

Sistema Aéreo de Volumetria Automática para controle de estoque de carvão mineral em termelétricas.

Italo C. Branco* Nadson T. Souza* Marcus D. Forte*
Judá T. Santos* Adriano R. Paula* Fabrício G. Nogueira*
Bismark C. Torrico* Wilkley B. Correia*

* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, CE, (e-mail: italorosse@gmail.com, nadson.tome@dee.ufc.br, davi2812@dee.ufc.br, juda.t.santos@gmail.com, rodrigues@dee.ufc.br, fnogueira@dee.ufc.br, bismark@dee.ufc.br e wilkley@dee.ufc.br).

Abstract: One of most challenging problems faced by coal-fired thermoelectric power plants is the execution of a reliable quantification of raw materials. Sharp deviations between measured and actual quantities directly impact the costs and safety of the electric power generation, totalling 75,000 t loss in a twelve-month period. As a solution to this issue, the article proposes the adoption of a aerial scanning system, capable of controlling this type of inventory. The development presents the proposed system and its physical and logical composition. In the results section, field experiments are described and their data discussed.

Resumo: Um desafio enfrentado pelas usinas termelétricas à carvão mineral é a realização de uma quantificação confiável de matéria-prima. Desvios acentuados entre as quantidades medidas e reais impactam diretamente no custo e na segurança da operação de geração de energia elétrica, podendo totalizar 75.000 t em perdas em um período de doze meses. Como solução para esta questão, o artigo propõe a adoção de um sistema aéreo que escaneia as pilhas de insumo e calcula o volume nelas estocado. O desenvolvimento apresenta o sistema proposto e sua composição física e lógica. Na seção de resultados, os experimentos de campo são descritos e seus dados discutidos.

Keywords: Aerial volumetry; inventory; coal; point cloud; LiDAR.

Palavras-chaves: Volumetria aérea; inventário; carvão; nuvem de pontos; LiDAR.

1. INTRODUÇÃO

Seja em uma termelétrica, siderúrgica, mineradora ou qualquer outro empreendimento que necessite do controle de estoque de materiais a granel, os movimentos de entrada e saída de produto precisam ser acompanhados e quantificados. De acordo com Siriba et al. (2015), esta ação permite tanto o monitoramento do volume estocado quanto o consumido ou vendido, ou seja, permite o acompanhamento do fluxo de material dentro do pátio de armazenamento. Considerando essa necessidade, é simples perceber que as medições de volume e de massa são intrínsecas ao controle de estoque de materiais e influenciam diretamente na saúde financeira e na eficiência operacional de inúmeros empreendimentos industriais ao redor de todo mundo.

Do ponto de vista funcional das usinas termelétricas movidas a carvão mineral, é imprescindível a precisão no que diz respeito à quantificação do estoque disponível. No caso particular da EDP Pecém, em um cenário típico onde duas unidades de geração estejam ativas e operando em carga nominal, a autonomia máxima oferecida pelo pátio de armazenamento de carvão é de sessenta e dois

dias corridos. Como o tempo médio entre a solicitação de carga de minério na mina e a descarga de navios no porto mais próximo é de sessenta dias, é possível deduzir que falhas na estimativa de consumo e atrasos na solicitação e entrega de matéria-prima causados por uma quantificação ineficiente podem levar a cenários operacionais críticos como solicitações indevidas de produto ou até a parada de geração, causada por completa falta de insumo.

Com esta problemática em mente, ao longo dos anos, várias metodologias para caracterização dimensional de grandes áreas foram propostas e, de uma forma geral, elas podem ser classificadas em duas categorias: *online* e *offline*.

A primeira categoria consiste nas medições em tempo real da vazão mássica de carvão que flui pelo processo. Dentre os instrumentos utilizados, a balança integradora é um dos mais difundidos pois gera resultados satisfatórios quando devidamente instalada e calibrada. Entretanto, pequenos erros de calibração, falhas na aquisição da velocidade linear do transportador, desvios em ajustes mecânicos do conjunto e variações na densidade de material podem injetar desvios significativos na estimativa da massa total desejada. Esses desvios podem ser ainda amplificados pelas características construtivas dos elementos de medição e a elevada quantidade de produto envolvido. Assim, faz-se

* Este material é baseado no projeto apoiado pela EDP Pecém por meio do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica da ANEEL PD-07267-0016/2018.

necessária a realização de calibrações constantes e uma manutenção preventiva assertiva.

