

Aplicação de um sistema GNSS RTK de baixo custo a uma embarcação autônoma de superfície

Guilherme Aparecido Barbosa Pereira * Leonardo de Mello Honório **
Edimar José de Oliveira *** Alessandro Salles Carvalho ****

* Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, (e-mail: guilherme.aparecido@engenharia.ufjf.br).

** Faculdade de Engenharia, Departamento de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, (e-mail: leonardo.honorio@ufjf.edu.br)

*** Faculdade de Engenharia, Departamento de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, (e-mail: edimar.oliveira@ufjf.edu.br)

**** Departamento de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, (e-mail: alessandro.carvalho@ufjf.edu.br)

Abstract: Using the RTK technique, GNSS receivers may achieve centimeter positioning accuracy, but the high cost limits its use in many applications. This work brings assembly schemes and open-source codes of analysis and implementation of a low-cost RTK applied in an autonomous surface vehicle with an embedded sensor to survey the water conditions of hydroelectric generation reservoirs. This system has out-of-the-box compatibility with equipment and other robots that operates with GPS or GNSS receivers and its costs are less than R\$10,000.00. In the tests, the system achieve an accuracy of approximately 0.12 m, a value better than 4.5 m obtained with the receiver operating with single-point positioning. Thus, the proposed system is able to improve the data collected by the embedded sensor and the vehicle navigation, without increase significantly the final cost.

Resumo: Os receptores GNSS podem garantir boa acurácia utilizando a técnica RTK, porém seu custo limita o uso em muitas aplicações. Este trabalho traz esquemas de montagem e códigos abertos de análise e implementação de um RTK de baixo custo aplicado em um veículo autônomo de superfície com sensor embutido para levantamento das condições hídricas de reservatórios de geração hidrelétrica. Este sistema é compatível com quaisquer equipamentos e outros robôs que operam com receptores GPS ou GNSS e seu custo é inferior a R\$ 10.000,00. Nos testes, o sistema apresentou acurácia de aproximadamente 0,12 m, valor melhor que os 4,5 m obtidos com o posicionamento por ponto simples. Assim, o sistema proposto é capaz de melhorar os dados coletados pelo sensor embarcado e também a navegação do veículo sem aumentar significativamente o custo final.

Keywords: GNSS; RTK; Low cost; ADCP; ASV.

Palavras-chaves: GNSS; RTK; Baixo custo; ADCP; ASV.

1. INTRODUÇÃO

Os veículos autônomos como carros, barcos, drones, entre outros, estão sendo aplicados em cada vez mais setores que incluem inspeções em diferentes segmentos, medições, logística, entre outros.

Para que tais veículos sejam capazes de realizar missões de forma eficiente, diferentes sensores e técnicas são aplicados conjuntamente. Dentre os sensores mais comuns, destacam-se aqueles que compõem a unidade de medidas inerciais (IMU, do inglês *Inertial Measurement Unit*) como acelerômetros, giroscópios, magnetômetros etc. Além desses, outros sensores como, por exemplo, GPS, LiDAR e câmeras, também são utilizados para navegação.

Um dos sistemas que pode trazer grande ganho à navegação de um robô autônomo é um conjunto formado por dois receptores conectados ao sistema global de navegação por satélite (GNSS, do inglês *Global Navigation Satellite System*) utilizando a técnica de posicionamento cinemático em tempo real (RTK, do inglês *Real Time Kinematic*).

Com o uso de receptores GNSS RTK, um veículo autônomo pode ter sua acurácia posicional reduzida da ordem de metros (quando utilizando um receptor simples) para centímetros, porém o alto custo desse sistema muitas vezes inviabiliza sua aplicação.

Baseado nisso, o presente trabalho traz a proposta de um GNSS RTK de baixo custo aplicado a um veículo autônomo de superfície (ASV, do inglês *Autonomous Surface Vessel*). O ASV abordado é do tipo catamarã, recebe o

nome Aero4River, e é aplicado em diferentes áreas como a supervisão de águas e portos, pesquisas hidrológicas em águas rasas, buscas e resgates marítimos, coleta para análise da qualidade de água, mapeamento batimétrico, entre outras, conforme relata Silva (2021).

1.1 Estrutura do trabalho

Além da introdução, o documento apresenta uma estrutura dividida conforme descrito a seguir.

A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados com desenvolvimento de sistemas semelhantes.

A Seção 3 traz a fundamentação teórica que inclui abordagens de uso do GNSS, informações do barco que utiliza o sistema e estratégia de análise dos dados.

