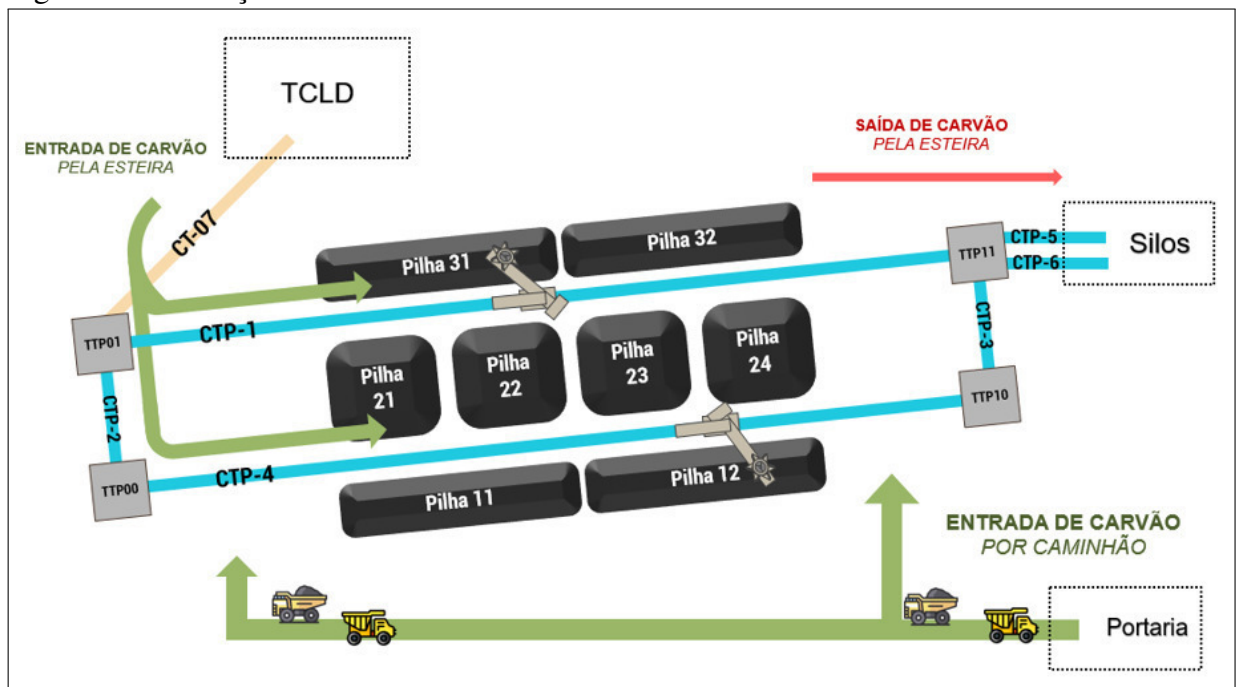
Assim, do ponto de vista gerencial, compreende-se o pátio como uma instalação de armazenagem à céu aberto, tendo quatro atividades primárias: recebimento, estocagem, administração de pedidos e expedição (ARBACHE *et al.*, 2011). O recebimento seria a recepção da matéria-prima que chega pela esteira e pelos caminhões. A estocagem seria a atividade do fluxo de material no armazém e ponto destinado à locação estática dos materiais (MOURA, 1997), ou seja, pode ser compreendido como a própria pilha de carvão (estoque) e seu processo de empilhamento (estocagem). A etapa de processamento de pedidos é a atividade de recepção da solicitação por uma certa quantidade de material para a cadeia de consumo e sua tomada de decisão. Se for autorizada a recuperação do material, então o operador da *Stacker&Reclaimer* passa a realizar a etapa de expedição, acionando o modo de "retoma" da máquina. O processo de verificação da quantidade de material expedido é realizado através das estimativas feitas pela medição de massa de carvão pelas balanças integradoras localizadas na estrutura da esteira da lança das *Stackers&Reclaimers* e na estrutura das esteiras que sobe o carvão para os silos, CTP-5 e CTP6 da Figura 5.

Para facilitar o gerenciamento, o corpo técnico de operação do pátio da usina relatou que atualmente o carvão é dividido em 3 fileiras de pilha, duas laterais e uma central. As três fileiras foram projetadas para possuírem as mesmas limitações de comprimento, sendo a fileira central projetada para ter entorno de 75% a mais da largura das pilhas laterais. As fileiras laterais são subdivididas em duas grandes pilhas de carvão. A pilha central, por ser maior, é subdividida em quatro grandes pilhas. Para facilitar essa visualização, a ilustração dessa subdivisão está disponível na Figura 5. Dessa maneira, é possível criar um controle melhor sobre o estoque, tendo-se em vista que o carvão muitas vezes é proveniente de fontes diferentes e, por isso, possui propriedades e características diferentes. Além disso, essa maneira de organizar os estoques do pátio facilita inclusive a separação e recuperação da matéria-prima das duas empresas que fazem parte do complexo termelétrico do Pecém.

Outro aspecto importante a ser comentado do ponto de vista operacional, é sobre o sistema de aspersão automatizado do pátio. Esse sistema é responsável por mitigar a combustão espontânea do carvão em regiões pontuais do estoque e por evitar a dispersão da poeira de carvão. Assim, Para atingir seu objetivo, o sistema de aspersão possui uma série de mecanismos. Um

deles é o posicionamento de vários canhões de água instalados ao redor do pátio e nas Torres de Transferência do Pátio TTP00, TTP01, TTP10 e TTP11. Esse sistema funciona com base nas variáveis de tempo, temperatura, umidade relativa do ar e posição das *Stackers&Reclaimers*. Outro, é o posicionamento de uma mangueira com bico aspersor instalada na ponta da lança de cada *Stacker&Reclaimer* para supressão da poeira do carvão. Essas mangueiras são controladas exclusivamente pelo operador da máquina. Os canhões d'água são programados para funcionamento periódico, de acordo com os critérios estabelecidos pelo setor de operação do pátio. Vale observar que os jatos de água desses canhões são relativamente fortes e são ajustados para que o jato de água alcance o mais próximo possível a altura do topo da pilha.

Figura 5 – Ilustração do Pátio com referências.



Fonte: Autor.

2.3 Métodos aplicados na estimação de volume de carvão

O processo de levantamento do volume de carvão de termelétricas em complexos industriais portuários é realizado de três maneiras ao longo de sua cadeia logística. Para um melhor detalhamento esta seção será subdividida em três para que fique mais organizada.

2.3.1 Arqueação

A primeira maneira de realizar o levantamento de volume de carvão é através de um método chamado de arqueação. Esse método é amplamente utilizado nos portos do mundo todo e é baseado na Convenção Internacional sobre a Arqueação de Navios de 1969 (ICTMS, 1969). Ela é realizada já na chegada do navio cargueiro no porto.

De forma simplista, a arqueação é a medida do volume interno de uma embarcação. Foi definido em ICTMS (1969) a arqueação bruta e a arqueação líquida. A arqueação bruta pode ser compreendida pelo volume total dos espaços fechados do navio enquanto a arqueação líquida como o volume útil de transporte (de cargas ou passageiros) do navio para uso comercial. Essas medidas de volume são realizadas por um perito do porto especialista na aplicação do método para discriminação da quantidade de carvão importada para a usina.

Para este trabalho, sua importância reside na consciência da existência da realização desse método para efeito de comparação com os valores medidos na recepção no pátio de carvão.

2.3.2 Balanças dinâmicas

A segunda é através da utilização de balanças dinâmicas instaladas em partes estratégicas das transportadoras de correia para realizar a medição de massa por hora do carvão expedido. Apesar de ser um equipamento que pode trazer uma excelente precisão, precisa ser constantemente calibrado, pois as células de carga e o sensor de velocidade precisam estar sempre muito precisos para quantificar corretamente os valores de massa. Além disso, tem-se estabelecido longos períodos de continuidade do sistema devido a alta demanda de produção de energia elétrica por parte das usinas térmicas. Essa situação acaba gerando pequenos intervalos de disponibilidade para atuação da equipe de manutenção, e várias demandas de atividades surgem para a equipe de instrumentação da manutenção elétrica. É possível ainda considerar a inclusão de atividades prioritárias de manutenção corretiva em detrimento das atividades de manutenção preventiva, como a calibragem dos equipamentos. Assim, pequenos erros de calibragem vão se perpetuando na contabilização de carvão expedido e recebido no pátio, gerando no final um grande erro na estimativa de massa.

2.3.3 Fotogrametria aérea

A terceira maneira é através da fotogrametria aérea do pátio. Uma determinada empresa pode ser contratada para realizar o levantamento fotográfico aéreo de toda região do pátio de carvão utilizando uma câmera acoplada a um Veículo Aéreo Não-tripulado (VANT), do inglês *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), popularmente conhecido como "drone". Essa tecnologia funciona muito bem e é eficiente, entretanto leva um certo tempo até que o relatório seja gerado com os resultados e seja repassado para o setor de operação do pátio e possui um custo relativo alto, tendo em vista que o valor da contratação desse serviço chega a ordem de milhares de reais.

No plano ideal, a empresa poderia gerar relatórios diários de estimação de volume disponível para garantir a precisão do controle de estoque. Entretanto, no plano real, a contratação para esse nível de demanda é inviável para a usina visto o grande impacto no custo operacional, que na escala de um ano pode chegar à custos na ordem dos milhões.

Para que seja possível dimensionar esse impacto nas contas das empresas, foi levantado uma situação-exemplo para o caso. Primeiro, verificou-se o valor cobrado por empresas que prestam esse tipo de serviço, e verificou-se que esse valor pode chegar a custar R\$5.000,00. Tendo-se em vista que no plano ideal a empresa necessita do levantamento diário do volume de estoque para que o controle de entrada e saída de carvão - realizado pelas balanças dinâmicas - seja verificado, todos os dias ela pagaria esse valor. Logo, o custo mensal chegaria a ser de aproximadamente R\$150.000,00 e o anual poderia custar até R\$1.825.000,00 como apenas uma fração do custo operacional. Dessa forma, pode-se resumir esses cálculos na Tabela 1.

Tabela 1 – Exemplo de custo operacional com a contratação de serviço de fotogrametria

Diário	Mensal (x30dias)	Anual (x365dias)
R\$ 5.000,00	R\$ 150.000,00	R\$ 1.825.000,00

Fonte: o autor.

2.4 Método aplicado na estimação da densidade do carvão

Outro método importante no processo é o de estimação da densidade do carvão mineral. Esse dado é essencial para que possa ser relacionado com o valor de volume levantado com o intuito de se encontrar a massa disponível em estoque e a consumida. A densidade das pilhas de carvão não é constante devido à fatores como estratificação e compactação e, por isso, o seu valor não é de fácil determinação.

Atualmente, existem ensaios de determinação de densidade conforme às recomendações da DNER-ME 092/94 e NBR-7185. Esse ensaio tem caráter invasivo e requer a paralisação da operação na parte do pátio que irá intervir. Entretanto, esse tipo de ensaio não cobre toda a extensão do estoque pois é realizado de forma pontual, em apenas algumas das pilhas e em pontos específicos delas. Além disso, o alcance da perfuração para retirada da amostra é limitada, alcançando apenas profundidade superficial.

Tendo em vista que as características e propriedades do carvão podem variar de uma pilha pra outra, devido a sua origem, esse tipo de ensaio não assegura confiabilidade e precisão para ser utilizado em larga escala e em um local com grande fluxo de minério como no pátio de termelétricas a carvão.

2.5 Sensores LiDAR e a refletividade do carvão

Além da densidade, a propriedade do carvão mais importante para esta problemática é a refletividade. Para que seja possível escolher o sensor LiDAR adequado para cada tipo de situação estabelecida, é necessário saber o seu alcance para uma determinada taxa de refletividade do material.

O carvão, por exemplo, possui uma das taxas de refletividade mais baixas entre os minérios. Em parte, isso se deve a sua cor preta e sua superfície porosa. Na Tabela 2, extraiu-se uma tabela de Xie (2015, Capítulo 2) para que fosse possível se verificar um padrão de taxas de refletividade do carvão mineral. Apesar dessas taxas serem correspondentes aos tipos de carvão mineral chinês, é possível adotar como um padrão de refletividade visto que essa característica física está atrelada ao estágio metamórfico do carvão mineral.

Existem vários tipos de carvão. Sabe-se que o carvão mineral utilizado por usinas termelétricas localizadas longe da extração do minério devem ser da melhor qualidade visto a questão limitação de transporte do carvão de baixa qualidade (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008). E, pela Figura 6, isso quer dizer que o carvão mineral é de alto teor de energia, sendo considerado do tipo Hulha.