Por outro lado, os métodos *offline* possuem como característica principal a existência de dois estágios distintos e consecutivos: a realização de ensaios no local de interesse e o processamento do conjunto de dados adquiridos nesses ensaios. Nesta categoria se enquadram desde os métodos clássicos como a taqueometria até os métodos baseados em sensores modernos como o posicionamento por meio de GPS, fotogrametria aérea e varredura a *laser* ou radar. Para o caso especial do *laser* e do radar, uma metodologia semelhante a proposta por Zhao et al. (2015) pode ser aplicada. Nesse contexto, o sensor é instalado em uma máquina móvel já existente - normalmente uma retomadora - que, ao transitar, permite o mapeamento gradativo da região desejada. Mesmo sendo uma alternativa viável, é interessante notar que, para uma leitura completa do local, a retomadora estará completamente indisponível para operação, cenário normalmente indesejável dada importância desse equipamento para o processo de manejo de minérios. Esse tipo de abordagem pode ser encontrada de forma comercial, como pode ser visto em Knudsen (2015) e Zhou (2020).

Para o trabalho em questão, adotou-se a seguinte arranjo: um sensor do tipo LiDAR (*Light Detection And Ranging*) acoplado a um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) para fazer a varredura do pátio de estocagem da EDP Pecém. Além do LiDAR, são utilizadas uma IMU (*Inertial Measurement Unit*) e um sistema GPS (*Global Positioning System*) para aquisição precisa de posicionamento geográfico e um computador embarcado de alta capacidade responsável pela fusão dos dados fornecidos por toda a instrumentação móvel. Ao final do ensaio, todas as informações serão automaticamente processadas e disponibilizadas por meio de um aplicativo simples e amigável, capaz de fornecer tanto informações diretas como o volume de carvão estocado (diretamente em tela ou em relatório padronizado) quanto *insights* operacionais como o perfil de consumo, por exemplo. Além dessas características, outros benefícios do sistema *offline* proposto são: planejamento inteligente na aquisição e consumo de matéria-prima, flexibilização de análise quando necessárias expansões, retrações ou alterações na distribuição física de material dentro do pátio de armazenagem, redução de custos de operação e preservação de recursos escassos e importantes do processo.

O conteúdo deste documento está organizado da seguinte forma: na seção 2 é feita uma descrição do sistema proposto, enfatizando o software e o hardware aplicado. Na seção 3, os resultados dos experimentos de campo são apresentados. Por fim, a seção 4 traz as considerações finais do estudo realizado, discutindo os pontos relevantes, vantagens, melhorias e ações futuras.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Descrição geral e composição do sistema

O SAVA (Sistema Aéreo de Volumetria Automática) é um sistema é composto por três subsistemas ou módulos: de aquisição de dados, de processamento de nuvens de pontos e de visualização de informações.

O módulo de aquisição de dados é composto basicamente por um veículo aéreo não tripulado, um sistema computacional embarcado e um sensor LiDAR. Esses componentes integrados são responsáveis pela captura do relevo das pilhas de carvão. O sensor LiDAR, que é um dispositivo capaz de medir distâncias até um objeto emitindo feixes de *laser* e processando a onda refletida, como afirma Amann et al. (2001), é um dos elementos chave para a captura da geometria das pilhas. Sua alta capacidade de mapeamento permite a obtenção de nuvens de pontos de alta densidade que reproduzem fielmente as mais tênues variações no terreno, mesmo na existência de interferências como poeira e gotículas de água suspensas no ar - SICK (2020). Além disso, testes práticos apontaram que o sensor capta com excelente precisão objetos que possuem baixa refletividade, como é o caso do carvão mineral. Para a aplicação em questão, foi empregado o sensor 3D modelo LD-MRS de fabricação SICK. Completando o aparato, foi desenvolvida uma interface gráfica dedicada que permite monitorar e comandar as "missões", termo esse aqui empregado como sinônimo para o "voo de coleta de dados".

