

Comando de Direção de Antenas de Rádio para Teleoperação de Robô Móvel

Álvaro Rodrigues Araújo* Gilmar P. C. Júnior*
David Simon Marques* Victor R. F. Miranda*
Adriano M. C. Rezende* Paulo H. T. F. Alves[‡] Héctor Azpúrua^{†,‡}
Gustavo Pessin[‡] Gustavo Freitas*

* *Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais*
[†] *Dept. Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais*
[‡] *Instituto Tecnológico Vale*
(*ara1557, gilmarpcjunior, davidsimon, gustavomfreitas*)@ufmg.br;
paulo.alves@pq.itv.org; (hector.azpurua, gustavo.pessin)@itv.org

Abstract: The EspeleoRobô is a teleoperated mobile robotic platform employed by the mining company Vale S.A. to explore confined environments. During inspection operations, it is common for the robot to encounter adversities, including loss of connection with the control base. This article focuses on the robotic device communication system, describing communication problems via radio signal and introducing signal strength decay models. Furthermore, we present command strategies for orienting directional antennas installed in a Pan-Tilt-Unit, so that the antennas are always pointing in the direction of the EspeleoRobô. To this end, two command strategies are investigated, one based on the robot's pose and the other using image processing. Simulations and field experiments help to verify the command strategies, demonstrating the proposed solution feasibility in improving data transmission between the mobile robot and the command base.

Resumo: O EspeleoRobô é uma plataforma robótica móvel teleoperada utilizada pela mineradora Vale para a exploração de ambientes confinados. Durante operações de inspeções, é comum o robô se deparar com adversidades incluindo a perda da conexão com a base de controle. Este artigo tem como foco o sistema de comunicação do dispositivo robótico, descrevendo problemas de comunicação via sinal de rádio e introduzindo modelos de decaimento de intensidade de sinal. Além disso, são apresentadas estratégias de comando de orientação de antenas direcionais, instaladas num mecanismo *Pan-Tilt* de forma que as antenas estejam sempre apontando na direção do EspeleoRobô. Para tal, são investigadas duas estratégias de comando do mecanismo, uma baseada na pose do robô, e outra por processamento de imagens. As estratégias são verificadas por meio de simulações e experimentos de campo, demonstrando a viabilidade da solução proposta ao melhorar a transmissão de dados entre robô móvel e base de comando.

Keywords: Mobile Robots; Service Robots; Radio Communication; Pan-Tilt-Unit Command.

Palavras-chaves: Robôs Móveis; Robôs de Serviço; Comunicação via Rádio; Comando de Mecanismo *Pan-Tilt*.

1. INTRODUÇÃO

A robótica móvel vem evoluído de maneira rápida, se tornado cada vez mais parte necessária na automação e assistência de diversos tipos de processos. Exemplos de aplicação podem ser observados nas áreas de transporte (Hichri et al., 2014), organização de estoques (Paolanti et al., 2017), exploração (Lidoris et al., 2009), e inspeção (Nunes et al., 2020).

No caso de robôs teleoperados, a comunicação com a base de controle é de fundamental importância para o êxito de uma tarefa. A quantidade de dados transmitidos entre dispositivos muitas vezes é grande, por exemplo quando existem câmeras acopladas ao robô, sendo essencial se atentar à banda de transmissão necessária.

Para a comunicação via rádio, um ponto de atenção consiste em entender como as antenas posicionadas no robô e na base de controle realizam a irradiação de ondas, a fim de estimar locais do ambiente com melhor comunicação. No entanto, a geografia do ambiente explorado pode influenciar na comunicação, já que paredes e outros tipos de obstáculos causam reflexão e atenuação das ondas de rádio. Um estudo detalhado de um sistema de comunicação adaptativo usando sinais direcionados e múltiplos pontos de acesso para ampliar o sinal é proposto em (Gil et al., 2015).

Sendo assim, as considerações necessárias ao se projetar uma rede de comunicação via rádio que trabalha com dispositivos móveis são: (i) a topografia do ambiente e a disposição de localizações vantajosas para a irradiação das ondas, (ii) a distribuição dos dispositivos móveis

que precisam receber o sinal, e (iii) as especificações de performance necessárias para uma comunicação adequada (Sherali et al., 1996).

Um exemplo de robô de serviço teleoperado é o EspeleoRobô, um dispositivo robótico desenvolvido em parceria entre o Instituto Tecnológico Vale (ITV) e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) para realizar a inspeção de ambientes confinados, cavidades naturais, galerias de barragens, drenos e moinhos de bolas. (Cota et al., 2017; Azpuru et al., 2019). A comunicação com o EspeleoRobô pode ser realizada por meio de um sistema de cabo umbilical, conforme ilustrado na Figura 1, ou via rádio.

Em operações com o uso de cabos, existe o risco de ficar preso ou até mesmo ser danificado. Além disso, o cabo gera uma força de arrasto que aumenta conforme a distância entre o robô e base de controle (Martz et al., 2020), que pode afetar a mobilidade e a carga máxima que o robô consegue carregar. Empregando comunicação sem fio (Huang et al., 2019), é comum a perda de conexão entre a base de controle e o robô. Nesse caso, como uma forma de auxiliar o operador do EspeleoRobô, um sistema de alertas presente na GUI (*Graphical User Interface*) permite ao operador acompanhar o nível de intensidade da conexão de rádio entre o robô e a base de controle, conforme ilustrado na Figura 2 (Amaral et al., 2020).



Figura 1. EspeleoRobô sendo operado via cabo durante a inspeção de um ambiente confinado.

Outra possível forma de atenuar o problema consiste na utilização de equipamentos de comunicação com maiores ganhos de transmissão, incluindo antenas direcionais na base de controle. Neste caso, estas antenas devem estar sempre apontando na direção do robô móvel.

