

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Guilherme Aparecido Barbosa Pereira

**Aplicação de um Sistema GNSS RTK de Baixo Custo a uma Embarcação
Autônoma de Superfície**

Juiz de Fora

2023

Guilherme Aparecido Barbosa Pereira

**Aplicação de um Sistema GNSS RTK de Baixo Custo a uma Embarcação
Autônoma de Superfície**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistemas de Energia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Edimar José de Oliveira

Co-orientador: Prof. Dr. Leonardo de Mello Honório

Juiz de Fora

2023

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Barbosa Pereira, Guilherme Aparecido.

Aplicação de um Sistema GNSS RTK de Baixo Custo a uma Embarcação
Autônoma de Superfície / Guilherme Aparecido Barbosa Pereira. – 2023.
113 f. : il.

Orientador: Edimar José de Oliveira

Co-orientador: Leonardo de Mello Honório

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Juiz de Fora, Facul-
dade de Engenharia Elétrica. Programa de Pós-graduação em Engenharia
Elétrica, 2023.

1. ADCP. 2. ASV 3. GNSS. 4. RTK. I. Oliveira, Edimar José, orient.
II. Honório, Leonardo de Mello, coorient. III. Título.

Guilherme Aparecido Barbosa Pereira

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

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Aprovada em 21 de março de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Edimar José de Oliveira - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Leonardo de Mello Honório - Coorientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Murillo Ferreira dos Santos

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. André Luis Marques Marcato

Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, 17/03/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Edimar Jose de Oliveira, Professor(a)**, em 22/03/2023, às 07:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Murillo Ferreira dos Santos, Usuário Externo**, em 22/03/2023, às 11:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo de Mello Honorio, Professor(a)**, em 22/03/2023, às 12:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andre Luis Marques Marcato, Professor(a)**, em 23/03/2023, às 10:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1190686** e o código CRC **BDC73A15**.

RESUMO

Os receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) podem garantir boa acurácia utilizando a técnica de posicionamento RTK (*Real Time Kinematic*), porém seu custo limita o uso em muitas aplicações. Este trabalho traz esquemas de montagem e códigos abertos de análise e implementação de um sistema RTK de baixo custo, denominado RTKBox, aplicado a um veículo autônomo de superfície com sensor embarcado 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 de aproximadamente 25% quando comparado a demais receptores do mercado. Além disso, os dispositivos utilizados no sistema proposto podem ser facilmente encontrados em mercado brasileiro, possibilitando a reprodução do sistema por outros pesquisadores e desenvolvedores que desejam utilizar receptores GNSS RTK em seus trabalhos. Foram realizados testes estáticos e cinemáticos, obtendo valor de acurácia planimétrica nos cenários estáticos de aproximadamente 0,05 m e no cenário cinemático aproximadamente 0,15 m. Esses valores foram comparados com outros encontrados em trabalhos relacionados e, com isso, concluiu-se que o equipamento possui desempenho suficiente para aplicações de navegação e aquisição de dados utilizando o ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*).

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

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 system, called RTKBox, 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 cost is approximately 25% of the value of other receivers found in the market. In addition, the devices used in the proposed system can be easily found in the Brazilian market, enabling other researchers and developers who wish to use RTK GNSS receivers in their projects to reproduce the system. These values were compared with other found in related works. Thus, the conclusion is that the equipment has sufficient performance for navigation applications and data acquisition using ADCP.

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

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Coleta de dados utilizando o ADCP realizada por operadores	17
Figura 2 – Foto da terceira versão do <i>Aero4River</i>	18
Figura 3 – Posição definida pela interseção das superfícies das três esferas	23
Figura 4 – Funcionamento básico da navegação por satélite	24
Figura 5 – Segmentos do sistema GNSS	25
Figura 6 – Diagrama simplificado de geração do sinal do satélite	27
Figura 7 – Sinal resultante do satélite após modulação	27
Figura 8 – Medida do tempo de retardo	28
Figura 9 – Princípio da medida da diferença de fase da onda portadora	29
Figura 10 – Refração do sinal na ionosfera e troposfera	31
Figura 11 – Multicaminho do sinal	32
Figura 12 – Quanto maior o volume, menor (e melhor) é o PDOP	34
Figura 13 – Conceito de posicionamento relativo	37
Figura 14 – Serviço PPP do IBGE	39
Figura 15 – Diagrama de blocos do receptor GNSS e suas interfaces	40
Figura 16 – Componentes da "rede" Ntrip	42
Figura 17 – Intel Edison integrada ao módulo GNSS u-blox M8T	47
Figura 18 – Conversor bidirecional TTL - RS-232	47
Figura 19 – Interface de um receptor GNSS via <i>display</i> e leds	48
Figura 20 – Emlid Flow - Notebook	48
Figura 21 – Emlid Flow - Smartphone	48
Figura 22 – Sistemas de coordenadas	50
Figura 23 – Produzindo um elipsoide de revolução	50
Figura 24 – Aproximação da superfície terrestre utilizando um geoide	51
Figura 25 – Aproximação da superfície terrestre utilizando um geoide	52
Figura 26 – Elipsoides de referência local	52
Figura 27 – Sistemas de coordenadas. Adaptado de (Wikipedia, 2021)	54
Figura 28 – Segunda versão do catamarã do projeto	59
Figura 29 – ADCP em sua operação convencional	59
Figura 30 – Periféricos opcionais do ADCP	63
Figura 31 – Esquema de funcionamento do PCM no barco	64
Figura 32 – Modelagem 3D do Aero4River	65
Figura 33 – Configurações do River Surveyor M9	66
Figura 34 – Diagrama do PCM proposto	67
Figura 35 – PCM (destacado) junto a demais componentes do Aero4River	67
Figura 36 – Módulo GNSS Emlid Reach	68