A Seção 4 traz a descrição de *hardware*, circuitos utilizados, protocolos de comunicação, descrição breve das funções dos códigos, custos do equipamento, análises testes e seus respectivos resultados.

Por fim, a Seção 5 traz uma síntese do conteúdo abordado, apresentando a conclusão do trabalho.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

Também utilizando um sistema GNSS RTK, o trabalho de Valente et al. (2020) utiliza dois receptores com distância conhecida entre as antenas embarcados em um robô. No trabalho, a acurácia calculada pelo autor chega a um valor de 50 mm, que é considerado um valor satisfatório e esperado.

Para aplicações de mapeamento com drones, Madawalagama et al. (2019) propõe um sistema de baixo custo utilizando um módulo Emlid Reach. O resultado obtido é uma acurácia na ordem de centímetros, que possibilita mapeamentos de maior exatidão de acordo com o autor.

Ainda utilizando receptores GNSS RTK, Skoglund et al. (2016) realiza análises de desempenho estático e cinemático do receptor, com resultado de uma precisão aproximada de 20 cm no teste cinemático, valor que se aproxima de equipamentos de maior custo de acordo com o autor.

Um receptor Ublox ZED-F9P é analisado no trabalho de Janos (2021). O autor descreve a realização de testes comparativos com receptores profissionais como o Leica GS18T. De acordo com o autor, o ZED-F9P possui desempenho satisfatório em ambientes com boa visibilidade do céu e também em cenários com visibilidade parcial (utilizando uma antena Leica AS10), o que o torna competitivo para disputar com receptores *high-end* em diferentes aplicações.

O presente trabalho traz como diferencial a montagem de um sistema RTK de baixo custo, com esquemas de montagem, dispositivos acessíveis e fáceis de encontrar e códigos abertos para desenvolvimento e testes. O sistema pode ser aplicado a dispositivos com comunicação em níveis lógicos TTL ou RS232. Além disso, ele pode operar com dispositivos que operam com o sistema americano (GPS) ou com o global (GNSS).

Dessa forma, tem-se um sistema de múltipla compatibilidade, código aberto e custo total inferior a R\$ 10.000,00, o

que viabiliza seu uso em sistemas de baixo custo e compatibiliza a operação em diferentes equipamentos/dispositivos.

Neste trabalho o GNSS foi aplicado a um perfilador hidroacústico de correntes (ADCP, do inglês *acoustic Doppler current profiler*) embarcado em um barco inovador de topologia ASV com 3 graus de liberdade e propulsão aérea. Sem necessidade de retrabalho, ainda é possível aplicar o mesmo sistema a drones e quaisquer outros robôs com interface serial para recebimento de dados de posição.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Abordagens para uso do GNSS

Um sistema de geolocalização utilizando receptores GNSS tem algumas formas de funcionamento possíveis. Dentre elas, destacam-se duas:

- Posicionamento absoluto por ponto simples: consiste em um único receptor embarcado recebendo sinais de diferentes satélites com o objetivo de determinar sua posição. Nessa técnica é possível garantir uma acurácia de posicionamento métrica, que geralmente varia entre 5 a 10 m de acordo com Monico (2008), dependendo do *hardware* utilizado.
- Posicionamento relativo: é um sistema composto por dois receptores, onde um permanece fixo (base) em um ponto de coordenadas conhecidas e o outro em movimento junto ao robô (rover). Com conhecimento de sua própria posição, a base do sistema é capaz de estimar correções de posicionamento e enviá-las ao rover de forma a diminuir consideravelmente o erro, conforme visto na Figura 1. Uma das técnicas de posicionamento relativo é o cinemático em tempo real (RTK). Esse sistema é capaz de obter acurácia centimétrica.

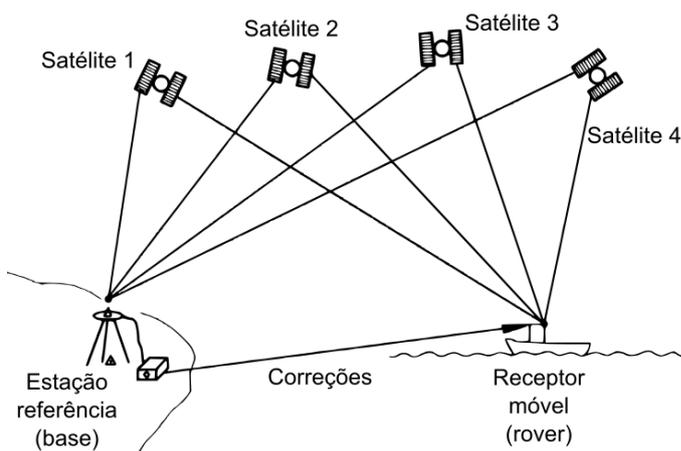


Figura 1. Conceito de posicionamento relativo. Adaptado de Seeber (2008).