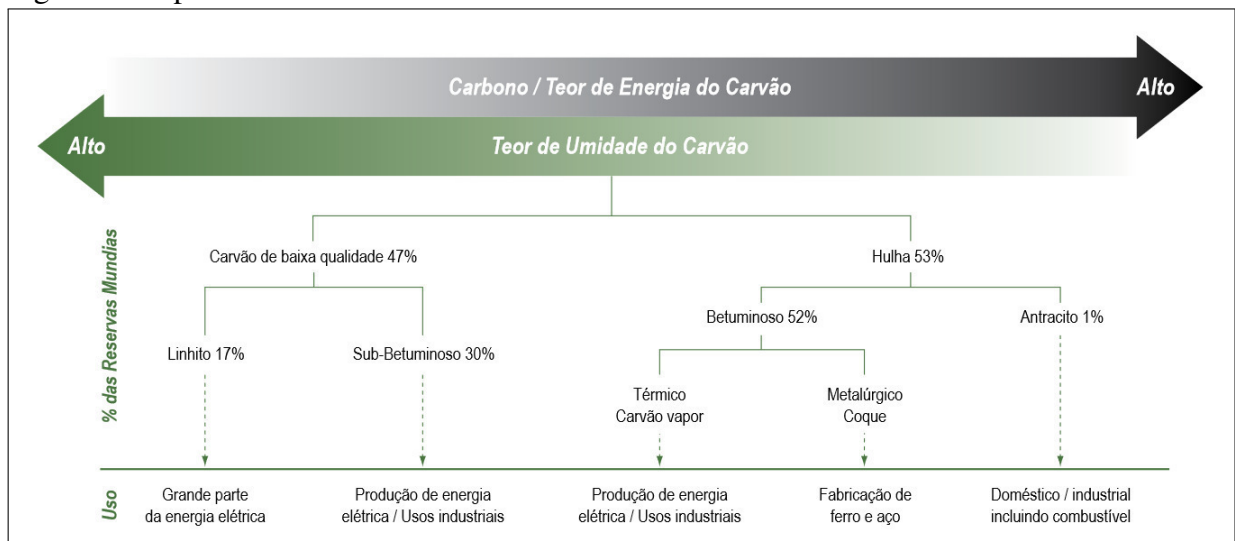
Voltando para a Tabela 2, é possível concluir que o carvão utilizado na produção de energia elétrica da planta pode ter sua taxa de refletividade entre 1,5% e 6%, pois "coking coal" pode ser traduzido como "carvão de coque", que nada mais é do que o carvão do tipo hulha na faixa do betuminoso, como mostrado na Figura 6. Além disso, para estar dentro da faixa até 6%, será considerado que é utilizado carvão semiantracito, como o "meager coal". E, por isso,

Tabela 2 – Refletividade de tipos diferentes de carvão chinês

Coal Type	Metamorphic stage	Reflectivity	Coal Type	Metamorphic stage	Reflectivity
Lignite	0	0,40-0,50 %	Lean coking coal	VI	1,50-1,69 %
Long-flame coal	I	0,50-0,65 %	Lean Coal	VII	1,69-1,90 %
Gas coal	II	0,65-0,80 %	Meager coal	VIII	1,90-2,50 %
Gas-fat coal	III	0,80-0,90 %	Anthracitic	IX	2,50-4,00 %
Fat coal	IV	0,9-1,2 %	Anthracitic	X	4,00-6,00 %
Coking coal	V	1,20-1,50 %	Anthracitic	XI	>6,00 %

Fonte: (XIE, 2015, Capítulo 2)

Figura 6 – Tipos de carvão



Fonte: em (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008)

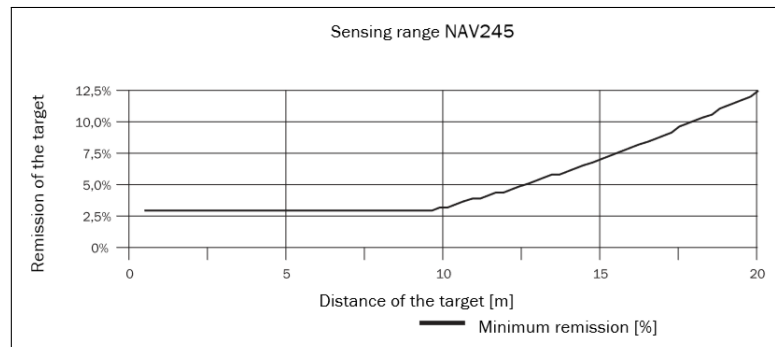
os sensores escolhidos deverão ter a capacidade de trabalhar dentro dessa faixa de reemissão.

Entretanto, durante a pesquisa, deparou-se com a seguinte situação: alguns fornecedores de sensores laser não fornecem o alcance o limite da taxa de refletividade do sensor, sendo a maior parte das documentações analisadas mostrando até 5%. Não se sabe ao certo se isso seria uma limitação do sensor ou uma padronização adotada em folhas de informação das fabricantes, mas isso dificulta a análise para a escolha de um bom sensor.

No caso da fabricante de sensores SICK, por exemplo, o modelo NAV245 foi o único que mostrou detalhadamente o seu limite de sensibilidade em documento de instruções da operação, como pode ser visto na Figura 7 e no SICK, Operating Instructions NAV245 (2017).

Para o sensor SICK LD-MRS400001S01, foi disponibilizado apenas até 5% de

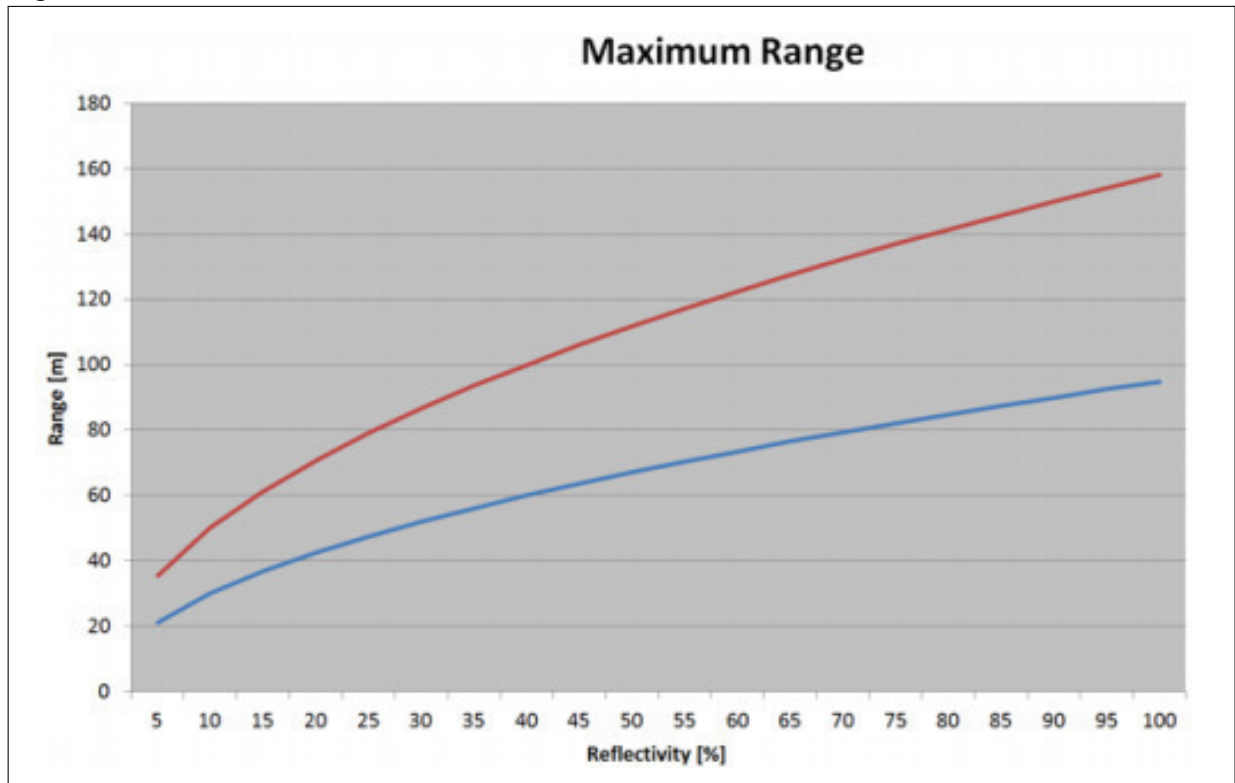
Figura 7 – Sensibilidade do sensor NAV-245 da SICK sobre a taxa de refletividade



Fonte: em SICK, Operating Instructions NAV245 (2017)

refletividade, como pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Sensibilidade do sensor LD-MRS400001S01 da SICK sobre a taxa de refletividade

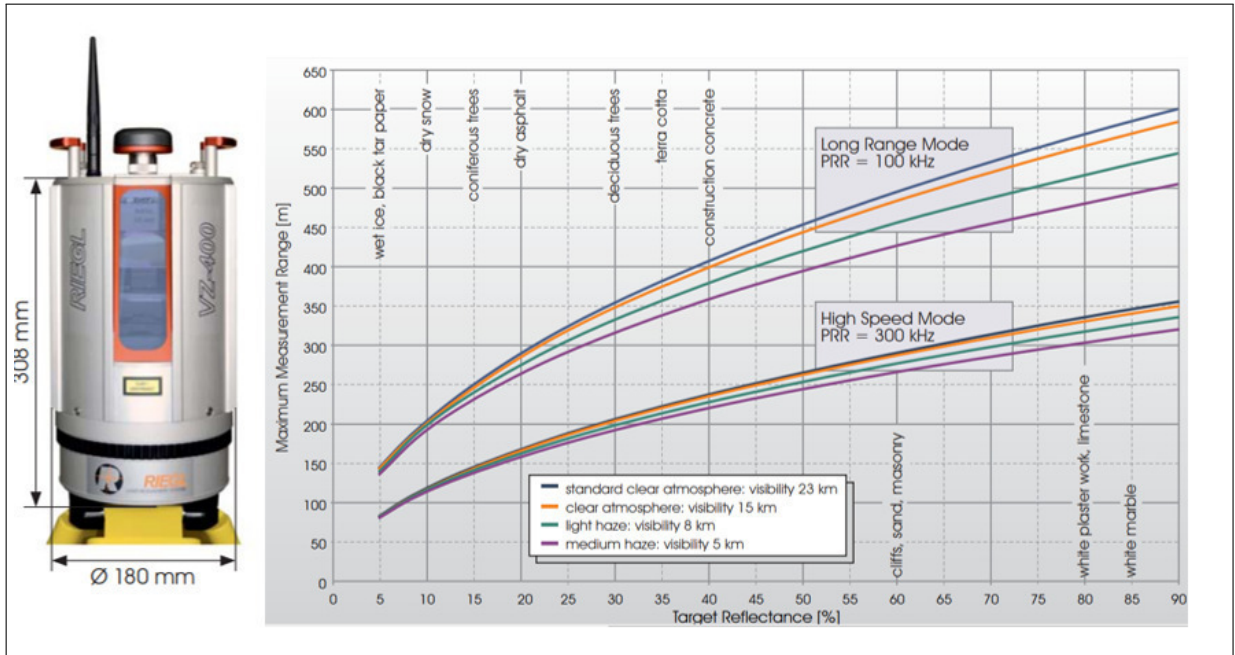


Fonte: em SICK, Operating Instructions LD-MRS (2017)

Pesquisou-se também sobre sensores de ultra longo alcance, sendo identificado o mesmo problema de falta de informação sobre a taxa de refletividade mínima. As folhas de informações dos sensores da VZ-400 e VZ=2000i da RIEGL, também se limitaram a mostrar até a taxa de refletividade de 5%.

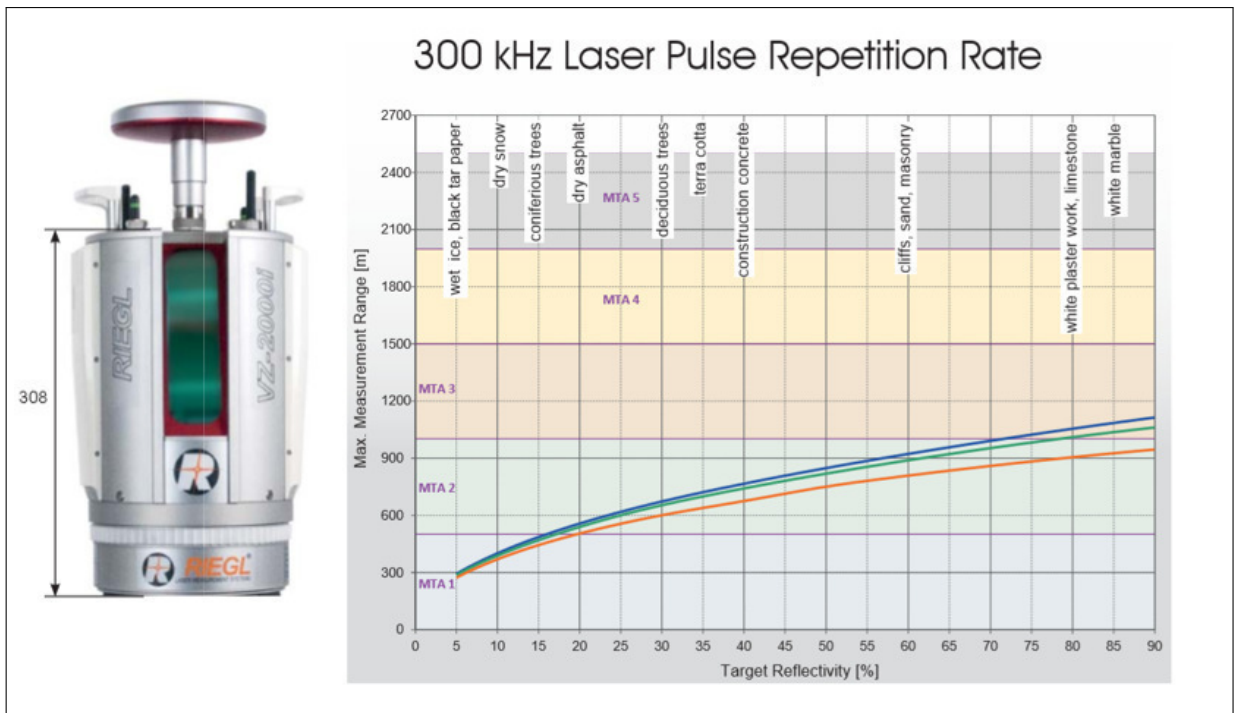
Essa falta de informação das fabricantes com relação a limitação dos sensores LiDAR são tem sido altamente prejudicial a pesquisa deste trabalho, no sentido que será necessário

Figura 9 – À esquerda a imagem ilustrativa do RIEGL VZ-400 e à direita o seu gráfico "alcance versus refletividade do material"



Fonte: em RIEGL, Datasheet VZ-400i (2017)

Figura 10 – À esquerda a imagem ilustrativa do RIEGL VZ-2000i e à direita o seu gráfico "alcance versus refletividade do material"



Fonte: em RIEGL, Datasheet VZ-2000i (2017)

realizar um sobredimensionamento do sensor para garantir a funcionalidade, de acordo com a distância de cada aplicação. E para análise deste trabalho será considerada a funcionalidade do sensor para taxa de refletividade do material de aproximadamente 10%.