Figura 37 – Portas de comunicação do Emlid Reach	68
Figura 38 – TW4721	69
Figura 39 – XBee	69
Figura 40 – Antena, adaptador para o XBee, bateria e regulador de tensão	70
Figura 41 – Esquema de ligação	71
Figura 42 – Protótipo do sistema montado	71
Figura 43 – Pseudocódigo para ajuste da sentença NMEA	74
Figura 44 – Ligação do GNSS RTK ao sistema do barco e ao ADCP	76
Figura 45 – Pontos da faculdade de engenharia	78
Figura 46 – Série temporal do teste cinemático	79
Figura 47 – Trajetória do teste cinemático	79
Figura 48 – Base e rover	80
Figura 49 – Receptor embarcado	80
Figura 50 – Cenários/casos dos testes	81
Figura 51 – Equipamento montado em tripé de baixo custo	83
Figura 52 – Série temporal de teste utilizando posicionamento por ponto simples	84
Figura 53 – Série temporal de teste utilizando RTK via NTRIP	84
Figura 54 – Comparativo do REQM do presente trabalho e dos relacionados	86
Figura 55 – Comparativo do desvio padrão do presente trabalho e dos relacionados	88
Figura 56 – Probabilidade cumulativa	89
Figura 57 – Comparativo de acurácia em 95% da função de probabilidade acumulada	90
Figura 58 – Disponibilidade da solução fixa ao longo do teste	91
Figura 59 – Perdas da solução fixa por minuto	92
Figura 60 – Tempo médio de reaquisição da solução fixa	93
Figura 61 – Tempo para primeira solução fixa	94
Figura 62 – Trajetória realizada no teste cinemático	95
Figura 63 – Comparativo entre receptores no teste cinemático	95
Figura 64 – RiverSurveyor exibindo status de conexão correta com receptor GNSS RTK	97
Figura 65 – Trajetória do barco e perfil da região da travessia	98
Figura 66 – Trajetória do barco na represa	98
Figura 67 – Equipamento utilizado em marcação de pontos para plantio	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores típicos para cada fonte de erro	33
Tabela 2 – Informações contidas em uma sentença NMEA	44
Tabela 3 – Alguns tipos de sentenças NMEA	45
Tabela 4 – Alguns tipos de sentenças NMEA	45
Tabela 5 – Parâmetros do GRS80	55
Tabela 6 – Periféricos do ADCP	63
Tabela 7 – Características do ADCP	66
Tabela 8 – Especificações técnicas do Emlid Reach (u-blox M8T (UBLOX, 2020b))	69
Tabela 9 – Especificações técnicas do XBee (XBee-PRO XSC (DIGI, 2020))	70
Tabela 10 – Custo do equipamento	72
Tabela 11 – Equipamentos equivalentes	73
Tabela 12 – Especificações técnicas do sistema com 2 receptores	73
Tabela 13 – Raiz do erro médio quadrático das componentes e, n, u , horizontal e tridimensional	85
Tabela 14 – Desvio padrão das componentes e, n, u e horizontal	87
Tabela 15 – Acurácia horizontal (95% da função de distribuição acumulada)	88
Tabela 16 – Teste de disponibilidade do sinal em <i>fix</i> e/ou <i>float</i>	90
Tabela 17 – Teste de continuidade	91
Tabela 18 – Tempo para o primeiro fixo	93
Tabela 19 – REQM para os cenários dos testes cinemáticos	94
Tabela 20 – Testes realizados com o Aero4River e ADCP	96
Tabela 21 – Acurácia do posicionamento por ponto simples	99
Tabela 22 – Descrição dos campos da sentença GGA	111
Tabela 23 – Descrição dos campos da sentença VTG	112
Tabela 24 – Determinação do <i>checksum</i> em uma sentença NMEA	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i> , Perfilador hidroacústico de correntes
ASV	<i>Autonomous Surface Vessel</i> , Veículo autônomo de superfície aquática,
BIH	<i>Bureau International de l'Heure</i>
BKG	<i>Bundesamt für Kartographie und Geodäsie</i> , Agência alemã de cartografia e geodésia
CDF	<i>Cumulative distribution function</i> , Função de distribuição acumulada
CR	<i>Carriage return</i>
CS	<i>Checksum</i>
DGNSS	<i>Differential GNSS</i> , GNSS diferencial
DGPS	<i>Differential GPS</i> , GPS diferencial
DOP	<i>Dilution of Precision</i> , Diluição da precisão
DTS	<i>Data set</i> , Conjunto de dados
ERE	<i>User Range Error</i> , Erro de distância do usuário
EXOR	<i>Exclusive-or</i> , OU Exclusivo
GGA	Sentença NMEA de dados fixos de sistema de posicionamento global.
GIS	<i>geographic information system</i> , Sistema de informação geográfica
GLL	Sentença NMEA de posição geográfica (latitude e longitude).
GN	Abreviação para GNSS utilizada no protocolo NMEA
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> , Sistema Global de Navegação por Satélite
GP	Abreviação para GPS utilizada no protocolo NMEA
GPS	<i>Global Positioning System</i> , Sistema Global de Posicionamento
GRS80	<i>Geodetic Referente System 1980</i> , Sistema de referência geodésico 1980
GSA	Sentença NMEA de DOP e satélites ativos.
GSV	Sentença NMEA de número de satélites do GNSS na visualização.
IoT	<i>Internet of Things</i> , Internet das coisas
ITRS	<i>International Terrestrial Reference System</i>
IUGCC	<i>International Union of Geodesy and Geophysics</i>
LF	<i>Line feed</i>
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i>
NTRIP	<i>National Marine Electronics Association</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OTF	<i>On the fly</i>
PD	Pseudodistância
PDGNSS	<i>Precise Differential GNSS</i> , GNSS diferencial preciso
PDGPS	<i>Precise Differential GPS</i> , GPS diferencial preciso
PPP	<i>Precise point positioning</i> , Posicionamento por ponto preciso
PRN	<i>Pseudo Random Noise</i> , Código pseudoaleatório
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS

RF	Radiofrequência
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
RMC	Sentença NMEA de dados mínimos do GNSS específicos recomendados.
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft</i> , Aeronave Remotamente Pilotada
RS232	<i>Recommended Standard 232</i>
RTCM	<i>Radio Technical Commission for Marine Services</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i> , Posicionamento cinemático em tempo real,
SBC	<i>Single Board Computer</i> , Computador de placa única
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
TTFa	<i>Time to fix ambiguities</i>
TTFb	<i>Time to first fix</i> , Tempo para primeiro fixo
TTL	<i>transistor-transistor logic</i>
URE	<i>User Equivalent Range Error</i> , Erro de distância equivalente do usuário
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i> , Tempo Universal Coordenado
VTG	Sentença NMEA de curso sobre o solo e sobre a velocidade do solo.
ZDA	Sentença NMEA de hora e data.

LISTA DE SÍMBOLOS

δh	Erro de altitude
Δt	Erro de tempo
$\delta \lambda$	Erro de longitude
$\delta \phi$	Erro de latitude
$\epsilon \phi_R^S$	Erro da fase da onda portadora
ϵ_{PDR}^S	Erro da medida de pseudodistância
λ	Longitude
ϕ	Latitude
$\phi^S(t)$	Fase gerada no receptor no instante
ρ_T^S	Distância geométrica entre a antena do satélite e do receptor
σ_P	Desvio padrão associado à posição
σ_R	Desvio padrão da observação
c	Velocidade da luz no vácuo
dm	Efeitos do multicaminhamento do sinal
f	<i>flattening</i> , Achatamento
$G^R(t)$	Sinal gerado no receptor
$G^S(t)$	Sinal gerado no satélite
h	<i>Height</i> , Altitude
I_R^S	Refração atmosférica oriunda da ionosfera
N_R^S	Ambiguidade de fase
$REQM_{3D}$	Raiz do erro quadrático médio tridimensional (3D)
$REQM_e$	Raiz do erro quadrático médio da componente
$REQM_H$	Raiz do erro quadrático médio planimétrico (horizontal)
$REQM_n$	Raiz do erro quadrático médio da componente
$REQM_u$	Raiz do erro quadrático médio da componente
t	Instante de recepção do sinal no receptor
t_r	Tempo registrado no receptor no instante da recepção do sinal do satélite
t_s	Tempo registrado no satélite no instante da transmissão do sinal
T_R^S	Refração atmosférica oriunda da troposfera