Esse artigo apresenta estratégias de comando de orientação de antenas direcionais, instaladas num mecanismo *Pan-Tilt*, de forma que a direção das antenas acompanhe a movimentação do EspeleoRobô. Para tal, são investigadas duas estratégias de comando do mecanismo, uma baseada na pose do robô, e outra por processamento de imagens. As estratégias são verificadas por meio de simulações e experimentos de campo, demonstrando a viabilidade da solução proposta ao melhorar a transmissão de dados entre robô móvel e base de comando.

O restante do artigo está organizado na seguinte forma: Na Seção 2 é apresentada uma descrição do EspeleoRobô

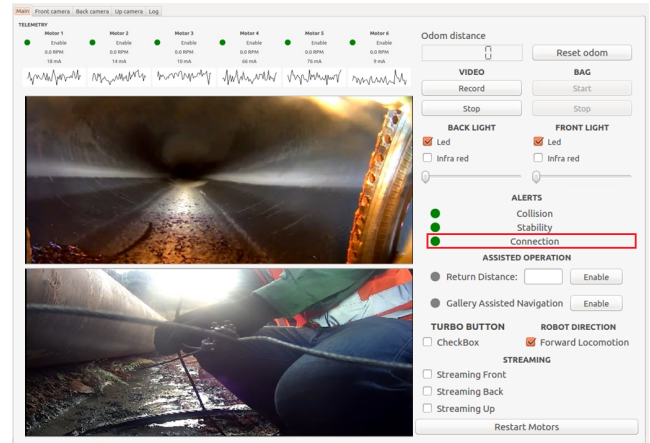


Figura 2. Interface gráfica de usuário do EspeleoRobô, incluindo alerta de perda de conexão.

e os equipamentos embarcados. Já a Seção 3 descreve os problemas a sistemas de comunicação via rádio. A Seção 4 apresenta as estratégias de comando propostas para a alteração da orientação das antenas direcionais. Na Seção 5 são comentadas as simulações e experimentos em campo para a validação das estratégias de comando de direção. Por fim, a Seção 6 destaca as conclusões e propõe trabalhos futuros.

2. PLATAFORMA ROBÓTICA E SISTEMA DE COMUNICAÇÃO

O EspeleoRobô é um dispositivo robótico de serviço, desenvolvido para explorar cavidades naturais e outros ambientes confinados. O robô está equipado com seis conjuntos de engrenagens de redução planetária e motores MCD EPOS da *Maxon Motors*, baterias militares de alta densidade da *Ben-Tronics*, um par de câmeras HD Axis-P12 e um computador mini PC Intel Nuc Core I5 rodando ROS com Ubuntu 16.04.

Para estimar a pose do robô e mapear o ambiente ao redor, são utilizados um laser OusterOS1-16, câmeras Intel RealSense Depth e Tracking, e uma IMU (*Inertial Measurement Unit*) Xsens MTi-G-710.

O modelo dos rádios utilizados para a conexão é o AIR Rocket M900 da Ubiquiti, que emite ondas na frequência de 900MHz. A escolha do modelo foi baseada em estudos realizados, mas limitada pelo fato dos rádios comerciais disponíveis operarem apenas nas faixas de 2,2GHz e 900MHz. Dentre essas duas frequências, a segunda era mais apropriada para transmissão de sinais de rádio em cavidades espeleológicas.

Este modelo de rádio possui tecnologia MIMO (em inglês *Multiple Input Multiple Output*), utilizando várias antenas para transmitir dados em uma rede. Para a transmissão e recepção do sinal de rádio a base utiliza duas antenas direcionais com ganho de 7dBi, enquanto o robô possui duas antenas omnidirecionais, uma posicionada na parte dianteira e outra na traseira, com ganho de 5dBi.

A Figura 3 mostra os modelos: (a) dos rádios utilizado para a comunicação; (b) das antenas direcionais tipo painel setorial posicionadas na base de controle; e (c) das antenas omnidirecionais planares instaladas no robô.

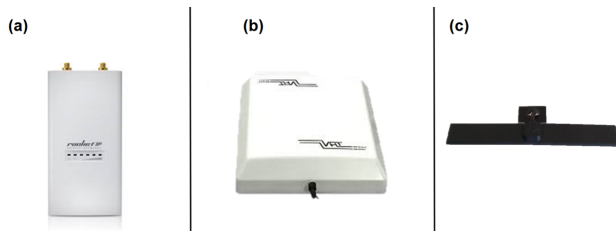


Figura 3. Rádio e antenas utilizados pelo sistema de comunicação do EspeleoRobô.

As formas da irradiação do sinal das antenas direcionais utilizadas neste projeto podem ser vistas na Figura 4.

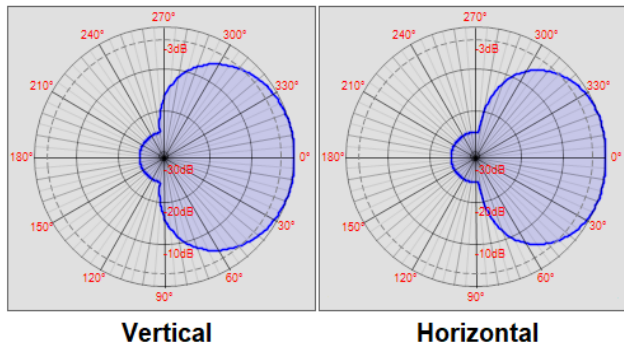


Figura 4. Diagramas de irradiação de ondas de rádio das antenas painel setorial utilizadas na base de controle do EspeleoRobô.

Considerando o foco do artigo em comandar a direção de antenas de rádio, uma solução simples consiste na utilização de um mecanismo *Pan-Tilt*. Este corresponde a uma plataforma com dois graus de liberdade, capaz de orientar (ou mirar) um equipamento como uma câmera ou antena.