Em geral, robôs autônomos de baixo custo utilizam apenas um receptor GNSS, configurando um sistema de posicionamento absoluto por ponto simples. Em drones, por exemplo, é comum que apenas um receptor seja utilizado.

Em robôs de maior custo voltados para aplicações industriais, agricultura, entre outros, é mais comum verificar a utilização do sistema RTK para obtenção de uma acurácia

maior. Isso faz com que o sistema apresente um custo mais elevado, visto que são necessários dois receptores, um link de transmissão de dados (para envio das correções), além de processamento suficiente para execução dos algoritmos que implementam o RTK.

Um cenário de uso comum dos sistemas RTK é nos drones da linha Matrice, da fabricante DJI. Um drone *DJI Matrice 300*, por exemplo, tem custo em torno de R\$ 58.699,00¹. Trata-se de um drone com receptor embutido compatível com o RTK, porém a aquisição da base aumenta o custo do equipamento em R\$ 28.990², fazendo com que seu valor final chegue a R\$ 87.689,00.

3.2 Aplicação no Aero4River

O Aero4River pode ser aplicado em diferentes cenários, porém um de seus focos é possuir embarcado um sensor ADCP (do inglês, *acoustic Doppler current profiler*) para coleta e análise de amostras para o levantamento das condições hídricas de reservatórios de geração hidrelétrica.

O ADCP é um equipamento acústico de medição de vazão e avaliação de quantidade de sedimentos que utiliza o efeito Doppler (mudança observada na frequência de uma onda qualquer resultante do movimento relativo entre a fonte e o observador) transmitindo pulsos sonoros de frequência fixa e escutando o eco que retorna das partículas em suspensão (sedimentos e plâncton), conforme Gamaro (2020).

O alto custo do ADCP e dos periféricos necessários para funcionamento criou a necessidade de desenvolvimento de subsistemas de menor custo capazes de proporcionar funcionamento pleno ao sensor. Para correta medição, um dos parâmetros principais é a posição exata do sensor ao longo das medições, o que torna o uso do GNSS RTK uma excelente solução para obtenção correta das medidas.

O presente trabalho não foca no sensor ADCP em si, mas sim nos subsistemas que possibilitam sua interface ao barco e, principalmente, na montagem do GNSS RTK que provê os dados de localização em tempo real e com acurácia centimétrica.

3.3 Análise dos dados

Para análise dos dados gerados durante testes, todas as coordenadas obtidas pelo GNSS (no formato latitude, longitude, altitude) foram convertidas para o sistema geodésico local: leste, norte, superior (ENU, do inglês *East, North, Up*). Essa conversão possibilita a análise das informações em grandeza métrica. Para conversão foi utilizado o sistema Geodésico de Referência SIRGAS2000, que tem como origem os parâmetros do elipsoide GRS80 (*Geodetic Reference System 1980*) IBGE (2005).

Com isso, de acordo com Carvalho et al. (2015), verificase as acurácias dadas pela Raiz do Erro Quadrático Médio dos elementos das coordenadas ($REQM_c$) para cada componente: E (Leste, do inglês *East*) e N (Norte, do inglês *North*) e a acurácia planimétrica ($REQM_P$). Os cálculos

foram realizados por meio das Equações 1 e 2, conforme Ferrer-González et al. (2020), respectivamente.

$$REQM_c = \sqrt{\frac{\sum_i^n (c_i - \text{referência})^2}{n}} \quad (1)$$

$$REQM_P = \sqrt{\frac{\sum_i^n [(e_i - e_{ref})^2 + (n_i - n_{ref})^2]}{n}} \quad (2)$$

Em que:

c (coordenada): elemento das amostras de e, n ou u adquiridos em um determinado instante e armazenados na posição i de um vetor de dimensão N;

referência: coordenada e, n ou u de referência;

N: número de elementos coletados para cada coordenada;

i: inteiro que varia de 1 a N correspondente a um elemento específico do vetor de amostras.

Toda a implementação³ foi realizada utilizando a linguagem Python 3.9.6 e as bibliotecas NumPy 1.21.0, Matplotlib 3.4.2 e Scipy 1.7.0.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Comunicação com o ADCP

O presente trabalho utiliza o ADCP *RiverSurveyor M9*, da Sontek, projetado com o objetivo de realizar as medições de vazão em vários tipos de aplicações em rios e canais abertos. Esse equipamento pode ser adquirido individualmente ou com uma série de opcionais, que incluem o módulo de energia e comunicações, GPS, entre outros acessórios.