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	19
1.3	TRABALHOS RELACIONADOS	20
1.4	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	21
1.5	RESULTADO DA PESQUISA	22
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	SISTEMA GLOBAL DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE	23
2.1.1	Segmentos do sistema GNSS	24
2.2	OBSERVÁVEIS E ERROS NAS MEDIÇÕES	26
2.2.1	Observáveis GNSS	26
2.2.1.1	<i>Pseudodistância</i>	26
2.2.1.2	<i>Fase da onda portadora</i>	29
2.2.2	Fontes de erro no sistema GNSS	30
2.2.2.1	<i>Geometria dos satélites</i>	33
2.3	MÉTODOS DE POSICIONAMENTO GNSS	35
2.3.1	Posicionamento por ponto simples	35
2.3.2	Posicionamento relativo	35
2.3.2.1	<i>GNSS diferencial</i>	36
2.3.2.2	<i>Posicionamento cinemático em tempo real (RTK)</i>	38
2.3.3	Posicionamento por ponto preciso	39
2.4	INTERFACES DE DADOS	40
2.4.1	Formato RINEX	40
2.4.2	Formato RTCM	41
2.4.3	Protocolo Ntrip	41
2.4.4	Padrão de comunicação NMEA-0183	43
2.4.4.1	<i>Estrutura do protocolo</i>	43
2.5	COMPONENTES DE UM RECEPTOR GNSS	45
2.6	SISTEMAS DE COORDENADAS	49
2.7	REPRESENTAÇÕES DA SUPERFÍCIE TERRESTRE	49
2.7.1	Elipsoide	50
2.7.2	Geoide	51
2.8	SISTEMAS DE REFERÊNCIA	51
2.9	CONVERSÃO DE COORDENADAS	53
2.10	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO EQUIPAMENTO	56
2.10.1	Acurácia	56

2.10.2	Disponibilidade	57
2.10.3	Continuidade	57
2.10.4	Tempo para primeiro fixo	58
2.11	EMBARCAÇÃO AUTÔNOMA DE SUPERFÍCIE	58
2.12	Perfilador hidroacústico de correntes	58
2.13	CONCLUSÕES	60
3	MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.1	MOTIVAÇÃO E DESCRIÇÃO DO SISTEMA	62
3.2	ADCP UTILIZADO	65
3.3	PROPOSTA DO PCM	67
3.4	PROPOSTA DO RTKBOX	68
3.4.1	MÓDULO GNSS UTILIZADO	68
3.4.2	Comunicação base/rover e componentes de energia do sistema	69
3.4.3	Circuito elétrico	71
3.4.4	Custo e especificações	72
3.5	INTEGRAÇÃO ENTRE RECEPTOR GNSS E ADCP	74
3.5.1	Ajuste da sentença NMEA	74
3.5.1.1	<i>Cálculo do checksum</i>	75
3.5.2	Circuito eletrônico	75
3.6	PROCEDIMENTO DE COLETA DE DADOS	77
3.6.1	Testes estáticos	77
3.6.2	Testes cinemáticos	78
3.6.3	Testes com o Aero4River	80
3.7	ANÁLISE DOS DADOS	80
3.8	CONCLUSÕES	82
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
4.1	TESTES ESTÁTICOS	83
4.1.1	Acurácia	85
4.1.2	Disponibilidade	90
4.1.3	Continuidade	91
4.1.4	Tempo para primeira solução fixa	93
4.2	TESTES CINEMÁTICOS	94
4.3	APLICAÇÃO DO SISTEMA NO AERO4RIVER E NO ADCP	96
4.4	OUTRO EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO EQUIPAMENTO	99
4.5	CONCLUSÕES	99
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
5.1	TRABALHOS FUTUROS	102
	REFERÊNCIAS	104
	APÊNDICE A – CONFIGURAÇÃO DO EMLID REACH	109

A.1 – CONFIGURAÇÕES DA BASE	109
A.2 – CONFIGURAÇÕES DO ROVER	110
ANEXO A – ESTRUTURA DAS SENTENÇAS NMEA GGA E VTG	111
A.1 – Estrutura da sentença GGA	111
A.2 – Estrutura da sentença VTG	112
ANEXO B – Exemplo de cálculo do <i>checksum</i> de uma sentença NMEA	113

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

De acordo com o ONS (ONS, 2023), o Brasil tem capacidade instalada de geração de energia elétrica de aproximadamente 109.000 MW, oriunda de hidrelétricas. Isso corresponde a 60,3% de toda a capacidade instalada levando em consideração as demais fontes de geração. Para manter essa capacidade, o sistema depende de reservatórios hídricos presentes em todas as regiões do Brasil.