Abaixo, tem-se na Tabela 3 algumas informações importantes dos sensores LiDAR escolhidos para análise deste trabalho.

Tabela 3 – Informações e orçamento dos sensores LiDAR

Sensor	Valor Unid.	Alcance		% reflet. mínima
		10% refletividade	5% refletividade	
SICK NAV245-10100	R\$20.905,74	25 metros	12,5 metros	Aprox. 2.6%
SICK LD-MRS400001S01	R\$41.210,30	50 metros	40 metros	Não informado
RIEGL VZ-400	R\$600.000,00	200 metros	140 metros	Não informado
RIEGL VZ-2000i	R\$900.000,00	400 metros	300 metros	Não informado

Fonte: (SICK, OPERATING INSTRUCTIONS NAV245, 2017), (SICK, OPERATING INSTRUCTIONS LD-MRS, 2017), (RIEGL, DATASHEET VZ-400I, 2017) e (RIEGL, DATASHEET VZ-2000I, 2017)

Nota: O orçamento foi feito diretamente com o vendedor em contato por telefone.

É importante notar que valores de distância considerados para os sensores de ultra-longo alcance na Tabela 3 possuem configurações diferentes. Por exemplo, foi considerado que o sensor *LiDAR* VZ-400 da RIEGL estaria em frequência de 100kHz enquanto o VZ-2000i em 300kHz

2.6 Definição do problema

Com base nas informações e problemas expostos ao longo deste capítulo ??, é possível perceber que existem duas grandes dificuldades a serem enfrentadas no processo de medição de volume para o controle de estoque em pátios de carvão. A primeira é relativa ao sistema de aquisição de dados, que está diretamente atrelado ao tipo de instrumentação escolhida e a forma como a grandeza será medida. A segunda é relacionada às técnicas utilizadas no tratamento dos dados, dentro do sistema de processamento.

Cabe observar que o segundo problema é uma consequência do primeiro. Ou seja, após a escolha do sistema de aquisição de dados é que será possível definir como os dados serão processados e onde. Por isso, este trabalho visa analisar apenas o sistema de aquisição de dados, apenas comentando sobre as formas de tratar a segunda dificuldade no Capítulo 5.

Portanto, o problema pode ser definido pela seguinte pergunta: "Qual o melhor sistema de aquisição de dados para medição de volume de estoques de carvão em pátios de termelétricas?".

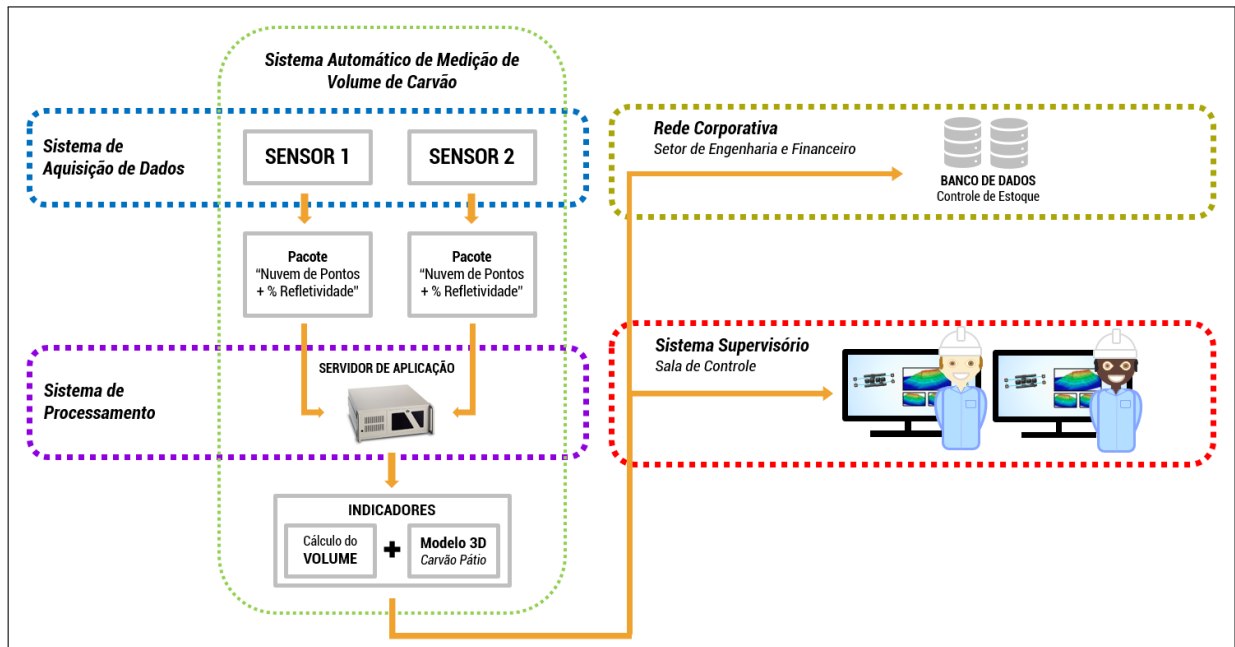
3 ANÁLISES DE ENGENHARIA E PROPOSIÇÕES

O presente capítulo apresenta o escopo básico do sistema automático de medição de volume de carvão e posteriormente as cinco proposições idealizadas e suas respectivas análises de engenharia para a implementação de um sistema de aquisição de dados para medição de volume de estoque do pátio de carvão no Complexo Termelétrico (CTE). Um conjunto de critérios é criado e as análises são realizadas com base nesses critérios estabelecidos.

3.1 Escopo básico da solução

Para resolver o problema de medição de volume de carvão, será necessário o desenvolvimento de um sistema automático de medição de volume de carvão conforme ilustrado pela Figura 11. Logo, as proposições e análise de engenharia deste trabalho são avaliadas para escolher qual modelo de sistema de aquisição de dados seria ideal para implementação junto ao sistema de processamento, que é comum a todas as propostas.

Figura 11 – Esquemático geral do sistema automático de medição de volume do estoque de carvão



Fonte: Autor.

É importante notar, que nesse sistema de aquisição de dados, a escolha dos sensores e a quantidade de sensores a ser utilizada dependerá das características do projeto.

3.2 Critérios de análise utilizados

Antes de realizar qualquer análise, é importante estabelecer critérios que possam servir como um guia e, assim, avaliar todas as propostas de forma igual sem sobrepor fatores importantes. Para análise das propostas deste trabalho, serão levados em consideração dez critérios, levando em consideração que o critério de custo com sensores são suficientes para demonstrar o alto custo de um determinado projeto, e, por isso foram os únicos a serem quantificados em todas as propostas. Além disso, no Capítulo 4, esses critérios serão utilizados para escolher a melhor proposta. Abaixo, tem-se listado os critérios utilizados nesta análise:

1. **Viabilidade técnica:** será utilizado para analisar se a proposta consegue ou não realizar a sua finalidade de cobrir toda entrada e saída de carvão do pátio;
2. **Custo com sensores:** é relativo ao preço orçado para os sensores da proposta;
3. **Custo com redes:** está diretamente relacionado com a distância entre os sensores e o servidor de aplicação. Então, quanto mais distante, mais caro se paga para estabelecer essa comunicação;
4. **Custo com obra civil:** está atrelado à qualquer tipo de serviço de construção de salas, vigas, estruturas, fundação e terraplanagem. Será considerado também, neste trabalho, o estudo de aterramento;
5. **Custo com mecânica:** é relativo à compra de partes mecânicas, como veículos ou peças pre-elaboradas, e ao pagamento de serviços de criação, desenvolvimento e confecção de peças e estruturas que suprem as necessidades do projeto;
6. **Praticidade de instalação do sistema:** está diretamente relacionada ao tempo de instalação do sistema, da sua característica de mobilidade (fixo ou móvel), da quantidade de colaboradores necessários para realizarem a tarefa e da interferência da instalação na operação do sistema;
7. **Praticidade de manutenção do sistema:** é relativo à facilidade de acesso ao local de manutenção das partes da instrumentação do sistema, das características das regiões de atuação do sistema a serem assistidas;
8. **Complexidade do sistema:** é o nível de complexidade do sistema de aquisição de nuvem de pontos, o que inclui a necessidade de aplicação de técnicas ou metodologias para o pleno funcionamento do sistema. Esse parâmetro não se refere a complexidade do sistema de processamento de dados porque é comum a todas as propostas.

3.3 Propostas de sistemas de aquisição de dados

Ao se analisar as informações do capítulo anterior, é possível concluir que o melhor local para se instalar um sistema de aquisição de dados para medir a quantidade de carvão do complexo é o pátio de carvão pois esse local concentra tanto os fluxos de entrada de carvão - pelas esteiras e caminhões - quanto os de saída de carvão mineral para consumo na geração de energia.

Dessa maneira, realizou-se um estudo de possíveis soluções que pudessem satisfazer as necessidades da empresa com a finalidade de facilitar o processo de controle e planejamento de estoque do setor de operação da empresa. Pensou-se, inicialmente, em duas vertentes para o desenvolvimento de projeto de pesquisa para solucionar o problema em questão.

A primeira vertente seria desenvolver um sistema de aquisição de dados terrestre. Existem duas formas de desenvolver esse tipo de sistema. A ideia que pudesse utilizar a infraestrutura já disponível pelo pátio de carvão para realizar a instalação do novo equipamento, ou fazer algo totalmente independente disso. No primeiro caso, imaginou-se a aplicação de um sistema em que a aquisição seria baseada em pontos fixos como as transportadoras de correia, torres de transferência e de iluminação do pátio e as *Stacker&Reclaimers*. O segundo seria um projeto que dispusesse de um sistema terrestre móvel que realizasse a varredura das pilhas, podendo ser utilizado um robô autônomo que possuísse um braço articulado de longo alcance para passar por cima da pilha mais próxima.

A segunda vertente seria desenvolver um sistema de aquisição de dados aéreo, para que pudesse aproximar mais o sensor dos estoques de carvão e assim ter uma perspectiva de uma vista superior das pilhas. No primeiro caso, pensou-se em um sistema de roldanas que tivesse uma plataforma para acoplagem do sensor LiDAR. Os sistemas aéreos possuem a mesma perspectiva do sistema de escaneamento desenvolvido e testado em escala de laboratório em Zhao e Koch (2012).

3.3.1 *Sistemas terrestres*

Os sistemas de aquisição de dados terrestres foram pensados inicialmente para que não tivessem um sistema de automação complexo e para aproveitar a infraestrutura disponível do pátio de carvão. Dessa maneira, pensou-se em três tipos de propostas que pudessem suprir as necessidades de qualquer setor de operação.

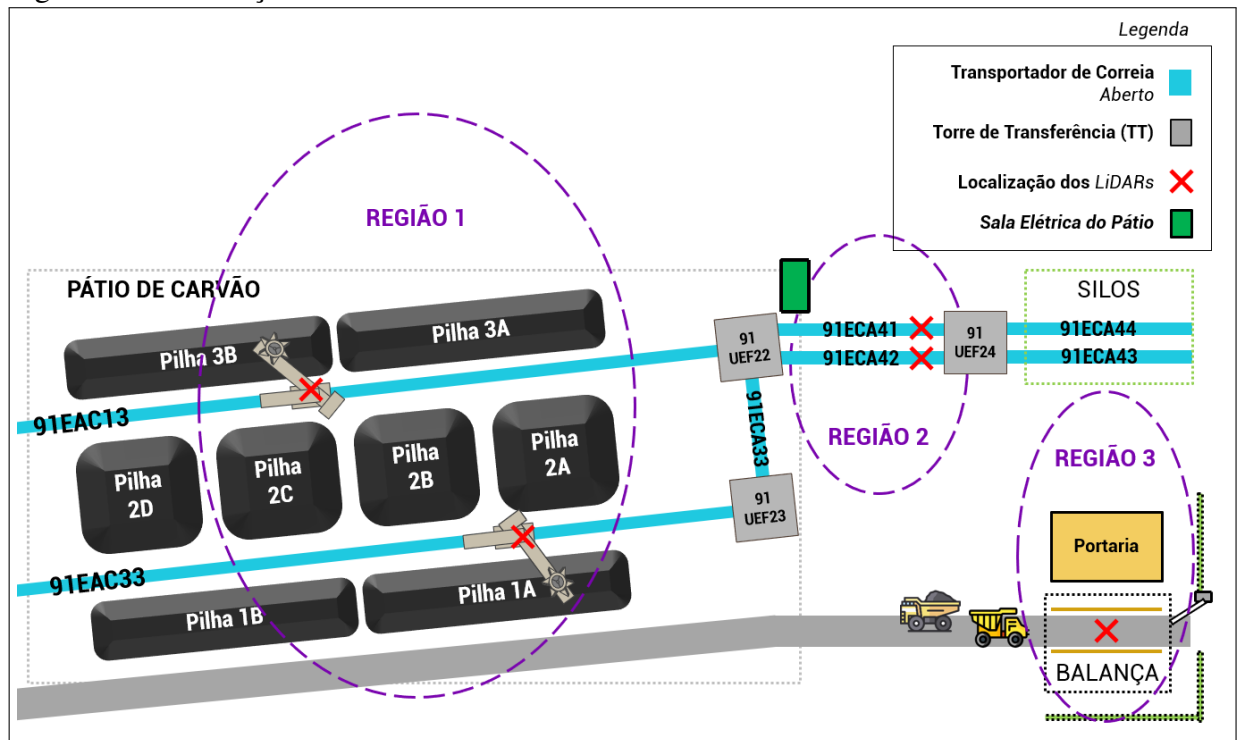
A primeira proposta é que o sistema de aquisição de dados fosse instalado em quatro correias transportadoras do pátio (nas duas *Stackers*, CTP-5 e CTP-6) e funcionasse em conjunto com uma plataforma para varredura de volume da caçamba de caminhões na portaria.