De posse das informações adquiridas durante a missão, é iniciado o trabalho do módulo de processamento de nuvem de pontos: dados de mapeamento espacial e geográfico fornecidos pela IMU e GPS são utilizados para o referenciamento dos pontos captados pelo LiDAR. O sistema computacional embarcado (ASUS Tinker Board), utilizando-se de métodos matemáticos como os filtros de Kalman aplicados por Forte (2018) e as operações com quatérnions de Santos et al. (2019) é o responsável por integrar todas essas diferentes informações de campo em um único bloco de dados. Nesse sistema computacional foi empregada também a plataforma ROS (*Robot Operating System*), que oferece meios para estabelecer comunicação entre esses instrumentos e os outros equipamentos externos da aplicação. Em seguida, com a nuvem de pontos já referenciada, os dados são enviados a um computador que procederá com as rotinas necessárias para o tratamento da nuvem de pontos e o cálculo de volume.

Por fim, todos os dados adquiridos e calculados (de forma automática) durante o processo serão disponibilizados aos usuários por intermédio de um aplicativo *web*. Essa interface compõe o módulo final de visualização de informações.

As seções a seguir, descrevem com mais detalhes pontos importantes do sistema.

2.1.1 Monitoramento e comando do VANT

Mesmo existindo vários modelos de aeronave disponíveis no mercado, o quadricóptero Matrice 100 da DJI foi escolhido por oferecer suporte nativo para desenvolvimento de sistemas embarcados. Esse suporte simplifica a criação de algoritmos, tanto para o controle quanto para o monitoramento das missões, conferindo ao sistema a capacidade para ser completamente automático, respeitando as determinações do Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial número 94 (RBAC-E 94 - Requisitos Gerais para Aeronaves não Tripuladas de uso Civil) da ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) - ANAC (2017). Com isso em vista, foi desenvolvido um aplicativo de operação dedicado, que pode ser executado em um *tablet* ou

smartphone Android. Na Figura 1, mostra-se a tela do aplicativo.

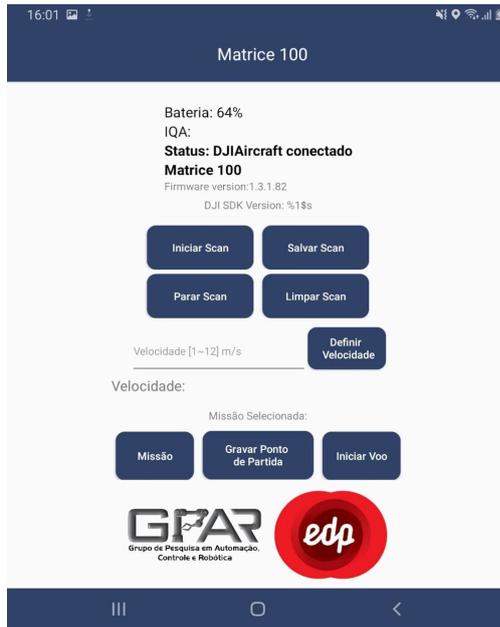


Figura 1. Aplicativo de operação - Android Mobile SDK.

2.1.2 Sistema integrado ROS

O ROS é um sistema amplamente utilizado em pesquisas que envolvem operação de robôs. Ele é composto por um conjunto de aplicativos simples que, quando integrados, permitem a realização de uma tarefa mais complexa. Dentre as diversas vantagens encontradas ao utilizar tal ferramenta, cita-se a vasta comunidade científica que fornece *softwares* para integração de diferentes equipamentos (sensores, atuadores e veículos) de forma gratuita. Outra grande vantagem é a facilidade na criação de códigos personalizados para atender uma necessidade específica, podendo estes serem escritos em C++ ou Python. Outro importante motivador é a existência de pacotes de integração para tanto para o quadricóptero quanto para o sensor LiDAR empregado.

Uma aplicação desenvolvida em ROS é caracterizada pela estrutura de comunicação entre os programas ou serviços (chamados de nós) que compõem o aplicativo. Esta estrutura segue o modelo *publish-subscribe* onde, de acordo com Couloris et al. (2012), *publishers* publicam eventos estruturados em um servidor de eventos (*broker*) para que *subscribers* possam subscrever e consumir os dados disponíveis nesses eventos. Para o caso em estudo, existem diversos nós sendo executados para aquisição e tratamento das informações coletadas das pilhas de carvão. Na Figura 2, vê-se a estrutura de nós utilizados na aquisição de nuvem de pontos. Na figura, é possível perceber que os dados de telemetria são fornecidos pelo nó criado pelo VANT (/dji_sdk). Aplicando uma transformação equirretangular (/tf) na latitude e longitude recebida, são calculadas as distâncias (x, y e z) em metros entre o ponto medido e o ponto de referência selecionado.