Dessa forma, o levantamento das condições hídricas de reservatórios de geração hidrelétrica se apresenta como uma tarefa fundamental para aferição de variáveis importantes do Sistema Interligado Nacional (SIN), que alimentam bases de dados de níveis, volumes e vazões de água. Esses dados são utilizados para definição do despacho em todas as usinas do SIN, tendo impacto direto nos preços de energia, impacto ambiental e segurança na região dos reservatórios.

Para realização desse levantamento, é necessário que se tenha conhecimento da quantidade e qualidade da água que abastece os reservatórios hidrelétricos, sendo essa medida fornecida pela métrica de curva-vazão (REGINA, 2021). A extensa área de rios e reservatórios a serem verificados justifica o uso da técnica de medição acústica no levantamento hídrico (CRUZ; SANTOS, 2017), que é comumente realizada utilizando um perfilador hidroacústico de corrente (ADCP, do inglês *Acoustic Doppler Current Profiler*).

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). Dentre as vantagens desse sensor, destacam-se:

- Maior rapidez de medição e cálculo da vazão (CRUZ; SANTOS, 2017) (SIMPSON, 2001) quando comparado a métodos tradicionais como, por exemplo, o uso de molinetes hidrométricos ¹ (VILANOVA; BALESTIERI, 2013);
- Cobertura de maiores áreas, devido a praticidade de uso do equipamento, com menores equipes (CRUZ; SANTOS, 2017);
- Grande quantidade de informações hidráulicas secundárias geradas, como dados geométricos da seção, perfis hidrodinâmicos, entre outros) (VILANOVA; BALESTIERI, 2013).

¹Molinete hidrométrico é um equipamento que consiste em uma hélice submersa cuja rotação é relacionada a uma grandeza elétrica proporcional à velocidade do líquido (MOTTA, 2016).

Normalmente a operação utilizando esse sensor é realizada em uma embarcação tripulada ou com pessoas em ambas as margens do rio, onde uma corda é atravessada transversalmente auxiliando a travessia da plataforma com o sensor, conforme visto na Figura 1.

Figura 1 – Coleta de dados utilizando o ADCP realizada por operadores



Fonte: (SONTEK, 2015)

Alguns problemas dessa abordagem são:

- Número de pessoas envolvidas e risco envolvido na operação;
- Maior aparato de equipamentos como barcos, cordas, equipamentos de proteção individual etc;
- Ausência de procedimentos adequados, como controle correto da velocidade da embarcação e manutenção de trajetória retilínea (CRUZ; SANTOS, 2017);
- Distúrbios gerados pelo sistema de propulsão ou movimentação do barco que podem gerar ruídos às medidas;
- Custo envolvido na operação.

Para solucionar esses problemas, preservando o uso e os benefícios do ADCP, foram inseridas as missões autônomas e semiautônomas utilizando os chamados veículos autônomos de superfície aquática (ASV, do inglês *Autonomous Surface Vessel*) (SILVA, 2021).

Esses veículos podem ser encontrados em diferentes topologias, sendo teleoperados ou com navegação autônoma/semiautônoma, de combustão interna ou elétricos, com um ou dois cascos etc. A topologia do barco utilizado nessa dissertação é do tipo catamarã, com dois cascos paralelos que garantem maior estabilidade de navegação. O barco possui propulsão aérea com esquema de controle proposto por Silva (2021) e geometria proposta por Regina (2021), sendo esse um grande diferencial para utilização juntamente ao ADCP,

já que o sensor não sofre interferência oriunda dos motores que ficam acima da superfície da água. O barco é denominado *Aero4River* e pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Foto da terceira versão do *Aero4River*



Fonte: Grupo de Robótica Inteligente

O Aero4River utiliza uma placa controladora de navegação *Cube Orange*, responsável por integrar os diferentes sensores de navegação da embarcação, além de conter toda a implementação com as rotinas de controle e filtros necessários para movimentação. Um dos periféricos da *Cube Orange* é receptor GNSS Here 3, que utiliza um módulo u-blox M8P, que possui acurácia horizontal de 2,5 m (UBLOX, 2020a), conforme especificação do fabricante. Nesse cenário, a aplicação de 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*) pode trazer grande ganho.

O ADCP, por sua vez, precisa conhecer a sua própria velocidade de deslocamento para que essa seja levada em consideração no cálculo da vazão de água no local. Para isso, geralmente são usadas técnicas como o *bottom tracking* ou o receptor GNSS.