De forma a minimizar os custos do equipamento, o trabalho conta apenas com o sensor ADCP comercializado pelo fabricante. O sistema GNSS RTK foi desenvolvido de forma a ser utilizado para geolocalização do barco e do sensor simultaneamente.

A compatibilidade do ADCP é garantida com o GPS (sistema americano) com obtenção de dados de posição por meio do formato estabelecido pela *National Marine Electronics Association* (NMEA). A sentença utilizada é a GGA, que fornece os dados de posição do equipamento. As informações do protocolo podem ser vistas na Figura 2.

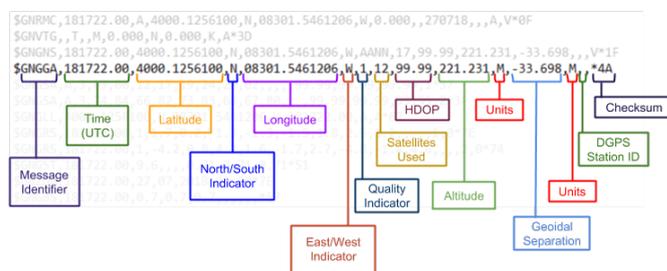


Figura 2. Protocolo NMEA. Fonte: Downs (2018).

4.2 GNSS utilizado e integração com o sistema

Os receptores GNSS utilizados são do modelo *Emlid Reach*. Este dispositivo conta com uma placa Intel Edison,

³ https://github.com/GuiABP/GNSS_RTK/tree/main/Analises

¹ <https://www.dronedireto.com.br/dji-matrice-300-rtk>. Acesso em: 30 ago. 2022

² <https://www.dronedireto.com.br/dji-d-rtk-2-gnss-mobile-station-drone-matrice-series>

módulo U-blox NEO M8T e periféricos. Foram utilizados dois receptores interligados por meio de um rádio Xbee S3B. A Figura 3 exibe um esquema básico de ligação e a Figura 4 exibe o protótipo da base.

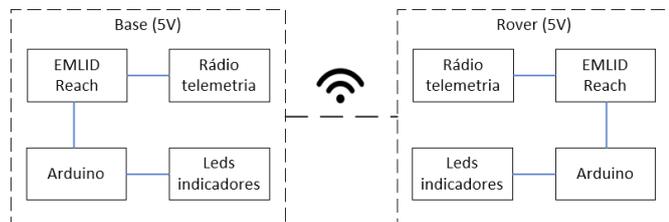


Figura 3. Esquema básico de comunicação.



Figura 4. Protótipo da base do GNSS.

Para comunicação com outros dispositivos, o receptor exporta os dados de posição, velocidade de navegação etc., utilizando sentenças específicas para cada um desses cenários, conforme visto na Figura 2.

Em receptores GNSS, por exemplo, a sentença é iniciada com o identificador GNGGA. Em receptores GPS, apesar da semelhança no restante da sentença, o identificador é GPGGA. Essa pequena diferença é suficiente para que o ADCP seja incapaz de realizar a leitura dos dados gerados pelo RTK.

Para resolver tal problema, foi inserido um Arduino no sistema executando um algoritmo⁴ que ajusta a sentença NMEA, adaptando o início e corrigindo o *checksum* da nova mensagem. Isso possibilita que o ADCP seja capaz de realizar a leitura dos dados de qualquer GNSS (sentenças GGA e VTG, onde GGA corresponde aos dados de posição, tempo e informações dos satélites e VTG corresponde a velocidade em relação ao solo e ao curso (a direção de navegação), conforme SiRF (2007)). Além disso, os dados de posição do Emlid Reach também podem ser enviados diretamente ao sistema de navegação do barco.

Assim como em outros sensores, o ADCP se comunica usando o padrão RS232 (-12 V, +12 V), enquanto o Emlid Reach e Arduino utilizam níveis lógicos compatíveis com TTL (0 V, +5 V). De forma a possibilitar a comunicação física, foi adicionado um dispositivo MAX3232 para converter os níveis de tensão. O circuito é exibido na Figura 5.