A utilização de mecanismos *Pan-Tilt* é comum no controle de câmeras de segurança e equipamentos de defesa tática. Suas aplicações incluem: aquisição de alvos, inteligência, vigilância e reconhecimento, patrulha de fronteira, busca e resgate, aplicação da lei e monitoramento ambiental (Sarwar and Malik, 2008).

Neste caso, foi utilizado um equipamento disponível em laboratório, o *Pan-Tilt-Unit* PTU-D47 da FLIR controlado por computador, ilustrado na Figura 5. O PTU-D47 apresenta ângulos de varreduras de 318° para o ângulo *Pan* e 78° para o ângulo de *Tilt*. Segundo o manual do fabricante, o equipamento tem capacidade de *payload* de 5 kg, alcançando velocidades angulares máximas do *Pan-Tilt* de 300 e 60°/s respectivamente.

3. COMUNICAÇÃO VIA SINAL DE RÁDIO

Os problemas enfrentados na transmissão de dados via rádio dependem da intensidade necessária para a troca de informação entre os dispositivos da rede. A escolha de modelos de antena ideais, com irradiação e ganho ótimos, tem grande influência na qualidade da comunicação. Além disso, considerar a topologia do ambiente de propagação do sinal também é importante.

Considerar o decaimento do sinal, desde a localização da antena de comunicação da base de controle, até a loca-



Figura 5. Vista do mecanismo de *Pan-Tilt* utilizado para o direcionamento das antenas.

lização do robô, é mais complicado do que simplesmente medir a distância entre os dois objetos. Em casos onde não existe visada direta entre o robô e a base de controle, é mais difícil de descrever matematicamente a perda de intensidade de sinal pelo caminho.

A literatura propõe modelos lineares (equação 1) e logarítmicos (equação 2) como apresentado em (Rappaport, 2002), que permitem definir o decaimento da intensidade de sinal ao longo de um caminho:

$$RSS(d) = RSS(d_0) - \gamma_{lin} * (d - d_0), \quad (1)$$

$$RSS(d) = RSS(d_0) - \gamma_{log} * \log_{10}(d - d_0), \quad (2)$$

onde *RSS* (*Received Signal Strength*) representa a intensidade da conexão de rádio em dB, d_0 é a distância inicial e d a distância atual em metros entre o robô e a base de controle, e γ_{lin} e γ_{log} são os coeficientes que definem o decaimento do sinal. Estes coeficientes γ dependem do ambiente onde as ondas de rádio se propagam, podendo assumir diferentes valores.

Por meio de análises feitas com dados sobre a intensidade do sinal de rádio, gravados em experimentos com o EspeleoRobô, foi possível levantar equações que modelam o decaimento do sinal de rádio em ambientes *indoor* e *outdoor*. Tendo o modelo de decaimento de cada um dos testes individualmente, os dados foram combinados para definir equações mais precisas. Foi também calculado o erro percentual médio das equações implementadas em código para os valores gravados durante os testes.

A Tabela 1 apresenta os valores de $RSS(d_0)$ (considerando $d_0 = 0$) e γ para quatro situações diferentes. Essas variáveis são as mesmas utilizadas nas equações 1 e 2. Além disso, também foi calculado o erro percentual em relação aos experimentos de campo feitos com o EspeleoRobô.

Tipo de modelo	$RSS(d_0)$	γ	Erro percentual
Linear <i>indoor</i>	80	1,41	9,82
Linear <i>outdoor</i>	84	1,72	9,27
Logarítmico <i>indoor</i>	80	1,32	8,73
Logarítmico <i>outdoor</i>	87	1,56	8,55

Tabela 1. Modelos de decaimento de intensidade de sinal de rádio.

Na Figura 6, é apresentado um mapa de calor gerado a partir de dados de experimentos em que o EspeleoRobô percorreu um caminho fechado. Neste teste a orientação da antena estava fixa, sendo representada na imagem pelo vetor em amarelo. Para ilustrar a qualidade da conexão, é utilizada a convenção de que pontos onde o sinal é mais

forte (*hot spots*) são marcados em vermelho, e pontos onde o sinal é mais fraco (*cold spots*) são marcados em azul (Kamakaris and Nickerson, 2005).

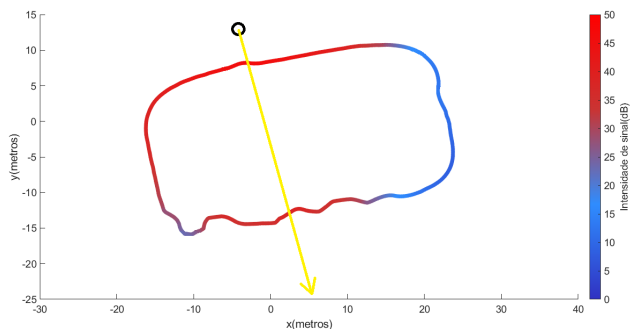


Figura 6. Mapa de calor com representação da intensidade do sinal de rádio entre EspeleoRobô e base de controle.

4. COMANDO DE MECANISMO PTU PARA DIRECIONAMENTO DE ANTENA

Com a finalidade de melhorar a conexão entre a base e o robô são propostas duas estratégias de comando de orientação das antenas da base, de forma que elas estejam sempre apontando na direção do robô.

Para as duas estratégias propostas, o comando do mecanismo *Pan-Tilt* foi baseado nos algoritmos `flir_ptu_driver`¹ e `asr_flir_ptu_driver`² implementados em pacotes do meta-sistema operacional ROS (*Robot Operating System*).

As rotações em torno dos eixos de *Pan* e *Tilt* são limitadas e influenciadas por vários fatores. Em primeiro lugar, os movimentos são restringidos pelos limites físicos do PTU. Outros fatores que também influenciam são as acelerações e velocidades máximas alcançadas pelas juntas. A movimentação das juntas apresenta perfil de velocidade trapezoidal, com aceleração constante até alcançar a velocidade máxima, e posteriormente utilizando desacelerações também constantes até o fim do movimento, conforme ilustrado na Figura 7. As rotações dos ângulos de *Pan* e *Tilt* funcionam de forma independente. Sendo assim, os perfis de velocidade não são sincronizados e possuem parâmetros de operação distintos. Além disso, as velocidades máximas também dependem da carga instalada no PTU.