A segunda é que o sistema fosse instalado nas torres de iluminação do pátio e também nas quatro Torres de Transferência do pátio (TTT00, TTT01, TTT10 e TTT11).

Já a terceira proposta tem uma ideia diferenciada. A infraestrutura do pátio de carvão não seria utilizada. Ao invés disso, os sensores seriam instalados num robô móvel equipado com braço articulado de longo alcance.

3.3.1.1 Proposta 1: Sistema de varredura distribuído

Figura 12 – Ilustração do Pátio com referências.

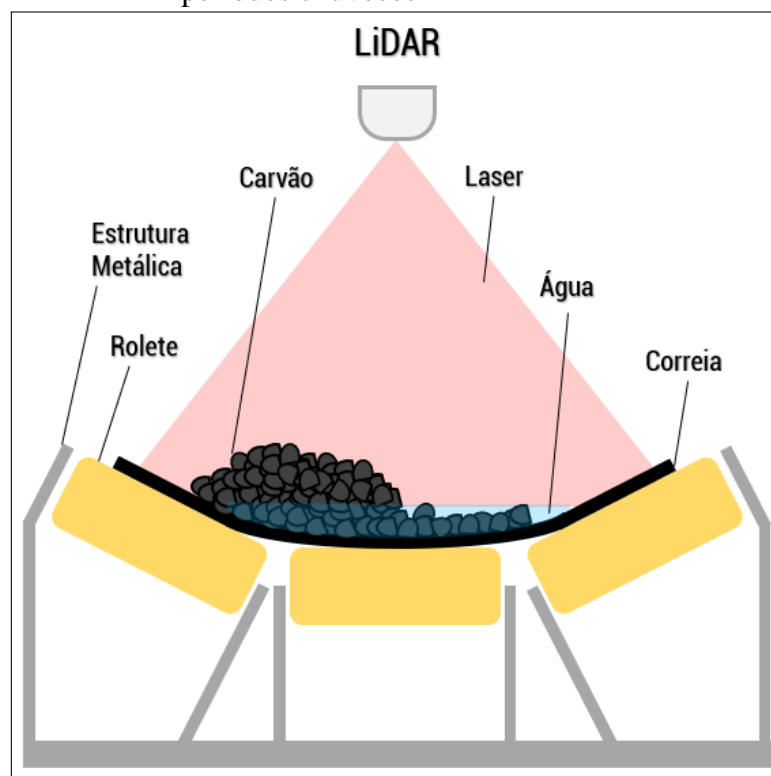


Fonte: Autor.

Esse sistema foi pensado com o intuito de aplicar e resolver o problema de sensoria-mento da maneira mais trivial. A instalação dos sensores LiDARs seriam realizadas nas esteiras CTP-5 e CTP-6, na esteira da lança das *Stacker&Reclaimers* e em uma estrutura que pudesse ficar acima da balança da portaria. Como é possível ver na Figura 12, é necessário ao menos 5 sensores LiDAR espalhados em 3 regiões para que o sistema de aquisição da nuvem de pontos possa cobrir as fases de recepção e expedição de carvão de forma efetiva.

Esse sistema de aquisição é uma proposta que pode ser considerada viável tecnicamente, tendo-se em vista que todos os pontos de entrada e saída de carvão serão cobertos e não há um ponto cego dentro do escopo do projeto. Por exemplo, com relação à entrada de carvão do pátio, o sistema consegue coletar as nuvens de pontos na entrada dos caminhões na portaria e também no processo de empilhamento do carvão no pátio da usina. Quanto a medição do volume de carvão a ser consumido, é possível adquirir a nuvem de pontos através dos sistemas instalados nas esteiras CTP-5 e CTP-6.

Figura 13 – Ilustração do acúmulo de água na correia em períodos chuvosos



Fonte: Autor.

Entretanto, é importante considerar que o acúmulo de água nas esteiras pode interferir diretamente na viabilidade técnica desta proposta, pois dificultaria a leitura do sensor *laser*. Foi relatado pelo corpo técnico da operação da usina que durante o período de chuva a água se acumula nas correias e é transportada junto com o carvão, da mesma forma como pode ser visto pela Figura 13. Essa mistura impacta diretamente no escaneamento do sensor, pois a maior parte do espectro de luz emitido é absorvido pela água, causando um grande erro de leitura do volume de carvão visto que uma parte estará submersa na água. Assim a nuvem de pontos retornada será totalmente aleatória ou próxima a valores considerados infinito. Esse problema ocorre em todos os três modos de funcionamento da *Stacker&Reclaimers*. É importante ressaltar ainda que isso

ocorre devido ao fato de se ter apenas uma pequena pilha de carvão na esteira dentro de uma expressiva quantidade de água acumulada.

Uma forma de mitigar esse problema seria através da compra de sensores mais sensíveis que possam compensar esses erros de leitura, o que eleva o custo com sensores. Assim, tem-se o caso da utilização de sensores de longo alcance como o LiDAR "LD-MRS" da SICK ou ainda outro que tenha um alcance maior e seja mais sensível a refletividade baixa. Logo, esse é um fator a ser testado, para que seja analisado os resultados, gerando um certo grau de incerteza no funcionamento em períodos de chuva.

Considerando a utilização de sensores como o "LD-MRS" da SICK, o valor unitário para cada sensor sairá em torno de R\$41.210,30. Considerando que serão 5 sensores, o custo total dos sensores será de aproximadamente R\$206.051,50 e que pode ser considerado um valor relativamente baixo. Agregado a essas plataformas, seria necessário também *encoders* para saber a velocidade das correias para gerar referência para os pontos dos sensores LiDAR instalado em esteiras. Entretanto, nesta análise é considerado apenas os custos com sensores LiDAR, pois são mais caros.

Tabela 4 – Levantamento do custo dos sensores - Proposta 1

SENSOR	UNIDADES	VALOR UNID.	VALOR TOTAL
SICK LD-MRS400001S01	5	R\$41.210,30	R\$206.051,50

Fonte: o autor.

Outra variável a ser analisada é a distância entre os pontos de instalação dos sensores e o servidor de aplicação. Vê-se pela Figura 12 que os locais são relativamente próximos, com exceção do LiDAR que seria instalado na portaria. O servidor de aplicação seria instalado na sala elétrica do pátio que é bem central às regiões 1 e 2 da figura. Além disso, o sistema poderia ser integrado a mesma rede que conecta as *Stacker&Reclaimers* à sala elétrica do pátio. Isso na prática é vantajoso, pois não seria necessário destinar uma parcela expressiva do orçamento do projeto para custeio da ampliação das redes industriais ou, quem sabe, poderia se utilizar as redes que já existem no sistema para integração.

Uma das vantagens desta proposta seria o fato de não haver necessidade de obras civis, tendo-se em vista que a infraestrutura que seria utilizada no projeto seria totalmente aproveitada pelo que já existe na usina.

Haveria custos com a mecânica do sistema e eles seriam relativos a instalação dos

sensores na estrutura das correias, e, também, para a criação de uma estrutura que pudesse fixar o sensor LiDAR a uns cinco metros acima da altura dos caminhões, na região onde hoje se encontra a balança da portaria.

A instalação desse sistema não seria prática, pois uma das partes da instalação é a passagem dos cabos ou instalação de rede sem fio que ligariam o servidor de aplicação aos sensores, sendo que os sensores serão instalados em posições muito distantes ao servidor. Essa atividade poderia levar dias ou semanas, independente da topologia da rede. Além disso, haveria os serviços mecânicos para integração das novas peças à estrutura de correias e *Stacker&Reclaimers* do pátio, sendo necessário interferência na operação do sistema. Ainda, seria necessário mobilizar uma quantidade expressiva de pessoas para a instalação do sistema.

Tendo-se em vista que o sistema seria distribuído e os sensores seriam instalados em três regiões diferentes, seria mais difícil de prestar assistência do que se fosse um sistema centralizado. Considerando um exemplo de manutenção preventiva de sensores de uma região para outra, necessitaria que os técnicos da instrumentação pudessem se movimentar uma longa distância de carro ou à pé para efetuar a limpeza das lentes dos sensores LiDAR. Logo, isso geraria uma grande espera dos membros da automação para verificação de melhora do desempenho do sistema.

O sistema em si possui nível de complexidade baixo, pois o sistema de aquisição é fixo e não é móvel, portanto não precisa ser implementado técnicas avançadas para controle de referência. Praticamente, seria necessário cruzar as informações dos *LiDARs* com os *encoders*.

Assim, pode-se resumir a avaliação dos critérios desta proposta na tabela abaixo:

3.3.1.2 Proposta 2: Torres de Varredura

Essa proposta foi idealizada com o objetivo de utilizar a infraestrutura dos quatro postes de iluminação e das quatro torres de transferência do pátio. Partiu-se do pressuposto que os postes e as torres possuem grandes altitudes em relação ao solo e, assim, seria possível ter uma excelente cobertura do pátio. Segundo relato do corpo técnico da usina em estudo, os quatro postes de iluminação ao redor do pátio possuem altura estimada em trinta metros (30 m), o que aparentemente indica uma boa altura. Entretanto essa premissa será analisada considerando as diversas variáveis que envolvem este problema.

Primeiro, é necessário avaliar a viabilidade técnica do sistema. Neste primeiro passo, é importante considerar a distância dos sensores para a pilha e o alcance mínimo do sensor.

Tabela 5 – Resumo da análise da proposta 1: Sistema de varredura distribuído

CRITÉRIO(S)	PERGUNTA / GRAU	COMENTÁRIOS
<i>DE VIABILIDADE</i>		
	<i>É VIÁVEL?</i>	
1. VIABILIDADE TÉCNICA	Analisável	É aconselhado testar a utilização de sensores de longo alcance
<i>FINANCEIROS</i>		
	<i>GRAU</i>	
2. CUSTO COM SENSORES	Médio/Alto	5 sensores SICK LD-MRS
3. CUSTO COM REDES	Médio	Ampliação da rede e reaproveitamento de algumas antenas do sistema
4. CUSTO COM OBRA CIVIL	Baixo	Não haveria necessidade
5. CUSTO COM SERV. MECÂNICOS	Baixo	Integração de estruturas e peças a sistema já existente
<i>DE PRATICIDADE</i>		
	<i>GRAU</i>	
6. INSTALAÇÃO	Alto	Passagem de cabos e estruturas serão integradas ao sistema já existente
7. MANUTENÇÃO	Médio	Locais acessíveis, mas muito distantes
<i>DIFICULDADE</i>		
	<i>GRAU</i>	
8. COMPLEXIDADE DO SISTEMA	Baixo	Sensores fixos, sem necessidade de implementação de muitas técnicas de controle e processamento diferentes

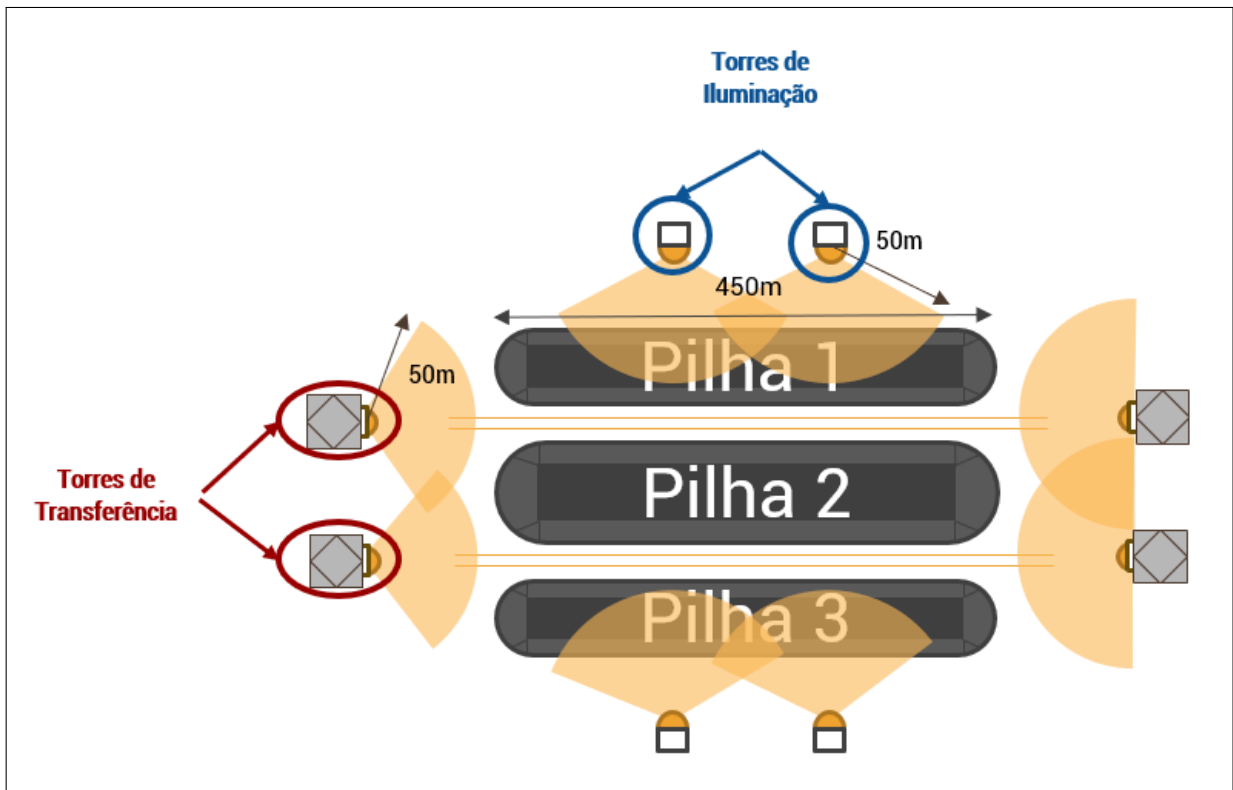
Fonte: o autor.