Juntamente ao GNSS RTK, também foi instalado um sistema de rádio que possibilita a comunicação sem fio

⁴ https://github.com/GuiABP/GNSS_RTK/tree/main/NMEA_GNSS_to_GPS

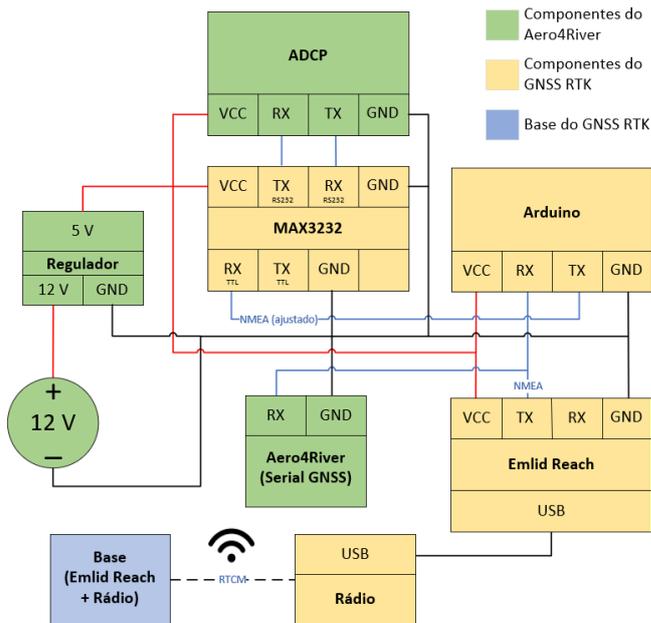


Figura 5. Ligação do GNSS RTK ao sistema do barco e ao ADCP.

da estação de controle em terra diretamente com o sensor ADCP. Originalmente essa comunicação é realizada por meio de um cabo de 10 m, que limita a movimentação do barco. O sistema que provê comunicação, geolocalização (por meio do GNSS RTK) e energia ao ADCP recebe o nome de PCM (do inglês, *Power Communications Module*). A Figura 6 apresenta o barco juntamente aos sistemas implementados.

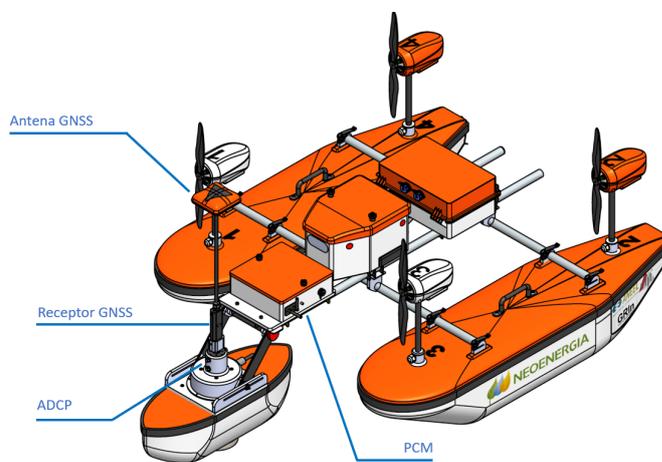


Figura 6. Modelagem 3D do Aero4River.

Para montar um equipamento de acordo com os circuitos descritos, é necessário a aquisição de componentes para a base e para o rover. Diferentemente da base, o rover conta com um arduino para adaptação do protocolo NMEA. O custo do equipamento é exibido na Tabela 1. No cálculo foi considerado uma cotação do dólar a R\$ 5,20 e taxas e impostos inclusos.

Com essa especificação, a base do sistema possui autonomia de aproximadamente 5 h de funcionamento e o rover é ligado ao sistema de alimentação do barco. O Xbee proporciona uma distância máxima de até 610 m entre

base e rover, de acordo com o fabricante Digi. Algumas alterações e melhorias são possíveis nesse sistema, como a substituição do XBee por um RFD900 (para aumento do alcance) e aumento da capacidade da bateria por exemplo. É válido ressaltar que a latência do sistema eletrônico e de comunicações é baixa o suficiente para não afetar o funcionamento do sistema.

Tabela 1. Custo do equipamento.

Componente	Quantidade	Custo
Emlid Reach	2	R\$ 4785,00
Antenas para o Emlid Reach	2	R\$ 1060,80
XBee S3B	2	R\$ 998,40
Antenas para XBee	2	R\$ 200,00
Adaptador USB/Serial	2	R\$ 80,00
Bateria 7,4 V, 4400 mAh	2	R\$ 150,00
Arduino Nano	1	R\$ 70,00
Regulador de tensão	2	R\$ 40,00
Placa metálica de 10mm x 10mm para antena	2	R\$ 100,00
Total		R\$ 7.484,20

A critério de comparação, a Tabela 2 traz alguns equipamentos semelhantes com valores mais baixos encontrados no mercado. Como é possível perceber, esses equipamentos possuem, em média, custo 3x superior quando comparados ao apresentado no presente trabalho. Além disso, alguns não trazem o conjunto completo necessário para operação.