2.1.3 Segmentação da nuvem de pontos

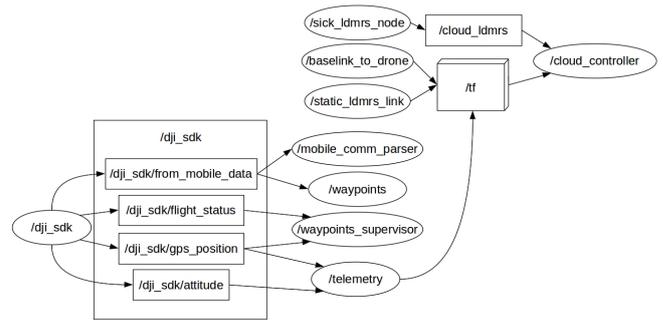


Figura 2. Exemplo de estrutura do ROS aplicada na aquisição da nuvem de pontos.

De posse da nuvem de pontos fornecida pelo módulo de aquisição, ocorre uma etapa chamada de segmentação, onde apenas a superfície de interesse é selecionada. A nuvem de pontos coletada, em seu estado original, contém maquinário e estruturas diversas que não pertencem a região de interesse e por esse motivo devem ser excluídas do cálculo do volume. Utilizando informações como o nível de referência do solo e pontos fixos selecionados no local (trilhos, torres, etc), são aplicados filtros que detectam objetos estranhos, a base e o solo ao redor das pilhas. Com isso, apenas os pontos que fazem parte das pilhas são considerados para o cálculo do volume. Para esta tarefa, além dos códigos Python que estão sendo desenvolvidos, o pacote PPTK (*Point Processing Toolkit*) está sendo empregado.

2.1.4 Cálculo de Volume

Mesmo possuindo a nuvem de pontos que representa um determinado objeto, reconstruir este de forma digital não é uma tarefa trivial. De acordo com Remondino (2004), a nuvem da aplicação proposta pode ser classificada como uma nuvem de pontos desorganizada pois os pontos adquiridos possuem consigo apenas a informação espacial, sem qualquer definição sobre a geometria do objeto a ser reconstruído. Considerando esta característica o algoritmo *alpha shapes* foi escolhido. De acordo com Edelsbrunner et al. (1983) e ratificado por Edelsbrunner and Mucke (1994), um *alpha shape* de um dado conjunto de pontos é um subconjunto obtido a partir da triangulação de Delaunay, onde dois pontos são ligados apenas se existir uma circunferência (ou bola) vazia de raio $1/\alpha$ que toque esses pontos, onde α é um parâmetro de ajuste arbitrário. Aplicando esse princípio em toda a nuvem coletada pelo LiDAR e interligando os pontos resultantes, obtém-se uma malha formada por pequenos tetraedros bem definidos, permitindo assim que seja possível calcular individualmente seus volumes. Somando os volumes de todos os tetraedros, obtém-se o volume total do objeto representado por esta nuvem de pontos.

É interessante notar como variações de α impactam o valor final do volume: maiores valores de α (ou seja, bolas com um maior raio) fazem com que a malha se torne menos densa, acarretando em perda de detalhes da superfície do objeto e tornando o volume final estimado maior do que o volume real. Por outro lado, adotando pequenos valores para o parâmetro é obtida uma malha de maior densidade e riqueza de detalhes, o que tende a aproximar o valor

estimado e o real. Contudo, mesmo sendo esta segunda situação altamente desejável, ela envolve a resolução de um cálculo mais complexo que pode incorrer em um custo computacional elevado. Sendo assim, é necessário definir o valor de α de acordo com a aplicação, levando em consideração as dimensões do objeto, a densidade de pontos coletada e o máximo erro admissível na estimativa.