Tendo como base o sensor LiDAR do modelo "LD-MRS" da SICK de longa distância, e ainda sendo exacerbadamente otimista ao considerar a taxa de refletividade do carvão em 10%, o sensor só alcançaria cinquenta metros (50m), o que cobriria parcialmente a pilha de carvão. É possível visualizar a situação na ilustração da vista superior do pátio na Figura 14. Dessa forma será possível assegurar que o sensor poderá cobrir a região do pátio.

Fez-se uma análise mais profunda do problema, analisando como num diagrama vertical no AutoCAD 2018 (versão para estudantes), para que fosse possível verificar qual altura mínima viável o sensor deveria ser instalado.

Considerou-se que o poste estaria a uma distância de vinte e quatro metros (24 m) da pilha lateral mais próxima, e que a distância entre as pilhas seria de dez metros (10m). Cada pilha é representada por um trapézio isósceles de doze metros (12m) de altura, com dois ângulos de trinta e cinco graus (35°). Foi considerado que as pilhas laterais possuiriam uma base de quarenta e sete metros (47 m) de distância. Na Figura 15, analisou-se o lado esquerdo do diagrama. Para

Figura 14 – Ilustração da vista superior do conceito de torres de varredura das pilhas de carvão com sensor de alcance máximo de 50m em 10% de refletividade.



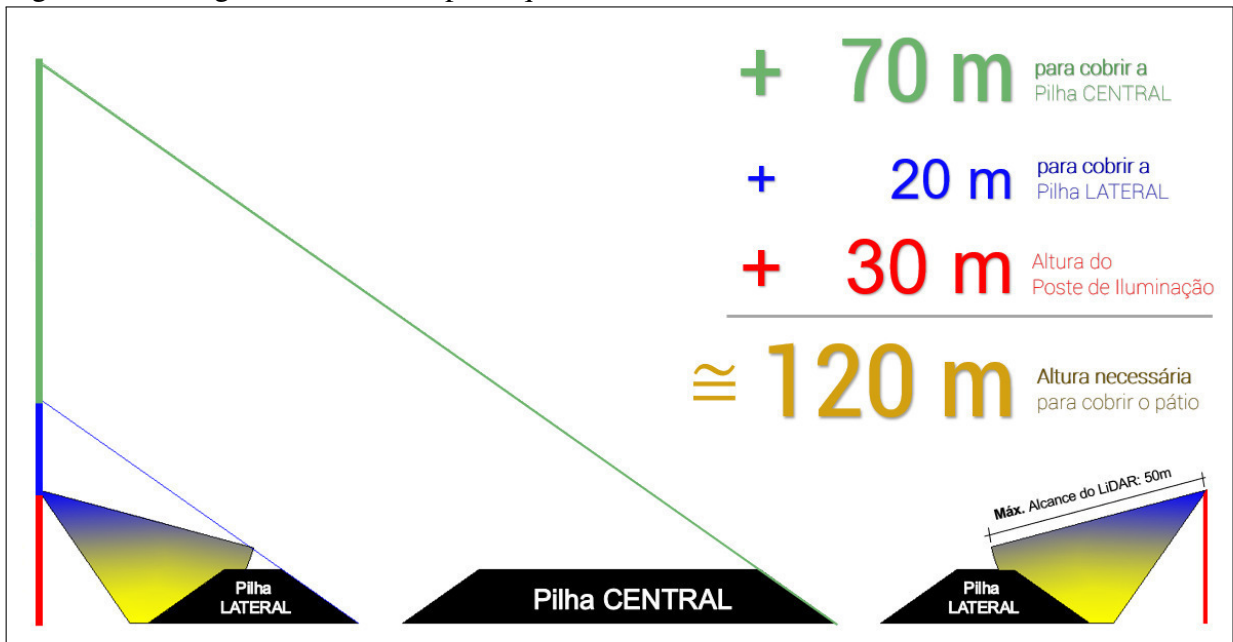
Fonte: o autor.

Nota: imagem meramente ilustrativa, fora da escala real.

que a altura mínima fosse considerada viável, foi estabelecido como critério que o sensor pudesse alcançar até o vértice do lado direito da pilha central, pois assim seria possível o sensor cobrir o sombreamento de uma pilha para outra. Como exposta na Figura 15 através da reta verde, a altura mínima viável é de aproximadamente cento e vinte metros (120m), pois para cobrir a primeira pilha lateral o sensor deve ser instalado a cinquenta metros (50m) acima do nível do pátio e para cobrir a pilha central é necessários mais setenta metros (70m), totalizando cento e vinte metros (120m). Logo, é necessário um tipo de sensor LiDAR que possua um maior alcance para funcionar com esse tipo de aplicação.

Tendo em vista esse problema, pesquisou-se um tipo de sensor LiDAR que pudesse cobrir a grande dimensão do pátio. Como fruto desta pesquisa, encontrou-se dois sensores LiDAR de uma empresa chamada RIEGL que potencialmente podem resolver o problema do sensor da SICK, pois são categorizados como sensores de ultra longa distância. O primeiro modelo é o "VZ-400" e o segundo é o "VZ-2000i". O primeiro consegue alcançar até quatrocentos metros (400m) em condições normais. Já o segundo consegue alcançar até dois quilômetros (2km) em ambiente limpo e com varredura em materiais de alta taxa de refletividade. Como

Figura 15 – Diagrama vertical do pátio que mensura a altura mínima viável



Fonte: Autor.

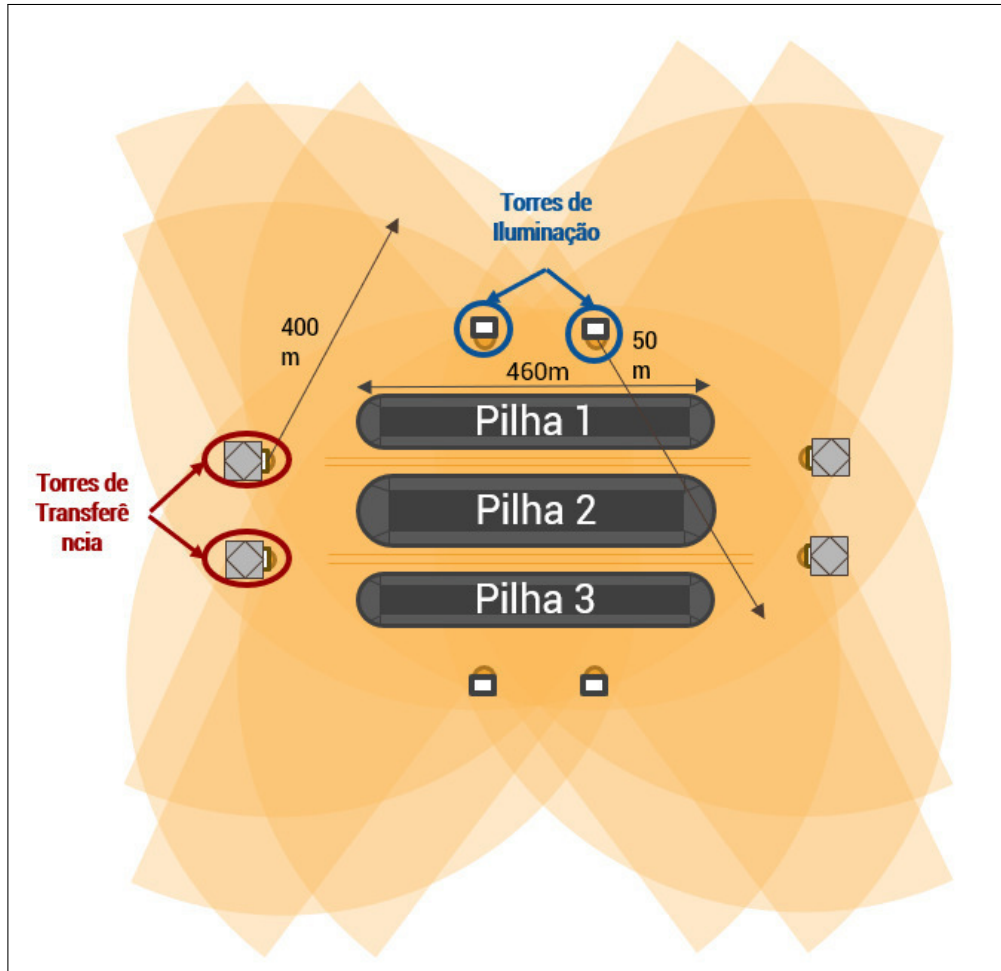
estamos lidando com uma problemática que, sendo otimista, envolve um material de 10% de refletividade, avaliar-se-á os gráficos "alcance *versus* refletividade do material" dos sensores que estão disponível em seus *datasheets*.

É possível perceber pela Figura 9 da seção 2.5 que, para a refletividade do material de 10%, o sensor alcançaria aproximadamente duzentos metros (200m), o que é um alcance expressivo, mas não suficiente para alcançar a base da pilha central no seu vértice direito, que chega a uma distância de duzentos e dezessete metros (217m). Logo, o sensor VZ-2000i, que possui uma potência maior, consegue detectar materiais de 10% de refletividade a quatrocentos metros (400m) funcionando à trezentos quilohertz (300kHz) como pode ser verificado na Figura 10 localizada na seção 2.5. O resultado seria algo parecido com a ilustração da Figura 16.

Apesar desses sensores poderem resolver o problema de sensores de longo alcance, eles possuem um custo muito elevado. Por exemplo, o RIEGL VZ-400 pode chegar a custar seiscentos mil reais (R\$600.000,00) a unidade, e o RIEGL VZ-2000i custa em torno de novecentos mil reais (R\$900.000,00) a unidade. Tendo-se em vista que a quantidade de sensores projetados para serem utilizados nesta proposta seria em torno de oito unidades, o custo com sensores se tornaria exorbitante, chegando a valores próximo de sete milhões e duzentos mil reais (R\$7.200.000,00).

O custo com ampliação da rede industrial seria caro também, tendo-se em vista a instalação de oito sensores. Além disso, há de se considerar o tipo de comunicação que poderá

Figura 16 – Vista superior das torres de varredura com sensor de alcance máximo de 400m em 10% de refletividade.



Fonte: o autor.

Tabela 6 – Levantamento do custo dos sensores - Proposta 2

SENSOR	UNIDADES	VALOR UNID.	VALOR TOTAL
CENÁRIO 1 (não cobre tudo)			
RIEGL VZ-400	8	R\$600.000,00	R\$4.800.000,00
CENÁRIO 2 (cobre tudo)			
RIEGL VZ-2000i	8	R\$900.000,00	R\$7.200.000,00

Fonte: o autor.

ser adotada, como sem fio e/ou com fio. De toda forma, a rede seria bem extensa e abrangeria toda a dimensão do pátio centralizada da Sala Elétrica.

Como visto na figura Figura 15, é necessário que as torres laterais tenham ao menos cento e vinte metros (120m) de altura. Essa altura corresponde ao maior tipo de torre de telecomunicações e que exigirá alto custo para o projeto por cada torre e não compensa o

investimento, já que o custo com os sensores também já será bastante elevado. Assim, a obra civil terá um custo altíssimo e ainda seria necessário pedir autorização de ANAC e ANATEL para o funcionamento.

O custo com serviços mecânicos também existirá e será proveniente de serviços para criação de plataformas para fixação dos sensores nas torres de iluminação e de transferência. Os valores relativos a esses serviços serão relativamente baixos.

Esse tipo de projeto não é de fácil instalação, e, por isso, não pode ser considerado prático. Há necessidade de obras civis que demoram e demandam uma grande quantidade de homem-hora para conclusão.

A realização de teste com os sensores não seriam nada práticos. Há uma limitação nos testes, tendo-se em vista a instalação do sensor em locais de grande altura. Caso houvesse, por exemplo, um mal contato ou problema no sensor, seria necessário subir a enorme torre para verificar esse problema. Por isso, as manutenções de um sistema que possui sensores instalados em grande altura exigiriam bastante tempo e recursos para serem efetuadas, e isso as tornam menos práticas. As atualizações provavelmente seriam feitas somente no campo da lógica de programação, portanto não seria de difícil acesso, tendo-se em vista que essas atualizações seriam executados no servidor de aplicação do sistema. Mas caso fosse necessário uma atualização mecânica, o processo em si se tornaria mais difícil e exporia os colaboradores à risco de segurança em alturas.

Tendo em vista como o sistema funcionaria, não haveria uma grande complexidade como um todo. Tendo-se em vista que os sensores seriam instalados em locais fixos, o sistema possuiria apenas um controle do momento vertical, horizontal e rotação do sensor de forma remota. Esse tipo de controle é chamado de PAN TILT, e é muito utilizado em sistema de monitoramento com câmeras. Além disso o sistema poderia apresentar atualizações em tempo real, o que aumenta a complexidade do sistema.

3.3.1.3 Proposta 3: Robô autônomo com um braço articulável de longo alcance

Esta proposição foi idealizada com o intuito de se aproveitar o *know-how* do Grupo de Pesquisa em Automação, Controle e Robótica (GPAR) da Universidade Federal do Ceará (UFC), pois o grupo já publicou diversos trabalhos sobre controle em planejamento de trajetória para robôs móveis (Lima *et al.*, 2016) (Rocha *et al.*, 2017) .