Tabela 2. Equipamentos equivalentes.

Nome	Componentes	Custo
Navin RTK	Base, rover e link de comunicação	R\$ 31.500,00 ⁵
Reach M2 UAV RTK	Base, rover e link de comunicação	R\$ 26.960,00 ⁶
DJI D-RTK 2	Base e link de comunicação	R\$ 28.990,00 ⁷

O primeiro equipamento, o Navin RTK, apresenta o conjunto completo e pode ser integrado a robôs e quaisquer outros dispositivos que se comuniquem nos mesmos padrões do equipamento. Os dois últimos equipamentos: o *Reach M2* e o *DJI D-RTK 2* são direcionados a aplicações semelhantes à desse trabalho, sendo o *Reach M2* aplicado a drones e outros robôs móveis e o *D-RTK 2*, da DJI, que trata-se apenas da base do sistema e é compatível com drones da marca.

4.3 Análises e testes

Nas análises realizadas foi comparado o posicionamento absoluto por ponto simples (utilizado originalmente no barco) com o posicionamento relativo utilizando RTK. Nos testes utilizando o RTK, o tempo utilizado para determinação da posição da base foi de 15 minutos, valor arbitrário que possibilita a obtenção da posição média e

⁵ <https://loja.allcomp.com.br/produto/gnss-navin-rtk-c-par-de-radios.html>. Acesso em: 29 ago. 2022.

⁶ <https://loja.emlid.com.br/product/reachm2-uav-rtk-kit/>. Acesso em: 29 ago. 2022.

⁷ <https://www.dronedireto.com.br/dji-d-rtk-2-gnss-mobile-station-drone-matrice-series>. Acesso em: 29 ago. 2022.

que foi definido com base na experiência de operação do equipamento.

Testes cinemáticos Como o Aero4River se movimenta ao longo da coleta de dados, foram realizados testes cinemáticos de forma a verificar a acurácia do equipamento em movimento. Nos testes foi utilizada uma corda, com uma de suas pontas fixa a um poste (de coordenadas conhecidas) e a outra junto a uma pessoa que realizava trajetórias circulares com raio fixo de 5 m e 10 m. Foram realizadas aproximadamente 30 voltas.

A avaliação de cada uma das componentes E e N, individualmente, fornece uma senoide com valores de pico equivalentes ao raio da respectiva circunferência. Comparando esses valores, relativos ao movimento, aos valores de raio (referência) é possível obter a acurácia utilizando as Equações da Subseção 3.3. A Figura 7 exibe diferentes momentos do teste em uma mesma imagem, capturados por um drone.

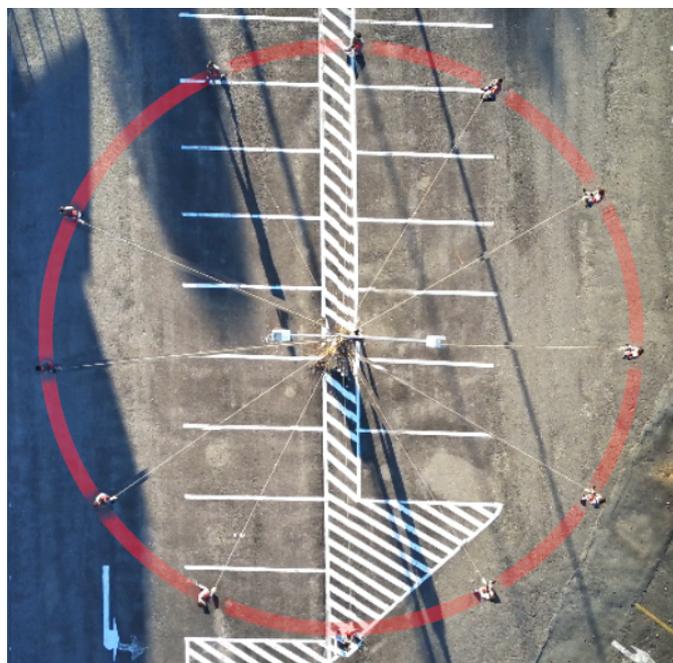


Figura 7. Trajetória do teste cinemático.

Utilizando os picos (mínimos e máximos) da senoide como valores medidos e os raios da circunferência (5 m e 10 m) como valores de referência foi possível aplicar as Equações 1 e 2. Os resultados podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3. Acurácia do RTK.

Componente	Acurácia (cm)
e	0,072
n	0,092
Planimétrico	0,117

No cenário de testes com o barco, o equipamento foi submetido a movimentos arbitrários em uma represa, com dois receptores GNSS embarcados e operando simultaneamente. Um dos receptores utilizou o posicionamento absoluto por ponto simples, enquanto o outro utilizou o posicionamento relativo usando o RTK. A Figura 8 exibe a trajetória realizada pelo barco em um dos testes, descrita por cada um dos receptores.