O *bottom tracking* consiste em um rastreamento, realizado pelo ADCP com seu transdutor vertical, do fundo do rio que permite definir a velocidade de deslocamento do sensor. Essa técnica pode ser afetada por erro inserido à velocidade do barco caso haja desprendimento de material do leito do rio ou intenso transporte de sedimentos, fenômeno esse denominado fundo móvel (GAMARO, 2020). Esse erro é comum e acarreta

no fornecimento de uma curva-vazão errônea, porém pode ser mitigado/eliminado com a utilização de um receptor GNSS RTK integrado ao ADCP.

Dessa forma, chega-se à conclusão de que a navegação da ASV e aquisição de dados com o ADCP pode ser otimizada com o uso de receptores GNSS empregando a técnica de posicionamento RTK. O erro de posição pode ser reduzido da ordem métrica para centimétrica e as coletas do ADCP podem ser melhoradas por meio de um cálculo mais acurado da velocidade da embarcação. Apesar dessas vantagens, o alto custo desse sistema é o maior impedimento para sua utilização.

1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

O presente trabalho foi desenvolvido dentro do contexto do projeto Aero4River, PD-00453-0017/2017, que visa o desenvolvimento de uma embarcação para aquisição de descargas líquidas e sólidas e monitoramento da sedimentação de rios (NEOENERGIA, 2021).

Conforme mencionado, o sensor utilizado para realização dessa tarefa é um ADCP, que necessita de periféricos e equipamentos extras para operação correta e otimizada. 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 comunicação (PCM, do inglês *Power Communications Module*) e os receptores GPS RTK. Para minimização de custos de projeto, a versão adquirida não contou com nenhum dos opcionais, criando a necessidade do estudo e desenvolvimento de soluções próprias que otimizassem a navegação da ASV e aquisição de dados do ADCP.

Como a velocidade do ADCP é um fator determinante para aquisição de descargas líquidas e sólidas do rio, o principal objetivo do trabalho foi o desenvolvimento e análise de um receptor GNSS RTK para fornecimento dos dados acurados de velocidade e posição. Os sistemas RTK têm, normalmente, custo de dezenas de milhares de reais e, com isso, o sistema GNSS projetado teve como objetivo garantir a acurácia e bom desempenho na operação mantendo o menor preço possível.

O ADCP adquirido utiliza um cabo de 10 m, ligado constantemente ao operador, a fim de transmitir as informações das coletas em tempo real. Para a ASV, a utilização de um cabo curto preso constantemente à sua estrutura significa uma grande perda de mobilidade e aumento da dificuldade nas operações e, por essa razão, um dos objetivos foi desenvolver uma versão própria do PCM com inclusão de um link de dados sem fio para resolver esse problema.

Com o sistema proposto já prototipado, foram realizados testes práticos para verificação do funcionamento do PCM e, principalmente, da avaliação de desempenho do

sistema GNSS RTK. Portanto, almejou-se a otimização da operação da embarcação por meio de comunicação sem fio, que proporciona segurança e agilidade, e do ADCP por meio da melhora das informações coletadas utilizando o sistema GNSS RTK. Além disso, também foi objetivo da dissertação proporcionar um sistema RTK de baixo custo, com utilização de dispositivos facilmente encontrados em mercado nacional e com possibilidade de aplicação em outros trabalhos.

1.3 TRABALHOS RELACIONADOS

No trabalho de Sanna, Pisanu e Garau (2022) foram realizados testes e análises comparativas do receptor de baixo custo, u-blox F9P, com modelos profissionais de uso em aplicações geodésicas, como o Topcon GRS1. Foram utilizadas antenas profissionais do modelo *choke ring* como a ASH701945C_M fabricada pela Ashtech e a Trimble Zephyr Geodetic 2. O autor chega a resultados de acurácia milimétricos que, apesar da variabilidade nos diferentes testes, se apresentou muito bom em comparação aos receptores mais caros.

O artigo de Jackson et al. (2018) também traz a análise de receptores de baixo custo, além de profissionais testados em cenários estáticos e cinemáticos, com avaliações de métricas como disponibilidade, continuidade, tempo para primeira solução fixa, entre outros. Foram realizados testes em três cenários: rural, suburbano e urbano, de forma evidenciar as diferenças de desempenho do sistema em ambientes com diferentes níveis de visibilidade do céu e de obstruções.

O trabalho de (MADAWALAGAMA et al., 2019) aborda a utilização de um GNSS de baixo custo para mapeamentos com drones, que se beneficiam consideravelmente por meio da utilização do posicionamento RTK. Utilizando o equipamento de baixo custo, o autor consegue obter acurácia de ordem centimétrica com um equipamento que possui custo de aproximadamente metade das demais soluções utilizadas no comparativo apresentado.