2.2 Etapas do Processo

O processo de aquisição dados e cálculo de volume, mesmo dispondo de equipamentos modernos e cálculos avançados, possui uma filosofia simples e intuitiva que consiste no seguimento de cinco etapas principais, como ilustrado pela Figura 3. É interessante notar que, mesmo com o processo de varredura ocorrendo de forma totalmente automatizada, podendo inclusive ser completamente autônomo, a presença do operador é essencial para garantir a segurança de pessoas e dispositivos caso ocorram situações de risco durante o processo. Nesse contexto, a intervenção humana sempre será possível e pode retomar o controle com rapidez sempre que for necessário, de acordo com normas vigentes.

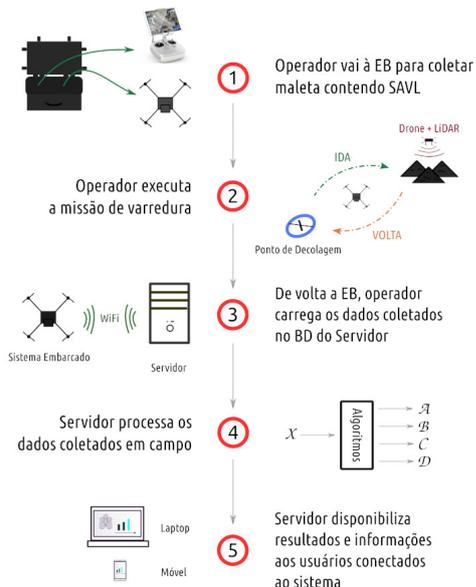


Figura 3. Etapas da missão de volumetria aérea.

A primeira etapa do processo inicia quando o supervisor de operação solicita ao operador de campo a realização de varredura para atualização do inventário. Com a ordem de serviço, o operador segue até a estação base (EB) para a coleta do Sistema Aéreo de Varredura a Laser (SAVL).

Na segunda etapa, o operador transporta o sistema até o ponto pré-estabelecido de decolagem. No ponto de decolagem, o operador liga o SAVL e inicia o aplicativo de operação do sistema. Após estabelecida conexão entre a interface de operação (que trabalha em conjunto com o controle remoto do VANT) e o sistema embarcado, o conjunto está pronto receber o comando de início de varredura. Como pode ser visto na Figura 4, para o momento, a interface do sistema de operação permite a seleção de três missões distintas para realização de sobrevoo automático. Com a seleção da missão, são carregados os parâmetros georreferenciados do pátio de carvão.

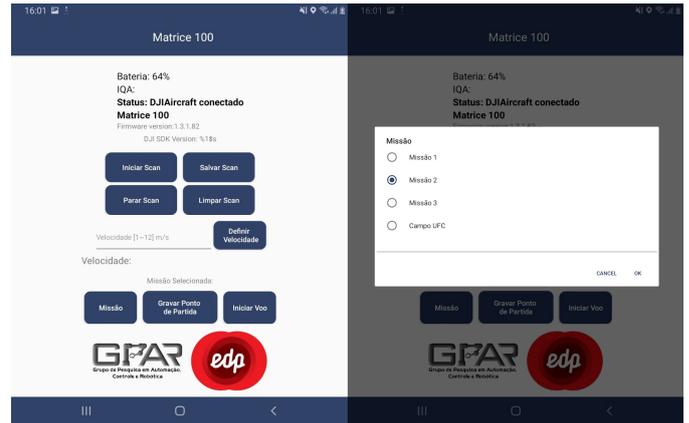


Figura 4. Interface do sistema de operação.

O voo é iniciado uma vez que o botão “Iniciar Voo” é pressionado. Após execução da varredura, o drone retorna automaticamente ao ponto de partida e realiza o pouso. É interessante notar a existência dos botões “Iniciar Scan” e “Salvar Scan”: o SAVL foi concebido para iniciar automaticamente a gravação das varreduras assim que o SAVL atinge o primeiro *waypoint* (ponto virtual para orientação da aeronave) da missão e finalizá-la quando este atinge o último. A presença dos botões flexibiliza esse conceito, permitindo que as varreduras também sejam feitas de forma manual caso necessário. Este recurso é especialmente interessante quando deseja-se avaliar uma área mais específica.

A terceira etapa consiste no carregamento dos dados coletados em campo. O operador retorna o SAVL à EB e o conecta ao servidor de processamento através de conexão sem fios, guardando os dados coletados no banco de dados do servidor.