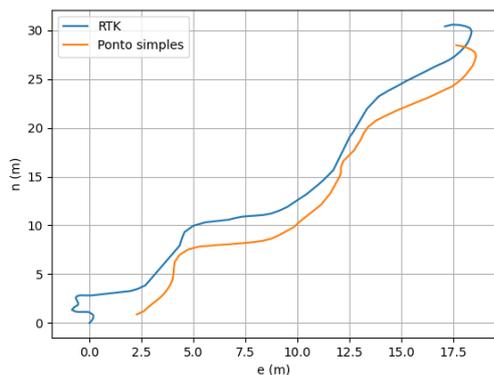


Figura 8. Trajetória do barco na represa.

Foram realizados três testes de travessia com ambos os receptores em funcionamento. A Tabela 4 exibe as análises⁸ realizadas de acurácia do receptor com posicionamento por ponto simples. Os dados gerados pelo receptor que utilizava o RTK foram utilizados como referência para cálculo da acurácia do receptor que operava com posicionamento por ponto simples.

Tabela 4. Acurácia do posicionamento por ponto simples.

Teste	Componente	Acurácia (m)
1	Leste	3,763
2	Leste	2,347
3	Leste	3,593
1	Norte	4,670
2	Norte	1,878
3	Norte	3,186
1	Planimétrico	5,997
2	Planimétrico	3,006
3	Planimétrico	4,802

O posicionamento por ponto simples possui maior susceptibilidade a condições atmosféricas, alterações de satélites, erros relativísticos, entre outros. Isso causa uma variação em sua acurácia, que permaneceu em valores que variaram entre 3 m e 6 m.

O posicionamento relativo utilizando RTK, por sua vez, possui acurácia de aproximadamente 12 cm de acordo com os testes (trajetórias em circunferência) realizados, o que garante uma navegação mais fiel ao planejamento de rota realizado.

É válido ressaltar que o movimento do barco em relação à água precisa ser previsto de forma acurada, visto que o cálculo da velocidade relativa da água pode ser afetado caso a movimentação do barco não seja verificada corretamente. Nesse caso, o RTK traz ganhos significativos, seja no posicionamento da embarcação, mas também nas medidas de vazão e profundidade realizadas pelo ADCP.

4.4 Utilização do RTK no ADCP

A fim de validar a conversão do protocolo NMEA, de forma a compatibilizar a aplicação do GNSS para fornecimento de dados ao ADCP, foram realizados testes⁹ de travessias com coleta de dados de profundidade. A Figura 9 mostra o perfil da região de travessia do barco em um desses testes.

⁸ https://github.com/GuiABP/GNSS_RTK/tree/main/Analises

⁹ <https://www.youtube.com/watch?v=W71Bhr0KxIU>

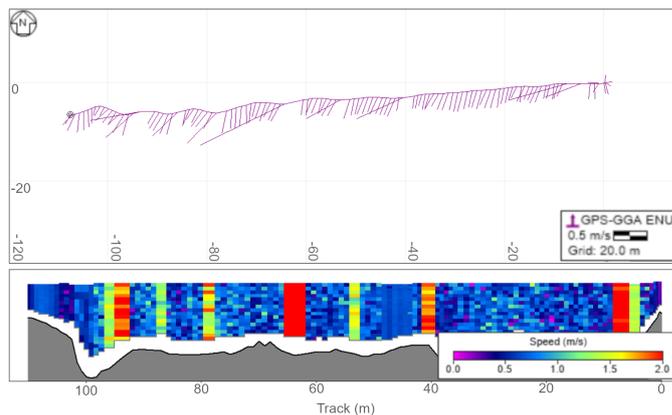


Figura 9. Trajetória do barco e perfil da região da travessia.

Nos testes, tanto a sentença GGA quanto a VTG estavam disponíveis para uso do ADCP e do sistema de navegação do barco, simultaneamente. O sistema possibilita a comunicação utilizando níveis lógicos RS232 (para o ADCP) e TTL (para o sistema de comunicação do barco). Além disso, as sentenças NMEA são disponibilizadas no formato GNGGA (para o ADCP, após adaptação da sentença) e também no formato original, GPGGA, para o sistema de navegação.

Com o sistema proposto, o ADCP é capaz de realizar as medições de vazão no rio e também verificar seus perfis. A Figura 10 mostra a base do sistema com o barco ao fundo.