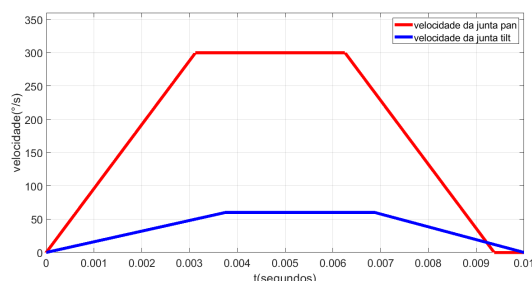


Figura 7. Gráfico ilustrando a variação de velocidade das juntas do PTU-D47.

Para as estratégias de controle propostas, ao receber comandos de posição das juntas, o PTU-D47 foi configurado

¹ https://github.com/ros-drivers/flir_ptu/tree/master/flir_ptu_driver

² https://github.com/asr-ros/asr_flir_ptu_driver

para se movimentar com a maior velocidade possível até a configuração desejada, caracterizando um controle do tipo “bang-bang” (Bellman et al., 1955), de forma que o sistema alcance as posições de referência no menor tempo possível.

4.1 Comando Baseado na Pose do Robô

A primeira estratégia utiliza como base a estimação de posição calculada pelos algoritmos de odometria embarcados no robô. A posição do robô é representada em coordenadas esféricas, possibilitando calcular os ângulos de *Pan* e *Tilt* utilizados para apontar as antenas da base de controle na direção do robô. Por motivos de simplificação, foi assumido que as antenas estão instaladas na interseção dos eixos de rotação do mecanismo *Pan-Tilt*.

Os ângulos de *Pan* e *Tilt* são calculados conforme o Algoritmo 1. As entradas do Algoritmo são as informações de posição da base, que possuem subíndice 0, e de posição do robô, que possuem subíndice *R*. Nas linhas de 1 a 6 são calculados os ângulos das coordenadas esféricas. Nas linhas 7 e 8 os ângulos são transformados de radianos para graus, já que esta é a unidade com a qual o PTU-D47 trabalha. As linhas de 9 a 16 fazem um tratamento para os casos em que uma das juntas do PTU alcance o fim de curso, impedindo que comandos não factíveis sejam enviados aos motores.

Algoritmo 1: Algoritmo de comando do *Pan-Tilt* baseado na pose do robô.

Entradas: $X_0, Y_0, Z_0, X_R, Y_R, Z_R$
Saídas : $\theta_{pan}, \theta_{tilt}$

```

1  $\Delta x \leftarrow X_R - X_0$ 
2  $\Delta y \leftarrow Y_R - Y_0$ 
3  $\Delta z \leftarrow Z_R - Z_0$ 
4  $pan \leftarrow atan2(\Delta y, \Delta x)$ 
5  $tilt \leftarrow atan2(\Delta z, sqrt(\Delta x^2 + \Delta y^2))$ 
6  $pan \leftarrow (pan * 180)/\pi$ 
7  $tilt \leftarrow (tilt * 180)/\pi$ 
8 if  $pan > 159$  then
9 |  $pan \leftarrow 159$ 
10 end
11 if  $pan < -159$  then
12 |  $pan \leftarrow -159$ 
13 end
14 if  $tilt > 31$  then
15 |  $tilt \leftarrow 31$ 
16 end
17 if  $tilt < -47$  then
18 |  $tilt \leftarrow -47$ 
19 end
20 return  $pan, tilt$ 

```

Esta estratégia de comando utiliza como referência a estimação da posição do robô, que pode ser calculada com base nos dados fornecidos por diferentes sensores embarcados no robô, incluindo *encoders* acoplados aos motores das rodas, IMU e câmera estéreo (Rezende et al., 2020).

Nos experimentos de campo apresentados neste artigo, a posição do robô foi estimada por meio de uma técnica de LiDAR SLAM denominada Espeleo-LeGO-LOAM, que equivale a uma versão do LeGO-LOAM descrito em (Shan and Englot, 2018) adaptada para o EspeleoRobô conforme apresentado em (Cruz Júnior et al., 2020).

A técnica LeGO-LOAM é uma versão mais leve do LOAM, apresentado em (Zhang and Singh, 2014), otimizada para

veículos terrestres e que pode ser executada em tempo real, fornecendo as estimativas das poses a 10 Hz e o mapa a 2 Hz. A metodologia é subdividida em 5 etapas: Segmentação, Extração de *Features*, Odometria LiDAR, Mapeamento LiDAR e Integração das Transformações, como mostra a Figura 8.

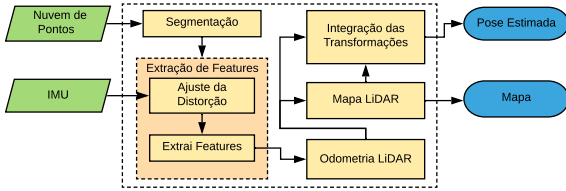


Figura 8. Esquema geral de funcionamento da técnica LeGO-LOAM descrito em (Cruz Júnior et al., 2020).

4.2 Comando por Processamento de Imagens

A segunda estratégia para a realização do comando de direção das antenas consiste na utilização de processamento de imagem. Este processamento é feito utilizando a biblioteca *open source* OpenCV³ otimizada para aplicações de visão computacional em tempo real.

Nesse caso, uma câmera é acoplada ao mecanismo de *Pan-Tilt* junto às antenas, e o algoritmo de processamento de imagens busca identificar o robô na imagem retornada pela câmera com base na sua cor. Em seguida, analisando a diferença de pixels entre a posição do centro da forma identificada como robô e o centro da imagem, os motores do *Pan-Tilt* são comandados de forma a centralizar o robô na imagem.