O trabalho de (RADOCAJ et al., 2022) aborda a aplicação de um GNSS de baixo custo em máquinas agrícolas que se movimentam durante suas operações rotineiras. São avaliados cenários distintos que contemplam a utilização do sistema de posicionamento croata (semelhante à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas (RBMC)), composto por estações geodésicas que enviam correções de posição. Também são avaliados cenários com correções a partir de uma base individual e de um smartphone utilizando posicionamento absoluto. O autor chega a valores de acurácia posicional de 2,9 cm utilizando as correções enviadas a partir de base independente e conclui que é possível aplicar esse sistema a maquinários agrícolas.

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.

Para avaliação de desempenho do sistema proposto nesse trabalho, os resultados foram comparados com os obtidos por Sanna, Pisanu e Garau (2022), Jackson et al. (2018) e Madawalagama et al. (2019), que utilizaram métricas de desempenho semelhantes às utilizadas nessa dissertação, conforme visto na Seção 2.10.

1.4 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Destacam-se aqui as principais contribuições do trabalho e pontos de destaque quando comparado aos trabalhos relacionados:

- As referências amplamente utilizadas encontradas em português são antigas e não abordam tecnologias lançadas recentemente. O presente trabalho apresenta novos receptores e sua aplicabilidade e integração com sistemas embarcados como os presentes em *drones*. É apresentada a relação do receptor GNSS RTK com o ADCP e com o sistema de navegação de *firmwares* amplamente utilizados em veículos autônomos, conteúdo esse não encontrado em outros trabalhos;
- O presente trabalho possibilita a reprodução do sistema por meio dos circuitos expostos e dos códigos disponibilizados em repositório aberto, possibilitando ao leitor a montagem do sistema e aplicação em seu próprio projeto. Além disso, seus componentes podem ser encontrados no Brasil com custo total inferior a R\$ 10.000,00, sendo esse projeto mais viável para o pesquisador/desenvolvedor brasileiro quando comparado aos apresentados em trabalhos internacionais;
- O trabalho traz resultados de testes estáticos e cinemáticos comparados a outros trabalhos presentes na literatura. Foram encontrados poucos trabalhos acadêmicos explorando as métricas de desempenho de receptores GNSS RTK de baixo custo. Os trabalhos exploram, geralmente, as nuances da aplicação específica, deixando de lado características e vantagens importantes do sistema RTK que são abordadas nesse trabalho;
- O sistema desenvolvido nesse trabalho é aplicado a um ASV de topologia inovadora com 3 graus de liberdade e propulsão aérea, conforme os trabalhos de (REGINA et al., 2021) e (SILVA et al., 2020). Dentre os trabalhos desenvolvidos no contexto do projeto Aero4River, esse é o que mais se concentra no *payload* da embarcação, o ADCP, e nos subsistemas necessários para otimização de seu funcionamento. A

análise técnica e o estudo dos sistemas permitem, ainda, a aplicação do sistema a quaisquer outros robôs teleoperados, autônomos ou semiautônomos.

1.5 RESULTADO DA PESQUISA

A pesquisa e desenvolvimento realizados ao longo da dissertação deram origem às seguintes ações e publicação relacionada:

- Artigo publicado e apresentado no XXIV Congresso Brasileiro de Automática: "*Aplicação de um sistema GNSS RTK de baixo custo a uma embarcação autônoma de superfície*" (PEREIRA et al., 2022).
 - Autores: Guilherme Aparecido Barbosa Pereira, Leonardo de Mello Honório, Edimar José de Oliveira e Alessandro Salles Carvalho;
 - Contribuição: Apresentação e análises do projeto e integração de um sistema GNSS RTK aplicado à terceira versão da embarcação Aero4River.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O documento apresenta uma estrutura dividida conforme descrito a seguir.

O capítulo 2 apresenta toda a fundamentação teórica utilizada no desenvolvimento. São apresentados os conceitos básicos que envolvem o sistema GNSS e semelhantes, interfaces de dados e protocolos amplamente utilizados para obtenção dos dados de posição, envio de correções da base para o rover etc. Também são apresentadas as conversões entre os diferentes sistemas de coordenadas e os conceitos envolvidos e, por fim, apresentadas métricas comuns para avaliação do desempenho do sistema GNSS e conceitos relacionados ao sensor ADCP e à embarcação autônoma de superfície.

O capítulo 3 mostra a descrição de *hardware*, incluindo todos os equipamentos utilizados, seus respectivos valores de mercado e os circuitos que possibilitam a montagem do sistema. Também são apresentadas descrições dos códigos implementados para o correto funcionamento, além dos procedimentos utilizados para os testes e avaliação dos resultados.