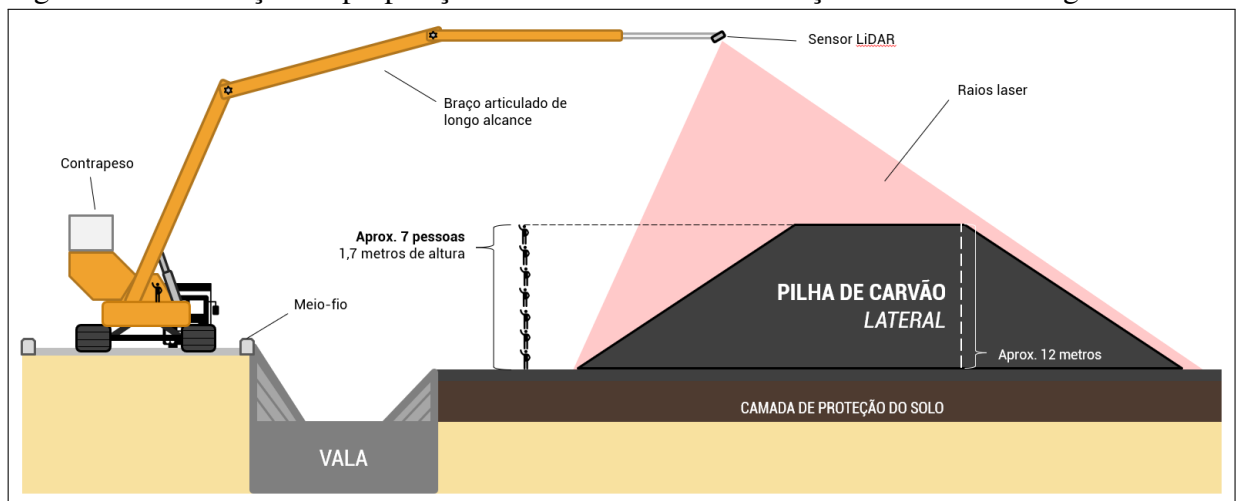
Como ilustrado pela Figura 17, o sensor LiDAR ficaria logo acima da pilha de carvão

Tabela 7 – Resumo da análise da Proposta 2: torres de varredura

CRITÉRIO(S)	PERGUNTA / GRAU	COMENTÁRIOS
DE VIABILIDADE		É VIÁVEL?
1. VIABILIDADE TÉCNICA	Sim	
FINANCEIROS		GRAU
2. CUSTO COM SENSORES	Altíssimo	Mais de um sensor de ultra longo alcance
3. CUSTO COM REDES	Alto	Ampliação da rede industrial para poste de iluminação
4. CUSTO COM OBRA CIVIL	Alto	Postes de iluminação teriam que ser trocados por maiores
5. CUSTO COM SERV. MECÂNICOS	Baixo	Criação e integração de peças a estruturas
DE PRATICIDADE		GRAU
6. INSTALAÇÃO	Baixo	Mudanças em estrutura civil e soldagem
7. MANUTENÇÃO	Baixo	O topo das torres de iluminação são de difícil acesso
DIFICULDADE		GRAU
8. COMPLEXIDADE DO SISTEMA	Médio	Controle PAN TILT e Atualização em tempo real

Fonte: o autor.

Figura 17 – Ilustração da proposição do robô autônomo de braço articulado de longo alcance



Fonte: o autor.

devido ao braço robótico de longo alcance. O fato do robô aproximar o sensor LiDAR da pilha de carvão é excelente porque os problemas relacionados a aquisição da nuvem de pontos podem

ser resolvido com a utilização do sensor de longo alcance da SICK LD-MRS.

A utilização de um sistema móvel terrestre é viável, tendo em vista que o robô poderá ser dimensionado para ser capaz de transitar pela pista ao redor das pilhas de carvão e também pela pista que contorna o pátio. Entretanto, o processo de varredura das pilhas de carvão seria demorado, pois deve ser levado em consideração que o sistema deverá ter bastante cuidado com os obstáculos terrestres, tendo em vista que o veículo seria uma espécie de trator, que ao colidir com alguma pessoa poderia esmagá-la ou com alguma estrutura poderia destruí-la. Por isso, para esse caso, seria importante que os processos da operação do pátio nesse momento fossem paralisados. Na Figura 17, é possível ter uma noção de quão alto esse robô deverá ser, pois a estrutura do robô deverá ser capaz de levar o sensor para cima da altura máxima da pilha que é de aproximadamente doze metros (12m).

Sabendo dos perigos de colisão, o robô precisará se utilizar de técnicas avançadas de desvio de obstáculos para que não passe por cima das pessoas, dos carros, dos prédios ou de qualquer outra coisa que estiver a sua frente, considerando não só o desvio da sua parte que funciona como veículo mas também do seu braço robótico. Para isso, será necessário a utilização de pelo menos três sensores LiDAR para auxiliar nessa tarefa. Dessa forma, foram escolhidos sensores LiDAR como o modelo NAV245-10100 da SICK, os quais poderão dar suporte na detecção de obstáculos. Ficariam, então, dois sensores na parte de veículo do robô (dianteira e traseira) e o terceiro sensor na parte do braço robótico.

Portanto, seria necessário quatro sensores: um de longo alcance para varredura e outros três para auxílio na navegação e desvio de obstáculos. Foi feito o orçamento dos sensores e os seus valores foram adicionados para contabilização na Tabela 8. Como visto, o custo com sensores pode chegar a aproximadamente quarenta e cinco mil reais (R\$45.000,00).

Tabela 8 – Custo dos sensores - Proposta 3: robô terrestre de braço articulado de longo alcance.

SENSOR	UNIDADES	VALOR UNID.	VALOR TOTAL
SICK LD-MRS400001S01	1	R\$41.210,30	R\$41.210,30
SICK NAV245-10100	3	R\$20.905,74	R\$62.717,22
TOTAL:			R\$103.927,52

Fonte: o autor.

Outro fator importante é o custo com a rede de sensores. Estima-se que o valor a ser

orçado não será alto porque redes de sensores de sistemas móveis são mais simples, já que os sensores serão integrados ao sistema de processamento que será instalado no próprio robô.

Além disso, existem três topologias de rede através das quais o robô pode se conectar ao sistema da EDP. A primeira delas seria através do armazenamento da nuvem de pontos no robô para ser enviada ao sistema de processamento de dados quando o robô retornar para sua base. A partir de então, os dados seriam processados e a informação gerada seria repassada para a operação. A segunda maneira seria através da transferência da informação pós-processamento de dados no próprio robô-guindaste. Isso quer dizer que a nuvem de pontos já seria processada em um servidor de aplicação instalado no robô e que as informações já poderiam ser enviadas para a operação diretamente do robô, instalando uma antena emissora no robô móvel e outra receptora em um ponto específico do pátio. A terceira seria através da transmissão instantânea das nuvens de pontos diretamente para o sistema de processamento que seria instalado na sala elétrica. Para isso, seria necessário a instalação da antena emissora no robô e a antena receptora em algum ponto específico do pátio de carvão, que se conectaria à sala elétrica.

Neste caso, em específico, seria considerado no projeto a primeira topologia. Dessa forma, o grau do custo com redes seria baixo, pois não precisaria passar muitos cabos ou instalar antenas de longo alcance.

Como relação às obras civis, será considerado a necessidade de adaptações à pista e aos acessos do pátio para um melhor trânsito do robô pela área e de construção de um espaço para guardar o robô.

Em relação aos custos com a parte mecânica do projeto, será necessário comprar o veículo de grande porte que possa comportar a estrutura do braço articulado de longo alcance e ainda seja passível de adaptações. Esse veículo seria como um modelo especial de guindaste e seria necessário se desenvolver um estudo para qual tipo de veículo pronto seria ideal a essa aplicação, considerando ainda a necessidade das adaptações e cálculo de centro de massa da estrutura do robô.

A instalação não é tão trabalhosa pelo fato de ser um equipamento móvel. Entretanto, como se trata de um equipamento grande e pesado como um guindaste, a instalação de sensores e outros componentes do sistema podem ser mais demoradas do que se o robô fosse menor, podendo até ser necessário que os técnicos precisem utilizar equipamentos de proteção individual para trabalhar em alturas. Mas, de qualquer forma, a praticidade de se instalar o equipamento na planta pode ser considerada "média/alta", levando em consideração que o sistema em questão é

móvel e passível de ser transportado para onde quiser.

Além disso, por ser móvel, o sistema pode ser levado para lugares com a maior quantidade de ferramentas possíveis para que seja possível realizar manutenções e atualizações do veículo ou braço robótico. Entretanto, quanto mais complexo for o sistema do ponto de vista mecânico ou elétrico, mais difícil de manter. Levando em consideração que o sistema seria dividido em dois grandes sistemas como a parte mecânica e a parte elétrica, passando muito trabalho para as equipes de manutenção do sistema. Portanto, a sua manutenção é pouco prática podendo ser considerada de grau baixo/médio.

Tabela 9 – Resumo da análise da Proposta 3: robô de braço articulado de longo alcance

CRITÉRIO(S)	PERGUNTA / GRAU	COMENTÁRIOS
<i>DE VIABILIDADE</i>		
	<i>É VIÁVEL?</i>	
1. TÉCNICA	Sim	Planejamento de trajetória é <i>expertise</i> do GPAR
<i>DE CUSTO</i>		
	<i>GRAU</i>	
2. COM SENSORES	Médio	1 sensor de longo alcance + 3 sensores de médio alcance
3. COM REDES	Baixo	Ampliação da rede industrial para poste de iluminação
4. COM OBRA CIVIL	Baixo	Algo a ser estudado mais a fundo já com as dimensões do veículo
5. COM SERV. MECÂNICOS	Alto	Compra/Ajustes de um veículo com as especificações e criação de peças exclusivas do robô
<i>DE PRATICIDADE</i>		
	<i>GRAU</i>	
6. INSTALAÇÃO	Médio/Alto	Não há instalação fixa, ou seja, pode ser transportado para qualquer lugar
7. MANUTENÇÃO	Médio	Veículo de grande porte. Muitas preventivas para dividir entre manutenção mecânica e elétrica.
<i>DIFICULDADE</i>		
	<i>GRAU</i>	
8. COMPLEXIDADE DO SISTEMA	Alto	Planejamento de trajetória e prevenção de colisão com obstáculos

Fonte: o autor.

Há de se analisar também a complexidade do sistema ao que se refere às técnicas de

controle para tornar o robô autônomo, transitando exatamente pelo percurso pré-programado via *software*, sem colidir com obstáculos pelo caminho. Esse tipo de sistema possui uma maior complexidade não só por conta das técnicas de controle em si, mas por ter a necessidade de resguardar a vida dos colaboradores e o patrimônio da empresa. Por isso, o sistema deve possuir mais sensores para que seja possível prever todas as formas de problemas que possam ocorrer, até se desligando em casos extremos e necessários.

3.3.2 *Sistemas aéreos*

A ideia primária no desenvolvimento de um sistema de aquisição de nuvem de pontos aérea foi tentar de alguma forma aproximar o sensor do material a ser escaneado e não interferir no trabalho da operação. Dessa forma, foi imaginado dois tipos de proposições para o problema em questão.

3.3.2.1 *Proposta 4: Varredura em sistema de roldanas*

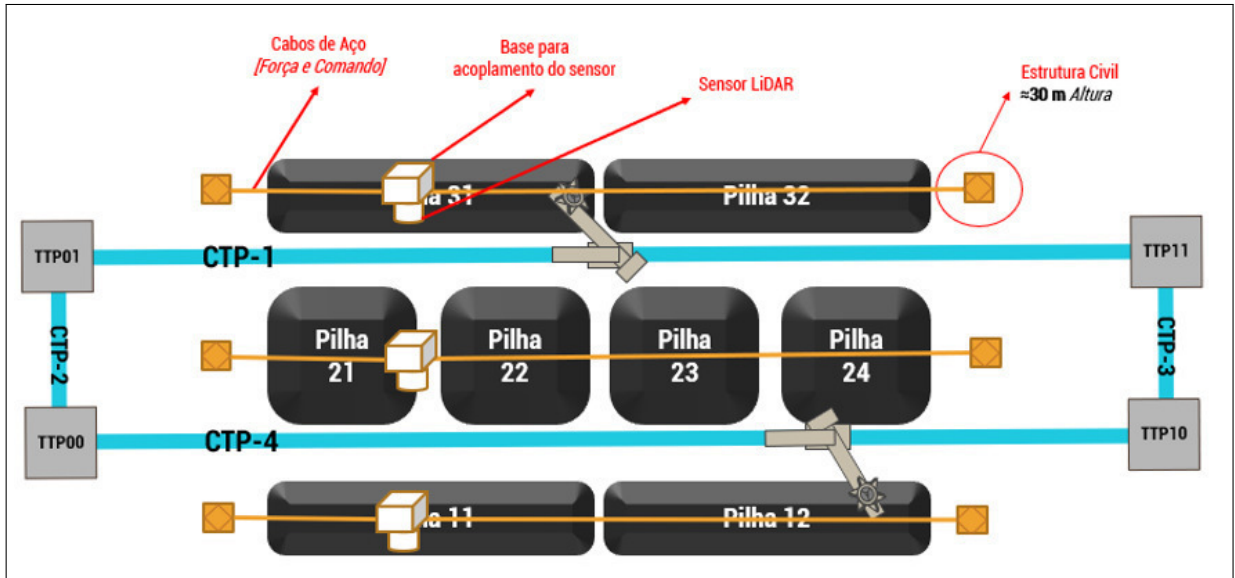
Esse sistema foi pensado para que fosse possível realizar o levantamento de dados em perspectiva aérea, utilizando infraestrutura civil como base, e infraestrutura mecânica como suporte para acoplamento do sensor. Na Figura 18 é possível verificar que, nesse sistema, seria possível realizar o escaneamento à laser, fazendo o sensor passar exatamente por cima das pilhas de carvão.

Como são três linhas de carvão, seriam três estruturas que cobririam essa região. Assim, como é possível observar na Figura 18, seria necessário a construção de seis torres em uma altura de aproximadamente quarenta metros (40m).