O controle é feito conforme descrito pelo Algoritmo 2. As entradas do Algoritmo são as informações da câmera responsável pela captura de imagem, os limites inferior e superior da faixa de cores consideradas como parte do EspeleRobô, os valores atuais dos ângulos de *Pan* e *Tilt* do PTU, a resolução da imagem em pixels, e o deslocamento angular do PTU a cada execução do Algoritmo.

Na linha 1 do Algoritmo 2 as informações da imagem a serem analisadas são salvas, e na linha 2 a imagem é processada a fim de tentar encontrar uma forma com as cores do EspeleRobô. Já nas linhas 3 e 4 são definidas as componentes da posição do centro da forma identificada como robô. Em seguida, nas linhas de 5 a 16 são analisadas as condições de posicionamento deste ponto central e definidos os comandos a serem enviados para os motores. As linhas de 17 a 24 fazem um tratamento para os casos em que as juntas do PTU alcancem o fim de curso.

5. SIMULAÇÕES E EXPERIMENTOS DE CAMPO

As estratégias de comando de direção de antenas de rádio durante a teleoperação de um robô móvel são verificadas e comparadas utilizando simulações e experimentos de campo. No primeiro caso foi utilizado o simulador do EspeleRobô (Cid et al., 2020), desenvolvido utilizando o *CoppeliaSim* junto com o *Robot Operating System* (ROS). Já os experimentos de campo foram realizados no campus

³ <https://opencv.org>

Algoritmo 2: Algoritmo de comando do mecanismo *Pan-Tilt* com processamento de imagens.

```

Entradas: camera, lower_limit, upper_limit, pan_actual,
          tilt_actual, width, height, Δθ
Saídas : pan, tilt
1 image ← camera.Response()
2 shape ← DetectColor(image, lower_limit, upper_limit)
3 centroid_x ← CentroidX(shape)
4 centroid_y ← CentroidY(shape)
5 if centroid_x > (width/2) then
6   | pan ← pan_actual - Δθ
7 else if centroid_x < (width/2) then
8   | pan ← pan_actual + Δθ
9 else
10  | pan ← pan_actual
11 end
12 if centroid_y > (height/2) then
13  | tilt ← tilt_actual - Δθ
14 else if centroid_y < (height/2) then
15  | tilt ← tilt_actual + Δθ
16 else
17  | tilt ← tilt_actual
18 end
19 if pan > 159 then
20  | pan ← 159
21 end
22 if pan < -159 then
23  | pan ← -159
24 end
25 if tilt > 31 then
26  | tilt ← 31
27 end
28 if tilt < -47 then
29  | tilt ← -47
30 end
31 return pan, tilt
    
```

da UFMG. Um vídeo resumindo os testes está disponível online.⁴

A Figura 9 apresenta os mecanismos simulado e real do *Pan-Tilt*, junto com peças de suporte e duas antenas direcionais tipo painel setorial. A Figura também ilustra os sistemas de coordenadas F_a da antenas e F_b do PTU, além dos eixos de rotação dos ângulos de *Pan* e *Tilt*.

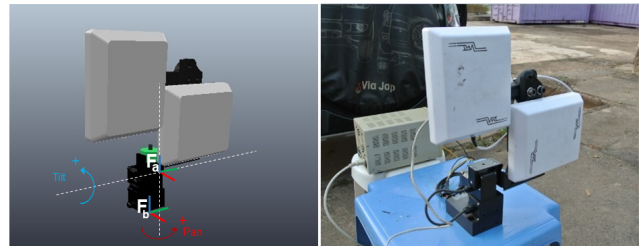


Figura 9. Modelo virtual e implementação física do mecanismo de PTU junto com antenas direcionais.

A métrica de erro utilizada para validar as estratégias de comando de direção considera a distância entre o robô e a reta coincidente com o eixo X_a do sistema de coordenadas das antenas, conforme ilustrado na Figura 10.

O erro é calculado com base na distância d entre um ponto e uma reta, definida como:

$$\vec{e} = (I - \vec{s}_n \vec{s}_n^T) \vec{r}, \quad (3)$$

onde $I \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ é a matriz identidade, $\vec{s}_n = \frac{\vec{s}}{|\vec{s}|}$ é o vetor normalizado apontando na direção do eixo X_a do

⁴ <https://github.com/davidsimonmarques/VideoSBAI2021.git>

sistema de coordenadas das antenas, e \vec{r} é o vetor que liga o sistema de coordenadas F_a da antena ao sistema de coordenadas F_r do robô. O erro corresponde à norma do vetor \vec{e} .

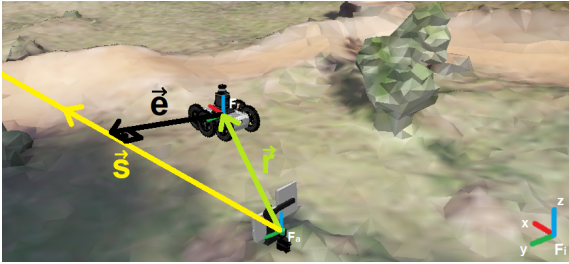


Figura 10. Representação do erro de direção da antena com respeito ao robô.

Durante as simulações e experimentos de campo, o robô foi controlado de forma a seguir um percurso fechado de referência utilizando a estratégia de campos vetoriais artificiais juntamente com a técnica de *feedback linearization*. O controle por campos vetoriais é baseado na definição de uma velocidade de comando composta por duas componentes: uma convergente, responsável por comandar o robô até uma curva de referência; e uma tangente, responsável por guiar o robô ao longo do caminho. Esta foi a mesma estratégia de controle adotada em (Amaral et al., 2020).