Figura 10. Base e rover durante os testes.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou a montagem de um sistema GNSS usando RTK compatível com diferentes dispositivos e aplicado a uma embarcação autônoma do tipo ASV. De forma a viabilizar a comunicação, foram aplicadas interfaces de comunicação em diferentes níveis lógicos (TTL e RS232), além de um código em Arduino que viabiliza o uso no ADCP, fato que gera grande economia de projeto.

Nos testes realizados, o RTK apresentou acurácia centimétrica próxima a 12 cm em cenário cinemático, valor quantitativamente superior quando comparado aos 4,5 m

de acurácia obtidos nos testes com o receptor operando com posicionamento por ponto simples.

No cenário do barco, por exemplo, o valor de acurácia proporcionado pelo RTK garante navegação mais fiel às trajetórias planejadas. Além disso, o uso em conjunto com o sensor ADCP aumenta consideravelmente a qualidade dos dados coletados, visto que parâmetros como velocidade de navegação e posicionamento são cruciais nas leituras.

Com isso, conclui-se que o equipamento é capaz de proporcionar navegação acurada dentro do cenário analisado e com possibilidade de expansão para diferentes robôs. Os diagramas de montagem e códigos abertos possibilitam o desenvolvimento por outros pesquisadores. Além disso, os dispositivos utilizados (Arduino, Emlid Reach, Xbee, entre outros) são facilmente encontrados no mercado e o conjunto final apresenta custo bem inferior às soluções comerciais existentes, o que pode viabilizar seu uso em cenários com maiores limitações de verba.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Grupo de Robótica Inteligente (GRIn), da Universidade Federal de Juiz de Fora, por disponibilizar todo o equipamento e garantir o desenvolvimento da solução aqui apresentada e de outras soluções associadas. Os autores também agradecem ao CNPq e ao INERGE pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- Carvalho, A., Silva, J., and Poz, W. (2015). Análise estatística do posicionamento relativo a partir do auspos. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 21, 03–25. doi:10.1590/S1982-21702015000100002.
- Digi (????). 900 mhz long-range rf module. URL <http://www.digi.com/products/embedded-systems/digi-xbee/rf-modules/sub-1-ghz-rf-modules/xbee-pro-xsc>. Acesso em: 29 ago. 2022.
- Downs, B. (2018). Decoding nmea sentences. URL <http://brandidowns.com/?p=77>. Acesso em: 23 abr. 2022.
- Ferrer-González, E., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., and Martínez-Carricondo, P. (2020). Uav photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. *Remote Sensing*, 12, 2447. doi:10.3390/rs12152447.
- Gamaro, P.E.M. (2020). *Medição de vazão pelo método acústico Doppler (Avançado)*. Agência nacional de águas. URL <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerc/handle/ana/2188>. Acesso em: 23 abr. 2022.
- IBGE (2005). Altera a caracterização do sistema geodésico brasileiro. URL https://geofp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/pr_01_25fev2005.pdf. Acesso em: 23 abr. 2022.
- Janos, K. (2021). Evaluation of low-cost gnss receiver under demanding conditions in rtk network mode. *Sensors*, 21(16). doi:10.3390/s21165552. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/16/5552>.
- Madawalagama, S., Athukorala, R., Jayamal, K., Ochi, S., and Samarakoon, L. (2019). Assessment of uav based low cost photogrammetric system for aerial mapping.
- Monico, J.F.G. (2008). *Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações*. Editora UNESP, São Paulo, 2 edition.
- Seeber, G. (2008). *Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications*. MATHEMATIK GESAMT. De Gruyter. URL <https://books.google.com.br/books?id=qZTS6OI9NGoC>. Acesso em: 23 abr. 2022.
- Silva, M.F. (2021). *Projeto e alocação de controle de uma embarcação autônoma de superfície com 3 DoF e sistema de propulsão aéreo azimutal*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora.
- SiRF (2007). Nmea reference manual. URL <https://www.sparkfun.com/datasheets/GPS/NMEA%20Reference%20Manual-Rev2.1-Dec07.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2022.
- Skoglund, M., Petig, T., Vedder, B., Eriksson, H., and Schiller, E. (2016). Static and dynamic performance evaluation of low-cost rtk gps receivers [doi:10.1109/ivs.2016.7535357]. 16–19. doi:10.1109/IVS.2016.7535357.
- Valente, D., Momin, M., Grift, T., and Hansen, A. (2020). Accuracy and precision evaluation of two low-cost rtk global navigation satellite systems [doi:10.1016/j.compag.2019.105142]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 168. doi:10.1016/j.compag.2019.105142.