Este projeto é viável pois conseguiria cobrir todas as três grandes fileiras de carvão. O sensor ficaria a uma distância de dezoito metros de altura (18m) da pilha, evitando tanto uma possível colisão com a *Stacker&Reclaimer* quanto com as retroescavadeiras. O sensor a ser utilizado seria o LD-MRS da SICK, o qual possui um alcance de até cinquenta metros (50m) de distância em refletividade de 10%.

Assim, seriam utilizados três sensores LD-MRS da SICK para esta proposta. Pelo orçamento realizado, sabe-se que o custo unitário do sensor é de quarenta e um mil e duzentos e dez reais e trinta centavos (R\$41.210,30). Portanto, como pode ser visto na Tabela 12, o custo com sensores ficaria de aproximadamente cento e vinte três mil e seiscentos e trinta reais e noventa centavos (R\$123.630,90).

Figura 18 – Ilustração da vista superior do sistema de varredura de sensor acoplado em sistema de roldanas.



Fonte: o autor.

Tabela 10 – Custo dos sensores - Proposta 4: Sistema de Varredura em Roldanas

SENSOR	UNIDADES	VALOR UNID.	VALOR TOTAL
SICK LD-MRS400001S01	3	R\$41.210,30	R\$123.630,90

Fonte: o autor.

O custo com redes será relativamente caro, pois poderá ser necessário três antenas para funcionar como emissoras e mais três como receptoras. Totalizando um custo com seis antenas mais os custos de cabos de rede e conversores para conexão com o sistema de processamento de dados. Logo, pode-se dizer que o custo com a rede seria grau médio.

Além disso, as obras civis para esta proposta são caras. Como já mostrado na Figura 18, existem seis torres que servirão como a base do sistema. Existirá um alto custo, pois serão seis grandes estruturas de trinta metros de altura para suportar um cabo de aço de comprimento maior que quatrocentos e sessenta metros (460m) de fileira de pilhas de carvão e ainda o peso do sensor, que, comparado ao peso do cabo, torna-se ínfimo. Adicionalmente, por conta da altura da estrutura, é importante se considerar a contratação de um estudo para avaliação da necessidade da instalação de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA).

Os gastos com serviços mecânicos seriam bem expressivos, pois haveria a necessidade de criação do sistema de roldanas e do estudo de tensão mecânica das estruturas para dimensões de cabo de aço de quase meio quilômetro.

A instalação do sistema de roldanas não seria fácil e seria feita de forma fixa entre torres que estão a mais de quatrocentos e sessenta metros (460m) de distância. Logo não será um sistema que possua instalação prática. Além disso, será necessário instalar 6 antenas para que o sistema possa estabelecer comunicação de forma plena. Portanto, o grau de praticidade de instalação desse sistema pode ser considerado baixo.

Ademais, as manutenções das partes mecânicas do projeto seriam possíveis, mas a praticidade dependerá muito de qual parte do sistema será feito o trabalho. Se existirem peças únicas da parte mecânica a serem substituídas, seria necessário que a equipe de manutenção mecânica pudesse usinar as peças. Ou mesmo a substituição do cabo de aço, numa eventual ruptura, poderia custar bastante tempo. Normalmente, quando problemas mecânicos acontecem não são tão práticos de corrigir ou prevenir, como caso das manutenções preventivas. Por isso, pode-se considerar o grau de praticidade de atualizações e manutenção do sistema baixo/médio.

Por fim, é importante comentar sobre a complexidade do sistema. O sistema teria dois motores, sendo um em cada torre para controlar a posição do sensor. Além disso, a plataforma poderia rotacionar o sensor no eixo perpendicular ao cabo. Ademais, teria-se um controle de posição com dois graus de liberdade (2DOF, do inglês *degree of freedom*) do sensor, considerando que seria necessário saber a posição do sensor sobre a pilha de carvão e a sua altura relativa, tendo-se em vista que a corda poderia ficar balançando e causando interferência na referência de altura do sensor.

3.3.2.2 *Proposta 5: Sistema de Varredura em VANT industrial*

O sistema de varredura que utilizaria um VANT industrial foi pensado para se ter uma maior autonomia no escaneamento das pilhas de carvão sem depender necessariamente de alguma infraestrutura maior para que possa fazer o serviço.

Esse sistema seria capaz de realizar a varredura sobre as fileiras de pilha de carvão de forma altamente flexível. Sendo capaz de ser configurado a melhor trajetória para executar a atividade, da melhor maneira que a operação quiser. Além disso, apresentaria uma melhor velocidade de escaneamento visto que seria capaz de ir direto à região a ser escaneada sem passar por caminhos estritamente obrigatórios (como o caso de um carrinho sobre uma trilha), tendo em vista sua liberdade em três dimensões. Portanto, esta proposição é viável e implementável do ponto de vista técnico.

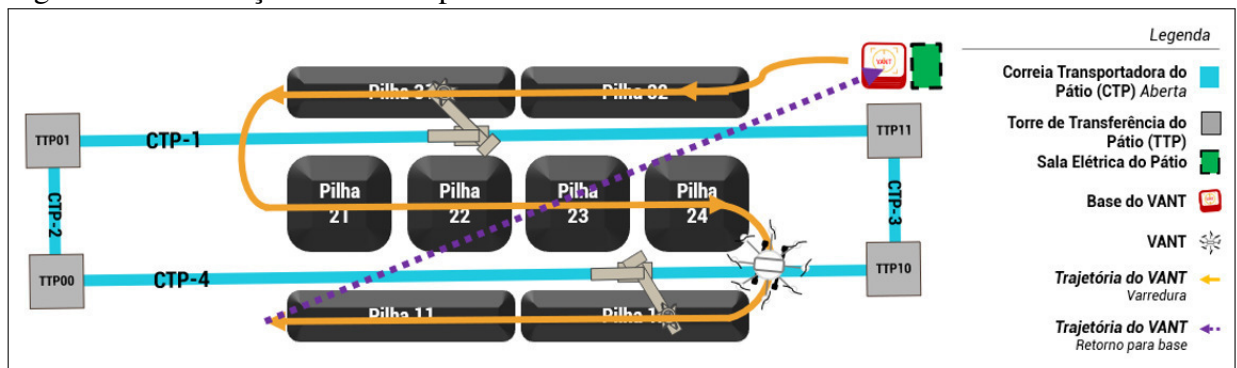
Do ponto de vista da quantidade de sensores, seria necessário apenas um sensor, pois

Tabela 11 – Resumo da análise da Proposta 4: Varredura em sistema de roldanas

CRITÉRIO(S)	PERGUNTA / GRAU	COMENTÁRIOS
DE VIABILIDADE		
	É VIÁVEL?	
1. TÉCNICA	Sim	Do ponto de vista da cobertura dos sensores, mas há necessidade de verificação quanto a parte mecânica do sistema.
DE CUSTO		
	GRAU	
2. COM SENSORES	Médio	3 sensores LD-MRS da SICK.
3. COM REDES	Médio	Instalação de 6 antenas.
4. COM OBRA CIVIL	Alto	Fundação de torres e estudo de aterramento.
5. COM SERV. MECÂNICOS	Alto	Estudo de tensões mecânica dos cabos de aço e desenvolvimento de sistema de roldanas.
DE PRATICIDADE		
	GRAU	
6. INSTALAÇÃO	Baixo	Instalação fixa.
7. MANUTENÇÃO	Baixo/Médio	Alterações de lógica de fácil acesso. Manutenções mecânicas e de instrumentação podem custar tempo expressivo.
DIFICULDADE		
	GRAU	
8. COMPLEXIDADE DO SISTEMA	Médio/Alto	Sistema mecânico e Controle 2DOF.

Fonte: o autor.

Figura 19 – Ilustração da vista superior do sistema de varredura em VANT industrial



Fonte: o autor.

o sistema de varredura funcionaria com um VANT. Será considerado outro como reserva, mas esse só será ativado em caso de manutenção do primeiro. Para este caso seria possível considerar

o modelo LD-MRS da SICK para a aplicação.

Tabela 12 – Custo dos sensores - Proposta 5: Sistema de Varredura em VANT industrial

SENSOR	UNIDADES	VALOR UNID.	VALOR TOTAL
SICK LD-MRS400001S01	1	R\$41.210,30	R\$41.210,30

Fonte: o autor.

Em relação ao custo com redes, não seria tão expressivo visto que o sistema de aquisição armazenaria a nuvem de pontos gerada e só repassaria para o sistema de processamento após regresso a base do VANT. Então, o servidor de aplicação processaria os pacotes de dados e já repassaria a informação gerada via cabeamento para a rede do sistema supervisorio e da rede corporativa na sala elétrica do pátio.

Não haveria necessidade de construir nada visto que o sistema seria totalmente móvel, mas seria necessário comprar e adaptar um pequeno *container* para ser utilizado como a base do VANT. Além da compra, seria necessário realizar algumas adaptações no *container* para ajustar às funcionalidades do sistema automático. Na Figura 20, em uma rápida busca na internet, é possível encontrar um *container* pequeno com preço de aproximadamente R\$6.950,00. Sendo a informação extraída de um site de vendas na internet e que o *container* a ser vendido é usado, pode-se estipular que o preço de um *container* novo seria 80% mais caro que o anunciado, podendo custar aproximadamente doze mil quinhentos e dez reais (R\$12.510,00) com as mesmas especificações.

Os custos da mecânica do sistema podem ser considerados baixos. Consistiria basicamente da compra do VANT industrial e da confecção de peças feitas em impressora 3D, que o GPAR já dispõe. Dentre várias opções disponíveis no mercado de VANT industrial, o que poderia ser escolhido para essa aplicação é o modelo MG-1S da DJI, que pode ser visto na Figura 21. Pois pelo fato de ser desenvolvido para aplicações em agronegócios, seu sistema é a prova de poeira e resistente a água, duas características primordiais para aplicação no pátio. Seu valor está orçado em aproximadamente quarenta e cinco mil reais (R\$45.000,0).

Em termos de praticidade com a instalação do sistema, seria simples. Precisaria de apenas uma ou duas pessoas participando para terminar em alguns minutos. Seria necessário uma primeira varredura para reconhecimento do espaço e posteriormente o seu posicionamento para iniciar a operação. Como se trata de um sistema móvel, não há necessidade de fixação da

Figura 20 – Container-escritório de 20 pés



Fonte: OLX (2018)

Figura 21 – Modelo de drone sugerido: DJI MG-1S



Fonte: <<https://goo.gl/qmvKM6>>

base em lugares específicos, podendo, por exemplo, mudar de lugar a qualquer momento que for necessário.

Em relação a praticidade de manter o sistema, seriam bem prático pois o sistema possuiria sua base de campo terrestre e os colaboradores poderiam ter acesso ao *drone* da

forma mais rápida possível, sem precisar subir escadas ou passar por algum tipo de obstáculo. Como o sistema é móvel e leve, pode ser transportado por um pessoa sem maiores dificuldades, podendo ser levado para ajuste em bancada, facilitando a comunicação entre os colaboradores da instrumentação, por exemplo, com os da automação e operação.

Por outro lado, a grande dificuldade do sistema seria com relação a sua complexidade. Pelo fato do sistema ser completamente móvel e aéreo, ele se torna uma excelente planta para controle de três graus de liberdade (3DOF, do inglês *degree of freedom (DOF)*). Esse tipo de controle é bem mais complexo, não só por conta do seu terceiro grau de liberdade mas também pelo fato de se considerar na malha de controle perturbações causadas pelos fortes ventos da localidade. Além disso, será necessário se considerar como parte da complexidade do sistema, técnicas de desvio de obstáculos, pois o VANT deverá perceber a presença das *Stacker&Reclaimers* e das retroescavadeiras que operam no pátio. Adicionalmente, seria necessário a aplicação de técnicas de seguimento de trajetória visto que o VANT seguiria uma trajetória pré-definida de acordo com a seleção das pilhas a serem escaneadas.

A aplicabilidade deste sistema depende de regulamentação de três órgãos, sendo esses Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). Cabe à ANAC tratar dos assuntos técnicos/operacionais voltados às condições das aeronaves (certificação, registro, cadastro, etc) e à situação dos pilotos (licenças, requisitos, cadastros, etc). Cabe ao DECEA tratar do acesso ao espaço aéreo. E cabe à ANATEL certificar os enlaces de comunicação.

Quanto à ANAC, deve ser respeitado o Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial n° 94 (ANAC, 2017), o qual estabelece que as RPAs Classe 3 (aeronaves com peso entre 250g e 25kg) que se destinam unicamente a operações VLOS (contato visual direto sem auxílio de lentes ou outros equipamentos) até 400 pés (121,92 metros) AGL (acima do nível do solo) não necessitam possuir qualquer certificado de aeronavegabilidade. O VANT proposto no sistema de monitoramento se enquadra nessas características, pois terá peso inferior a 25 kg, terá campo de visão com o operador remoto e não irá operar em altitude máxima próxima de 30 metros. Já o DECEA, prevê na seção 11.2.3 do documento ICA 100-40 (COMAER/MD, 2017) que espaços que possuem estruturas (no caso do pátio de carvão, chaminés, torres de iluminação, máquinas retomadoras e empilhadeiras, são exemplos) não são considerados espaço aéreo sob responsabilidade do DECEA, não sendo necessária autorização para voo. Pelo lado da ANATEL, os VANTs especificados no projeto já possuem certificação junto à agência.