Para as simulações, foram computadas as informações de *ground truth* fornecidas pelo CoppeliaSim para o cálculo deste erro. Durante os experimentos reais, foi utilizada a odometria calculada pelo algoritmo LeGO-LOAM, conforme descrito na Seção 4.1.

5.1 Simulações no CoppeliaSim

Durante as simulações o robô virtual executou um caminho fechado em formato de elipse (definida por eixos de 17 m e 8 m de comprimento) num terreno virtual acidentado, conforme ilustrado na Figura 11, permitindo comparar as estratégias de comando de direção da antena com base na pose ou por processamento de imagens. A cor de cada ponto do caminho percorrido na simulação está associada ao valor de intensidade de sinal conforme a barra de cores do lado direito; esses valores foram calculados utilizando o modelo logarítmico *outdoor* para decaimento do sinal descrito na equação 2 e Tabela 1. As Figuras 12 e 13 apresentam os resultados obtidos por simulações.

Os valores dos ângulos de *Pan* definidos pelas duas estratégias são apresentados nas Figuras 12(a) e 13(a). No caso do processamento de imagens, como uma parte do percurso não possibilita a visada direta do robô, o ângulo de *Pan* se mantém constante entre os instantes 32 a 42 s.

Os valores dos ângulos de *Tilt* do PTU são apresentados nas Figuras 12(b) e 13(b). Novamente a perda da visada direta acarreta em erros no processamento de imagem. Além disso, os gráficos apresentam momentos com variações mais bruscas por conta das irregularidades presentes no terreno virtual.

Os gráficos de erro podem ser observados nas Figuras 12(c) e 13(c). É possível observar que apenas o método por processamento de imagem apresenta erros expressivos

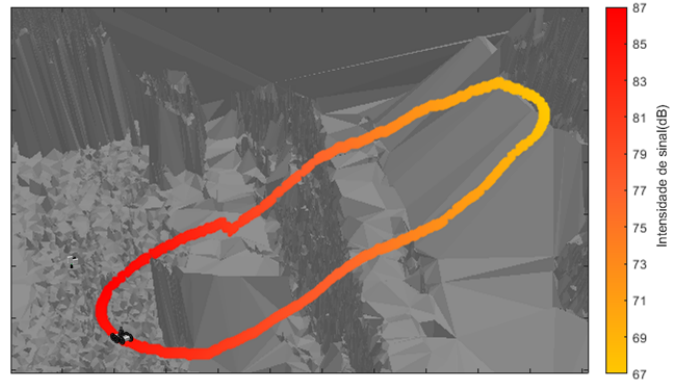


Figura 11. Caminho percorrido pelo robô num terreno virtual, junto com o mapa de calor do sinal de rádio.

causados pela perda de visada direta, que são reduzidos rapidamente quando a câmera volta a enxergar o robô. O algoritmo de controle utilizando a pose obteve erros da ordem de milímetros durante toda a simulação. Para fins de comparação, as Figuras 12(d) e 13(d) mostram o valor do erro caso as antenas da base de controle permaneçam fixas.

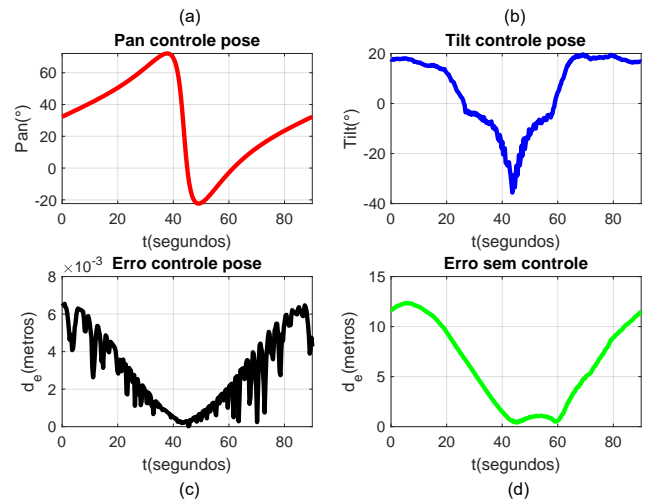


Figura 12. Resultados de simulação do comando do mecanismo PTU com base na pose do robô.

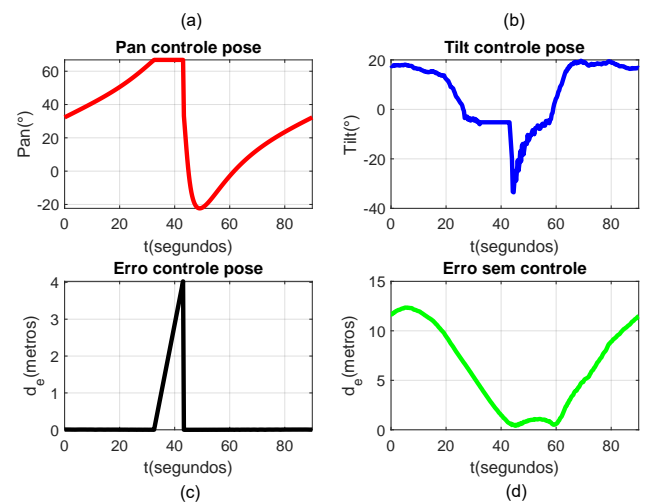


Figura 13. Resultados de simulação do comando do mecanismo PTU com base na imagem do robô.

5.2 Experimentos de Campo

Para a validação experimental, o EspeleoRobô foi controlado seguindo um percurso fechado em um terreno inclinado no campus da UFMG. Durante os experimentos, foi possível utilizar apenas o método de controle baseado na pose do robô. Isto ocorreu devido ao fato do algoritmo de processamento de imagens não ser capaz de identificar o robô nas imagens fornecidas por uma webcam HD Logitech C270 instalada no mecanismo *Pan-Tilt*.