Ao término do carregamento dos dados, a quarta etapa se inicia com o pré-processamento da nuvem de pontos e organização dos metadados da missão. A nuvem de pontos é pré-processada através da segmentação e depois os algoritmos de cálculo de superfície são aplicados para o cálculo do volume. Junto das informações de distância e telemetria, os dados de voo também são coletados. Isso permite que seja realizada uma análise com viés de manutenção, embasada nos dados e falhas que ocorram durante a utilização do sistema.

A quinta e última etapa acontece com o término do processamento e aprovação da informação adquirida na missão. Ao final do processamento, as informações geradas podem ser acessadas através de uma página web no formato de *dashboard*, onde operador e supervisor possuem acesso para analisar tanto a missão recentemente concluída quanto as missões historiadas. Nessa plataforma, o supervisor poderá analisar os dados obtidos e aprovar ou rejeitar a missão. Caso sejam identificadas inconsistências nos resultados (diferença elevada entre volumes estimados em missões consecutivas, varredura realizada durante variações abruptas em condições climáticas, etc), o supervisor poderá solicitar a reparamentização do pré-processamento ou a realização de uma nova missão de varredura. Sendo as informações aprovadas, o volume calculado será processado e o relatório da missão poderá ser gerado. Assim, todas as informações necessárias para o controle preciso do estoque de carvão

mineral estão disponíveis para os usuários. De uma forma geral, todas as partes estão em avançado estágio de desenvolvimento, com excessão do aplicativo *web*.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

De posse de todos os equipamentos e aplicativos devidamente testados, tanto em laboratório quanto em ambientes controlados, ensaios de campo começaram a ser realizados no pátio de operações da EDP Pecém. Como medida de verificação da assertividade dos trabalhos e metodologias empregadas, decidiu-se comparar os dados coletados pelo sistema proposto com os resultados fornecidos pela solução de medição aplicada no local: a fotogrametria aérea. Uma empresa especializada emite mensalmente um relatório com as informações de volume do pátio de carvão. Considerando esta prática, é importante garantir que ambos ensaios (fotogrametria de referência e varredura por LiDAR) sejam realizados com o menor intervalo de separação possível para que assim seja reduzida a possibilidade de alteração da geometria das pilhas e consequente alteração de volume. Seguindo esta linha, até o momento, três ensaios foram realizados.

No primeiro ensaio, existia uma preocupação da equipe de projeto quanto a capacidade do sensor LiDAR em detectar o carvão mineral: como o sensor utiliza pulsos luminosos para detectar distância, é natural que exista uma dependência entre a qualidade da medida realizada e a refletividade do material. Para a aplicação em questão, essa relação era extremamente preocupante dado fato que o carvão mineral é um material de baixa refletividade. A nuvem de pontos resultante é apresentada pela Figura 5. Pela imagem, percebe-se que a captura do material foi bem sucedida, indicando que o sensor escolhido atende perfeitamente a necessidade. Porém, falhas são identificadas nas laterais e na base da pilha. Essas falhas indicam claramente que a estratégia de passada única pelo centro da pilha (abordagem inicial para execução da varredura) não garantiu uma cobertura completa da região de análise e que varreduras extras deveriam ser realizadas. Mesmo com estas falhas na nuvem foi possível completar a imagem com escaneamento manual e estimar o volume da pilha, que mediu 60.387 m^3 com $\alpha = 1,5$. Nesse momento, o ajuste dos pontos foi realizado de forma também manual e o cálculo contou com o auxílio do Matlab (função *alphaShape*). O volume medido pela fotogrametria totalizou 64.717 m^3 .

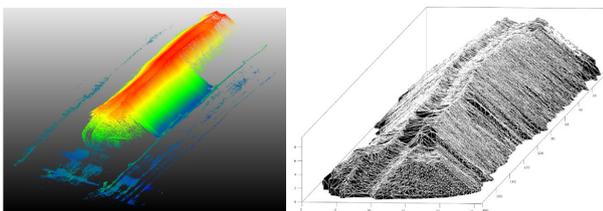


Figura 5. Ensaio de refletividade do carvão (esquerda) e fechamento de superfície para cálculo de volume (direita).