Tabela 13 – Resumo da análise da Proposta 5: Sistema de varredura em VANT industrial

CRITÉRIO(S)	PERGUNTA / GRAU	COMENTÁRIOS
<i>DE VIABILIDADE</i>		
	<i>É VIÁVEL?</i>	
1. TÉCNICA	Sim	Consegue cobrir todo o pátio com somente um LiDAR em plataforma consolidada em diversas aplicações
<i>DE CUSTO</i>		
	<i>GRAU</i>	
2. COM SENSORES	Baixo	1 sensor LD-MRS da SICK.
3. COM REDES	Baixo	Base instalada ao lado da sala elétrica
4. COM OBRA CIVIL	Baixo	Custo da compra de <i>container</i> para utilizar como base e sua adaptação
5. COM SERV. MECÂNICOS	Baixo/Médio	Compra de VANT e uso de impressora 3D do GPAR e peças para drone e sua base
<i>DE PRATICIDADE</i>		
	<i>GRAU</i>	
6. INSTALAÇÃO	Alto	Sistema móvel e pequeno
7. MANUTENÇÃO	Altíssimo	Pode ser realizado em bancada
<i>DIFICULDADE</i>		
	<i>GRAU</i>	
8. COMPLEXIDADE DO SISTEMA	Alto	3DOF, Técnicas de seguimento de trajetória e desvio de obstáculos

Fonte: o autor.

4 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Com base nas análises feitas no Capítulo 3, dentre todas as proposições aquela considerada a melhor foi a quinta, que é relacionada ao sistema de varredura usando VANT industrial. Por isso, será discutido os motivos que desclassificam cada um das outras quatro propostas.

A primeira proposição não foi escolhida principalmente devido a três motivos. O primeiro motivo é o do custo com os sensores. Isso quer dizer que para o sistema coletar os dados de entrada e saída de carvão de forma minuciosa é necessário que vários sensores estejam espalhados pela planta, aumentando o custo com sensores. O segundo motivo é a baixa praticidade de manutenção do sistema, pois existirão cinco locais distintos e longe entre si que deverão ser zelados para que o sistema todo funcione. O terceiro motivo é relativo a sua viabilidade técnica no que se refere a varredura nas correias visto que muitas vezes o carvão é acompanhado com poças de água, que interferem diretamente no escaneamento do sensor, gerando a necessidade de estudos que possam comprovar a sua eficiência.

Após uma análise mais profunda, a segunda proposição tange o absurdo sendo considerada a de menor potencial entre todas. O motivo do absurdo é causado pelo seu alto custo com sensores e com obra civil. Os custos com sensores são os mais altos devido a necessidade de se utilizar sensores de ultra longo alcance, que uma única unidade chega a custar seiscentos mil reais (R\$600.000,00). Além disso, o alto custo com obra civil é devido a necessidade de se construir torres de cento e vinte metros (120m) de altura. A construção de torres como essa custam muito caro e não valeria a pena o investimento, já considerando os custos com os oito sensores.

A terceira proposição é a segunda melhor no que se refere aos critérios de praticidade. Entretanto, existem dois fatores que não tornam o investimento atrativo. O primeiro fator é que os custos com a parte mecânica do sistema serão caros. Para iniciar a pesquisa, por exemplo, seria necessário realizar um estudo para saber qual o melhor tipo de veículo seria melhor utilizar para o sistema, sendo que qualquer veículo escolhido para ser usado como base do sistema custará muito caro pois serão sempre veículos de grande porte. Comprar um guindaste ou um caminhão custará muito para o orçamento do projeto. O segundo fator é relacionado à segurança. Está sendo considerado esse fator, tendo-se em vista o tamanho do veículo do sistema e seu potencial destrutivo. Considerando, por exemplo, uma hipótese de uma falha no sistema automático durante o processo de detecção de obstáculos, a consequência desse erro do sistema, em seu pior

caso, poderia ser a morte de alguém ou a destruição do patrimônio da empresa. Por isso, será considerado esse fator na análise de escolha.

A quarta proposição foi desconsiderada por dois principais motivos. Levou-se em consideração que o custo geral do projeto seria alto por conta do sistema de roldanas e por conta da parte relativa às obras civis para construção das torres. Esse motivo de forma isolada já eliminou a quarta proposição, pois fez com que essa tivesse a segunda pior avaliação. Outro motivo seria a baixa avaliação na praticidade do sistema, que pelo fato de ser instalado entre torres, faz com que o acesso para manutenção seja mais difícil e demorado e ainda demanda um longo tempo e recusos humanos para a sua instalação.

A quinta proposição foi escolhida pelo fato de ser a de menor custo e a de maior praticidade. Apesar do VANT industrial possuir o segundo maior custo desta proposta, o fato de ter o menor custo com sensor compensa em comparação com os demais sistemas, como é possível ver na Tabela 14. Assim, é possível ainda observar que a diferença do custo da proposta 5 para a segunda mais barata poderia cobrir a compra de outro VANT industrial, que poderá ser utilizado como reserva, um *container* pequeno, para ser usado como base de campo, e ainda sobriaria dinheiro para ser alocado em demais custos do projeto.

Tabela 14 – Custo com sensores das propostas

	PROPOSIÇÃO	GRAU	VALOR TOTAL <i>melhor cenário</i>
	Sistema de varredura distribuído	Médio/Alto	R\$206.051,50
	Torres de Varredura	Altíssimo	R\$4.800.000,00
	Robô autônomo de braço articulável de longo alcance	Médio	R\$103.927,52
	Varredura em sistema de roldanas	Médio	R\$123.630,90
	Sistema de Varredura em VANT industrial	Baixo	R\$41.210,30

Fonte: o autor.

Sua manutenção pode ser feita em bancada, pelo fato do equipamento ser móvel e leve, e ainda possuiria fácil acesso para a equipe por ser no térreo e próximo da sala elétrica e do contêiner de equipamentos e ferramentas da manutenção elétrica. O preço de suas partes não são caros, pois são de pequena proporção. Além disso, seria possível realizar levantamentos diários do volume de carvão disponível no pátio para ser possível fazer o melhor controle possível do inventário. Apesar de menor custo e da melhor praticidade, possui um alto grau de complexidade na sua implementação, pois o desenvolvimento das técnicas para realização da proposição levará

muito mais tempo para ser desenvolvido. Entretanto, o tempo de pesquisa e desenvolvimento do projeto compensa a espera visto que o problema poderá ser solucionado com o menor custo e com a melhor praticidade para manutenção. Por isso, a proposta 5 é definitivamente a melhor.

5 TRABALHOS FUTUROS

A proposição de um sistema de automático de aquisição de dados para medição de volume de pilhas de carvão é o início de um grande quantidade de trabalhos que podem ser gerados. O seu desenvolvimento é um grande desafio que traz consigo muita pesquisa e estudo para compreensão dos problemas gerados nas etapas do projeto e formulação de algoritmos para implementação das técnicas de processamento.

Desse modo, é sugerido que os trabalhos possam ser segmentados em etapas, seguindo uma ordem cronológica de planejamento, tornando o projeto de pesquisa e desenvolvimento mais intuitivo e organizado.

Sugere-se que durante a primeira etapa do projeto sejam realizados testes de campo para avaliação de sensibilidade de diferentes sensores diante do carvão mineral em diferentes condições de umidade e iluminação. Esse trabalho será importantíssimo para que seja possível fazer um levantamento das limitações de alcance do sensor para definir com maior precisão a altura que o VANT deverá sobrevoar a pilha.

Uma segunda etapa do projeto é sugerido o estudo e desenvolvimento de um sistema baseado em VANT industrial para levantamento de curvas de superfícies irregulares em três dimensões (3D) que mapeiem o carvão estocado nas pilhas. Em paralelo, sugere-se o desenvolvimento de avançados algoritmos de controle para planejamento e seguimento de trajetórias.

Numa terceira etapa do projeto, sugere-se o desenvolvimento de um estudo para implementação de métodos numéricos para geração de nuvem de pontos através dos dados coletados pelo VANT e processamento automático para fins de cálculo do volume das superfícies geradas. Validação dos algoritmos desenvolvidos no sistema em escala reduzida.

E finalmente, o desenvolvimento da base de campo automatizada para alojar o VANT em local seguro e próximo ao pátio de carvão.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Aviação Civil. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial n° 94**. [S.l.], 2017.
- Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil: Fontes não-renováveis. Parte III - Carvão Mineral**. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008.
- Amann, M.-C.; Bosch, T. M.; Lescure, M.; Myllylae, R. A.; Rioux, M. Laser ranging: a critical review of unusual techniques for distance measurement. **Optical Engineering**, v. 40, jan. 2001.
- ARBACHE, F. S.; SANTOS, A. G.; CHRISTOPHE; MOREIRA, M.; SALLES, W. F. **Gestão de logística, distribuição e trade marketing**. 4. ed. Rio de Janeiro: FGV, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7185: Solo - determinação da massa específica aparente, “in situ”, com emprego do frasco de areia**. Rio de Janeiro, 2016.
- Batista, I. J. L.; Torrico, B.; Barroco, G. C. Controle preditivo epsac aplicado ao rastreamento de trajetória de robôs móveis. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE. Fortaleza, Brasil, 2013.
- Caliskan, F.; Hajjiev, C. Reconfigurable control of an uav against sensor/actuator failures. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, n. 9, p. 7–12, 2015.
- COMANDO DA AERONÁUTICA/MINISTÉRIO DA DEFESA. **Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro**. [S.l.], 2017.
- De Paula, A. R. **Controle Tolerante a Falhas Aplicado ao Modelo de um Robô Móvel com Restrições Não-holonômicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica: Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2015**. Brasília, 2015. v. 35.
- EL-RABBANY, A. **Introduction to GPS: The Global Positioning System**. 2. ed. [S.l.]: Artech House, 2006.
- ICTMS. **International Convention on Tonnage Measurement of Ships**. 1969. Disponível em: <http://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/Annexes/fish_fleet_esms_an1.pdf>.
- Karsidag & Alkan. Analysis of the accuracy of terrestrial laser scanning measurements. In: FIG WORKING WEEK 2012. Rome, Italy, 2012. p. 6–10.
- Lima, T. A.; Forte, M. D. N.; Nogueira, F. G.; Torrico, B. C.; De Paula, A. R. Trajectory tracking control of a mobile robot using lidar sensor for position and orientation estimation. In: PROCEEDING OF IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS. Curitiba, Brasil: INDUSCON, 2016.
- Liu, H.; Lib, D.; Zuoc, Z.; Zhongb, Y. Robust attitude control for quadrotors with input time delays. control engineering practice. **Control Engineering Practice**, v. 58, p. 142–149, 2017.
- Liu, Y.; S., R.; J., M.; P., S.; H., B.; F., A.; Zell, A. Robust nonlinear control approach to nontrivial maneuvers and obstacle avoidance for quadrotor uav under disturbances. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 98, p. 317–332, 2015.

LOBO, T. D. **Controle Adaptivo Auto-Ajustável para Controle de Trajetórias de um Robô Móvel com Rodas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica: Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

Mac, T. T.; Copot, C.; Keyser, R.; Ionescu, C. M. The development of an autonomous navigation system with optimal control of an uav in partly unknown indoor environment. **Mechatronics**, v. 49, p. 187–196, 2018.

MOURA, R. **Manual de Logística: armazenagem e distribuição física**. 3. ed. Brasília: IMAM, 1997.

OGAWA, M. **Controle Preditivo Aplicado ao Seguimento de Trajetória de Robô Móvel com Rodas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica: Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

OLX. **Container escritório**. 2018. Disponível em: <<https://ce.olx.com.br/fortaleza-e-regiao/agro-e-industria/outros-itens-para-agro-e-industria/container-escritorio-492148974?xtmc=container&xtnp=1&xtr=3>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

Pounds, P.; Mahony, R.; Corke, P. Modelling and control of a large quadrotor robot. **Control Engineering**, 2010.

Remondino, F.; Barazzetti, L.; Nex, F.; Scaioni, M.; Sarazzi, D. Uav photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNMANNED AERIAL VEHICLE IN GEOMATICS. Zurich, Switzerland, 2011.

RIEGL. **Operating Instructions VZ-2000i**. Germany, 2017. Disponível em: <http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VZ-2000i_Datasheet_2017-12-18_Preliminary.pdf>.

RIEGL. **Operating Instructions VZ-400i**. Germany, 2017. Disponível em: <http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VZ-400i_Datasheet_2017-12-18.pdf>.

Rocha, K. D.; Lima, T. A.; Forte, M. D. N.; Comberiate, M.; Nogueira, F. G.; Torrico, B. Trajectory tracking control of a tracked mobile robot. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE. Porto Alegre, Brasil, 2017.

SICK. **Operating Instructions LD-MRS**. Germany, 2017. Disponível em: <https://sick-saopaulo.data.continuum.net/media/docs/3/03/803/Operating_instructions_LD_MRS_3D_LiDAR_sensors_en_IM0032803.PDF>.

SICK. **Operating Instructions NAV245**. Germany, 2017. Disponível em: <https://sick-saopaulo.data.continuum.net/media/docs/1/31/331/Operating_instructions_NAV245_2D_laser_scanners_en_IM0062331.PDF>.

Siebert, S.; Teizer, J. A new approach to linear filtering and prediction problems. **Automation in construction, Elsevier**, v. 41, p. 1–14, 2014.

Siriba, D. N.; Matara, S. Improvement of volume estimation of stockpile of earthworks using a concave hull-footprint. **International Scientific Journal for Micro, Macro and Mezzo Geoinformation**, v. 5, p. 11–25, 2015.

Souza, R. L. S.; Forte, M. D. N.; Nogueira, F. G.; Torrico, B. Trajectory tracking control of a nonholonomic mobile robot with differential drive. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE ARGENCON. Buenos Aires, Argentina, 2016.

Vosselman, G.; Maas, H.-D. **Airborne and Terrestrial Laser Scanning**. [S.l.]: Whittles Publishing, 2010.

XIE, K.-C. **Structure and Reactivity of Coal**: A survey of selected chinese coals. 1. ed. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015.

Zhao, T. L. S.; Koch, A. H. B. Stockpile modelling using mobile laser scanner for quality grade control in stockpile management. In: 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL, AUTOMATION, ROBOTICS & VISION. Guangzhou, China, 2012.