Durante o experimento de campo o robô percorreu de maneira autônoma o caminho em formato de elipse (definida por eixos de 20 m e 12 m de comprimento) exibido na Figura 14, que também apresenta o mapa gerado do ambiente utilizando a técnica LeGO-LOAM de LiDAR SLAM. A cor de cada ponto do caminho percorrido pelo EspeleoRobô está associada ao valor de intensidade de sinal conforme a barra de cores do lado direito; esses valores foram obtidos pela leitura de dados fornecidos pelo rádio da base de controle. Já a Figura 15 apresenta a evolução da posição do robô e da direção do mecanismo *Pan-Tilt* durante o experimento.

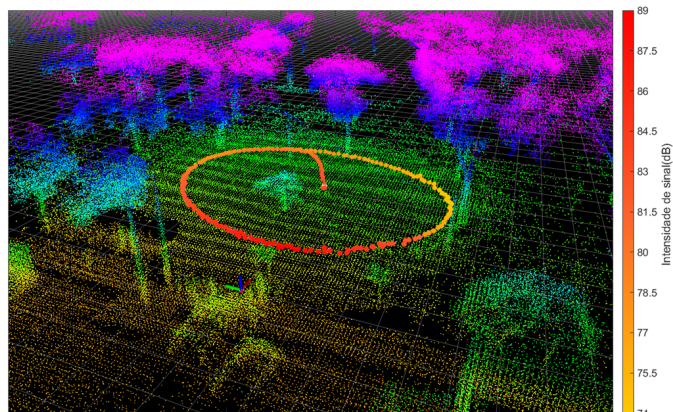


Figura 14. Caminho percorrido pelo robô durante o experimento de campo, junto com o mapa de calor do sinal de rádio.

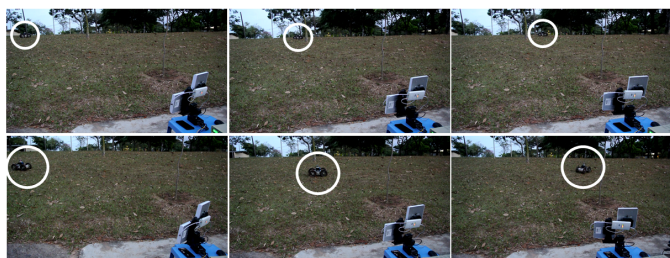


Figura 15. Movimentações do robô e das antenas durante o experimento de campo.

Os valores do ângulo de *Pan* do mecanismo PTU alcançados durante o experimento são apresentados na Figura 16(a). É possível verificar na figura que as respostas aos comandos (recebidos após 30 s de operação) são suaves.

Os valores do ângulo de *Tilt* do PTU são ilustrados na Figura 16(b). Neste caso, as respostas obtidas são ruidosas, provavelmente devido ao excesso de peso das antenas e rádio instalados no PTU, dificultando a movimentação em torno do eixo Y_a .

O gráfico do erro obtido durante o experimento pode ser visto na Figura 16(c). As alterações bruscas do ângulo *Tilt* acarretam em variações abruptas na distância entre robô e o vetor representando a direção das antenas.

É possível observar que ao longo de todo o teste o erro se manteve em um valor relativamente baixo, inferior a 60 cm, não prejudicando a comunicação via rádio. Um dos fatores causadores desse erro é a latência da comunicação entre robô e base de controle, de forma que o comando do PTU sempre utiliza como referência uma estimativa defasada da localização do robô. Ainda assim, sem o comando de direção da antena esse erro alcança valores de até 10 m, conforme ilustrado na Figura 16(d).

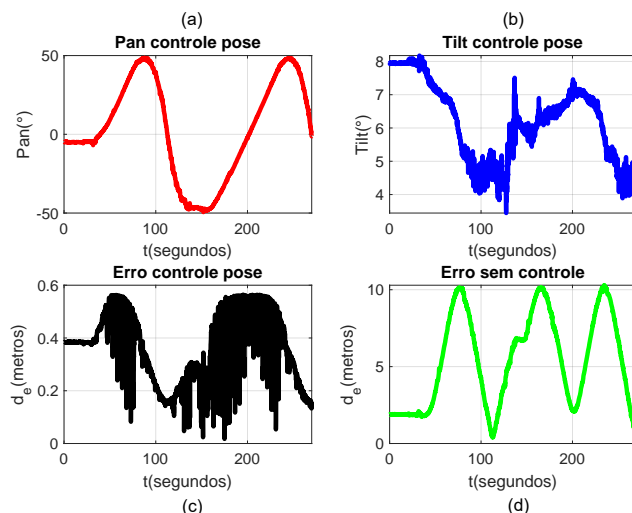


Figura 16. Resultados experimentais do comando do mecanismo PTU com base na pose do robô.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este artigo teve como o foco os problemas de comunicação via rádio durante a teleoperação de um robô móvel. A solução proposta para amenizar o problema consiste em controlar a orientação de antenas direcionais, de forma que estas estejam sempre apontando na direção do robô. Para tal, foram investigadas duas estratégias para comandar um mecanismo *Pan-Tilt* com base na pose estimada do robô ou no processamento de imagens.

Essas estratégias foram verificadas por meio de simulações realizadas no CoppeliaSim, e também com experimentos de campo realizados com o EspeleoRobô, comandando o dispositivo PTU-D47 de forma a alterar a direção das antenas conforme a movimentação do robô.

Cabe observar que o comando de direção das antenas com base na pose do robô, apesar dos bons resultados obtidos, depende da estimativa da localização do robô; no caso de estimativas ruins, os erros de localização irão gerar referências erradas de ângulos de *Pan* e *Tilt*, prejudicando a comunicação entre robô e base de controle. Já o comando por processamento de imagens é mais indicado em ambientes livres de obstáculos, com visada direta entre base de controle e robô. Além disso, são necessários cuidados adicionais para garantir a identificação do robô nas imagens geradas pela câmera embarcada no mecanismo *Pan-Tilt*. Esta identificação é prejudicada por variações de

iluminação e também pela distância do robô com respeito à base de operação.