Na sequência, além de melhorias nas rotinas de controle do VANT e na captura da nuvem de pontos, um segundo ensaio foi realizado com o objetivo de testar os algoritmos de identificação de máquinas, detecção de solo, delimitação

de pilhas e estudar o valor mais adequado de α para o processo. O resultado deste é apresentado na Figura 6. Na figura 6a, é possível perceber que uma das máquinas de pátio, no caso uma retomadora, foi completamente identificada e será “excluída” para que não seja considerada como parte da pilha. De forma semelhante, as figuras 6b e 6c mostram respectivamente que tanto o solo em volta da pilha (área cinza) quanto a própria base desta (contorno azul) também foi identificada automaticamente com sucesso.

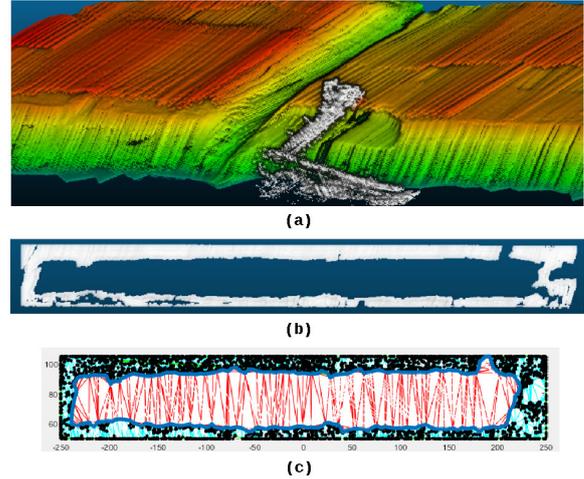


Figura 6. Filtragem de máquinas (a), detecção de solo (b) e delimitação de base de pilha (c).

Para o cálculo do volume, aplicou-se então o algoritmo de *alpha shapes*, que está em desenvolvimento (Python), sobre a nuvem de pontos segmentada. O resultado é mostrado na Tabela 1. Como comentado anteriormente e ratificado pelos resultados da tabela, variações em α causaram grandes variações no volume estimado pelo cálculo. A tabela também apresenta a diferença percentual entre o volume estimado e o volume de referência, que foi de 105.749 m^3 .

Tabela 1. Volume da pilha em m^3

Alfa	Volume	Diferença
10	101.816,58	3,72%
9	101.577,55	3,94%
8	101.341,20	4,17%
7	101.093,27	4,40%
6	98.120,09	7,21%
5	82.390,37	22,09%

Outra questão de extrema relevância era a definição da melhor relação autonomia x velocidade da aeronave x qualidade da nuvem de pontos. Esse questionamento influencia diretamente nos aspectos financeiros e técnicos do projeto, como a especificações de sensores e aquisição de baterias por exemplo. Dessa forma, um novo ensaio com diferentes varreduras foi realizado. O objetivo era comparar o comportamento dos parâmetros de voo em cada uma das varredura e definir a melhor estratégia de aquisição de dados. Os resumo dos dados é mostrado na Tabela 2.

Verificando a tabela é possível perceber que a altura e velocidade do voo impactaram diretamente na quantidade de pontos coletada. Menores velocidades e altitudes proporcionam uma melhor qualidade da nuvem pois mais pontos são coletados. Porém, velocidades mais baixas levam

Tabela 2. Dados do ensaio de autonomia

Varredura	Velocidade voo [m/s]	Altura voo [m]	Duração voo [mm:ss]	Gasto bateria [%]	Pontos coletados
1	8	30	03:35	30	831.049
2	8	25	03:35	27	996.753
3	4	30	05:30	33	1.585.226
4	4	25	05:35	37	1.845.923
5	8	30	03:35	23	1.046.944
6	8	25	03:35	23	1.138.555
7	4	30	05:30	35	1.502.602
8	4	25	05:33	32	1.630.089
9	6	27,5	04:14	27	1.712.939
10	10	30	03:17	25	717.408
11	10	30	03:07	26	925.904

a tempos de voo mais longos, implicando na aquisição de mais baterias ou baterias maiores e mais pesadas, elevando assim o custo total do conjunto. Por simplicidade, a variação de frequência do LiDAR foi suprimida e a velocidade média do vento do local é de 6 m/s, de acordo com ANEEL (2005).

Para o cálculo do volume foram aplicados os dados da varredura 9. Essa varredura apresentou excelente compromisso entre qualidade e consumo de bateria, capturando perfeitamente o topo e as bordas da pilha avaliada. O volume estimado foi de 50.936 m³ ($\alpha = 10$), 3,91% menor que a referência (53.007 m³).