Como trabalhos futuros, é possível mencionar a realização de mais experimentos de campo utilizando um mecanismo *Pan-Tilt* com maior capacidade de *payload*. Além disso, um novo sistema de câmera e identificadores visuais deve ser avaliado, permitindo identificar o robô nas imagens capturadas do ambiente de operação. Por fim, pretende-se investigar o uso de múltiplos pontos de acesso como o dispositivo apresentado aqui, posicionados estrategicamente ao longo do caminho para ampliar o sinal de comunicação. Em caso de ambientes complexos e sem visada direta, o uso de múltiplos robôs auxiliares para auxiliar na propagação do sinal pode ser um estratégia efetiva a ser adotada.

7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Vale S.A. e Instituto Tecnológico Vale (ITV), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecemos também à Escola de Engenharia da UFMG e ao Programa de Educação Tutorial da Engenharia Elétrica (PETEE-UFMG).

REFERÊNCIAS

- Amaral, I., Fany, C., Simon, D., Matos, L., Álvaro Araújo, Leão, L., Rezende, A., Azpúrua, H., Pessin, G., and Freitas, G. (2020). Sistema de alertas e operação assistida de um robô para a inspeção de ambientes confinados - espeleorobô. *CBA - Congresso Brasileiro de Automática*.
- Azpúrua, H., Rocha, F., Garcia, G., Santos, A.S., Cota, E., Barros, L.G., Thiago, A.S., Pessin, G., and Freitas, G.M. (2019). EspeleRobô - a robotic device to inspect confined environments. *ICAR - Int. Conf. on Advanced Robotics*.
- Bellman, R., Glicksberg, I., and Gross, O. (1955). On the "bang-bang" control problem. *Quarterly of Applied Mathematics*.
- Cid, A., Nazario, M., Sathler, M., Martins, F., Domingues, J., Delunardo, M., Alves, P., Teotonio, R., Barros, L.G., Rezende, A., Miranda, V., Freitas, G., Pessin, G., and Azpúrua, H. (2020). A simulated environment for the development and validation of an inspection robot for confined spaces. In *2020 Latin American Robotics Symposium (LARS)*. IEEE.
- Cota, E., Torre, M.P., Rocha, F.A.S., Garcia, G., Ângelo Junior, Ramos, V., Queiroz, V., Zanini, V., Brito, G., Marques, A., Érica Pinto, Nogueira, L., Freitas, G., Miola, W., dos Reis, M.A., Araújo, R., and Brandi, I. (2017). Dispositivo de monitoramento remoto de cavidades - EspeleRobô. *SBAI - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, 1761–1762.
- Cruz Júnior, G.P.d., Matos, L.V.d.C., Azpúrua, H., Pessin, G., and Freitas, G.M. (2020). Investigação de Técnicas LiDAR SLAM para um Dispositivo Robótico de Inspeção de Ambientes Confinados. In *Anais do Congresso Brasileiro de Automática 2020*.
- Gil, S., Kumar, S., Katabi, D., and Rus, D. (2015). Adaptive communication in multi-robot systems using directionality of signal strength. *The International Journal of Robotics Research*, 34(7), 946–968.
- Hichri, B., Adouane, L., Fauroux, J.C., Mezouar, Y., and Doroftei, I. (2014). Cooperative lifting and transport by a group of mobile robots. *International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems*.
- Huang, K., Sun, Y., Hao, M., Yang, J., Xia, Z., Li, X., and Chen, Y. (2019). Researches on a tele-operated robot based on wi-fi. In *2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*, 648–651. doi:10.1109/ITNEC.2019.8729472.
- Kamakaris, T. and Nickerson, J.V. (2005). Connectivity maps: Measurements and applications. *38th Hawaii Int. Conf. on System Sciences*.
- Lidoris, G., Rohrmuller, F., Wollherr, D., and Buss, M. (2009). The autonomous city explorer (ace) project mobile robot navigation in highly populated urban environments. *IEEE International Conference on Robotics and Automation - ICRA*.
- Martz, J., Al-Sabban, W., and Smith, R.N. (2020). Survey of unmanned subterranean exploration, navigation, and localisation. *IET Cyber-systems and Robotics*.
- Nunes, A.H.D., Álvaro R. Araújo, Alves, M.L.A., Rezende, A.M.C., Silva, I.B., and Pimenta, L.C.A. (2020). Controle de robô para serviços de inspeção industrial utilizando campos vetoriais artificiais variantes no tempo. *CBA - Congresso Brasileiro de Automática*.
- Paolanti, M., Sturari, M., Mancini, A., Zingaretti, P., and Frontoni, E. (2017). Mobile robot for retail surveying and inventory using visual and textual analysis of monocular pictures based on deep learning. *European Conference on Mobile Robots - ECMR*.
- Rappaport, T.S. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, 2 edition.
- Rezende, A.M., Júnior, G.P., Fernandes, R., Miranda, V.R., Azpúrua, H., Pessin, G., and Freitas, G.M. (2020). Indoor localization and navigation control strategies for a mobile robot designed to inspect confined environments. In *2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 1427–1433. IEEE.
- Sarwar, I.S. and Malik, A.M. (2008). Modeling, analysis and simulation of a pan tilt platform based on linear and nonlinear systems. *IEEE/ASME Int. Conf. on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*.
- Shan, T. and Englot, B. (2018). Lego-loam: Lightweight and ground-optimized lidar odometry and mapping on variable terrain. In *2018 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 4758–4765. IEEE.
- Sherali, H.D., Pendyala, C.M., and Rappaport, T.S. (1996). Optimal location of transmitters for micro-cellular radio communication system design. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*.
- Zhang, J. and Singh, S. (2014). Loam: Lidar odometry and mapping in real-time. In *Robotics: Science and Systems*, volume 2.