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia utilizando varreduras aéreas que permitirão que o controle de estoque de minérios em pátios a céu aberto, carvão mineral no caso, seja realizado de forma automatizada e escalável. Para usinas termelétricas, como a UTE Pecém, este tipo de aplicação oferecerá meios para otimizar o planejamento de aquisição e uso de insumo, elevando assim a segurança da operação de geração de energia elétrica ao mesmo tempo que reduz o impacto ambiental e incrementa a lucratividade do negócio. Os resultados obtidos até o momento demonstram a qualidade das nuvens de pontos capturadas e os avanços no cálculo do volume, mas um erro médio de 4% gerará uma distorção acentuada no fechamento de inventário e isso aponta claramente que a plataforma carece de cuidados na aquisição de dados, fusão sensorial e apresentação de resultados para usuários finais. Melhorias nas rotinas de controle de voo e cálculo de volume, a adoção de um computador de bordo mais poderoso e a inclusão de um sistema RTK (*Real Time Kinematic*) são medidas a serem implementadas para reduzir esse erro. Mesmo assim, o SAVA é um sistema facilmente replicável, bastando basicamente dois equipamentos - um VANT e um sensor LiDAR - para realização de coleta dos dados. Uma vez que a mesma instrumentação seja utilizada e os devidos ajustes realizados, é possível estender a solução proposta para quantificar qualquer tipo de sólido a granel, independente deste ser aplicado como matéria-prima ou rejeito.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Fundação Cearense de Apoio ao

Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap), pelo apoio durante o projeto. À EDP Energia Pecém e ao programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica da ANEEL por todo apoio recebido durante a elaboração e execução do projeto PD-07267-0016/2018.

REFERÊNCIAS

- Amann, M., Bosh, T., Myllylae, M.L.R., and Rioux, M. (2001). Laser ranging: a critical review of unusual techniques for distance measurement. *Optical Engineering*, 40.
- ANAC (2017). Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil. URL <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94>.
- ANEEL (2005). *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. Agência Nacional de Energia Elétrica.
- Coulouris, G., Dollimore, J., Kindberg, T., and Blair, G. (2012). *Distributed Systems Concepts and Design*. Pearson Education.
- Edelsbrunner, H., Kirkpatrick, D., and Seidel, R. (1983). On the shape of a set of points in the plane. *IEEE Transactions on Information Theory*, 29, 551–559.
- Edelsbrunner, H. and Mücke, E. (1994). Three-dimensional alpha shapes. *ACM Trans Graph*, 13, 43–72.
- Forte, M. (2018). *Reference Trajectory Tracking Control of a Nonholonomic Mobile Robot with Inertial Sensor Fusion*. Master's thesis, Universidade Federal do Ceará.
- Knudsen, O. (2015). Lidar - lowering cost per tonnes in dry bulk business. *LiDAR News Magazine*, 5. URL http://lidarmag.com/wp-content/uploads/PDF/LiDARNewsMagazine_Knudsen-LoweringCostInDryBulk_Vol15No2.pdf.
- Remondino, F. (2004). From point cloud to surface: The modeling and visualization problem. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34.
- Santos, J., Forte, M., Paula, A., Souza, N., Lima, T., Prudêncio, M., Branco, I., Nogueira, F., Torrico, B., and Correia, W. (2019). Desenvolvimento de instrumentação para geração de nuvens de pontos usando sensores inerciais e lidar. *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*.
- SICK (2020). 3d lidar sensors ld-mrs. URL <https://www.sick.com/ag/en/detection-and-ranging-solutions/3d-lidar-sensors/ld-mrs/c/g91913>.
- Siriba, D., Matara, S., and S.Musyoka (2015). Improvement of volume estimation of stockpile of earthworks using a concave hull-footprint. *International Scientific Journal for Micro, Macro and Mezzo Geoinformation*, 5, 11–25.
- Zhao, S., Lu, T., B.Koch, and Hurdsmann, A. (2015). Automatic quality estimation in blending using a 3d stockpile management model. *Advanced Engineering Informatics*, 29, 680–695.
- Zhou, V. (2020). Lase technology optimises stacker reclaimer operations. URL <https://www.australianmining.com.au/features/lase-technology-optimises-stacker-reclaimer-operations/>.