No capítulo de 4 são apresentados os resultados contemplando todos os testes realizados e métricas que possibilitam a avaliação do sistema. Os dados obtidos foram comparados com resultados obtidos em outros trabalhos relacionados, fornecendo um critério de comparação que possibilita ao leitor avaliar a qualidade e aplicabilidade do equipamento.

Por fim, o capítulo 5 apresenta uma síntese do conteúdo abordado, apresentando a conclusão do trabalho e as perspectivas de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As seções presentes neste capítulo apresentam o suporte teórico necessário para entendimento dos diferentes conceitos abordados nesse trabalho.

2.1 SISTEMA GLOBAL DE NAVEGAÇÃO POR SATÉLITE

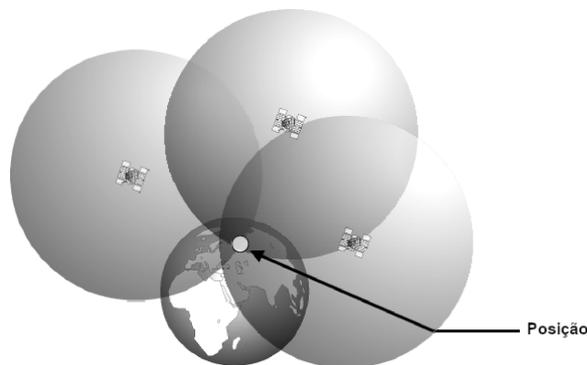
A navegação por satélite é um método que emprega o sistema GNSS para determinar a posição e o tempo de algo ou alguém em qualquer lugar do globo terrestre (UBLOX, 2009). Os receptores GNSS são utilizados para diversas aplicações como mapeamentos topográficos e geodésicos, agricultura de precisão, robótica móvel, aviação, navegação marítima, dentre outros.

Usando um sistema GNSS pode-se obter, em qualquer lugar do planeta, as seguintes informações (UBLOX, 2009):

- Posição (latitude, longitude e altitude) com acurácia entre 20 m e 1 mm;
- Tempo (no Tempo Universal Coordenado (UTC)) com acurácia entre 60 ns e 5 ns.

Para determinação da posição no espaço tridimensional é preciso que um receptor, em algum lugar do planeta, receba os sinais de, no mínimo, três satélites em tempo real. Se for possível determinar a distância a esses satélites, pode-se afirmar que todas as possíveis soluções de posição estão na interseção das superfícies das três esferas centradas nos satélites mencionados, conforme exibido na Figura 3.

Figura 3 – Posição definida pela interseção das superfícies das três esferas



Fonte: (UBLOX, 2009)

Para que o cálculo de posição seja realizado corretamente, é preciso que o relógio do satélite e do receptor estejam sincronizados. Se não houver sincronia e a diferença do relógio do satélite e do receptor for de $1\mu s$, por exemplo, o erro de posição pode ser de 300

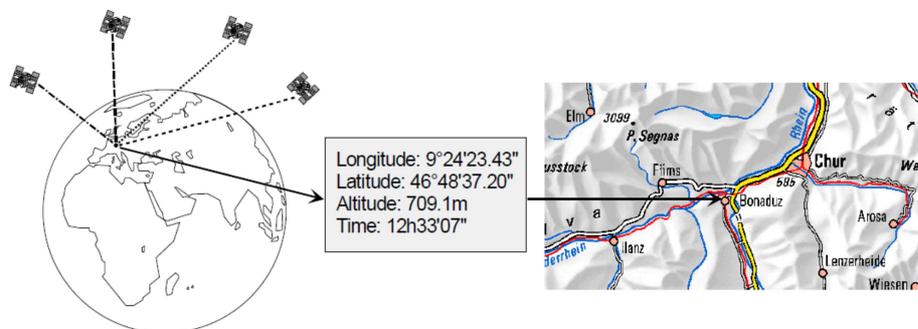
m. Como os relógios não são, geralmente, sincronizados, tornam-se necessárias medidas para que o erro seja mitigado.

Se as medidas de posição são acompanhadas de um erro de tempo desconhecido (Δt), então o sistema resultante possui 4 variáveis:

- Longitude (λ);
- Latitude (ϕ);
- Altitude (h , do inglês *height*);
- Erro de tempo (Δt).

Dessa forma, as quatro variáveis exigem quatro equações, que podem ser obtidas por meio de quatro satélites distintos (UBLOX, 2009). Com isso, para que a posição seja corretamente determinada, é necessário que o receptor em terra receba sinal de, no mínimo, quatro satélites. A velocidade e a direção da navegação derivam dessas informações. A Figura 4 exemplifica o funcionamento do sistema.

Figura 4 – Funcionamento básico da navegação por satélite



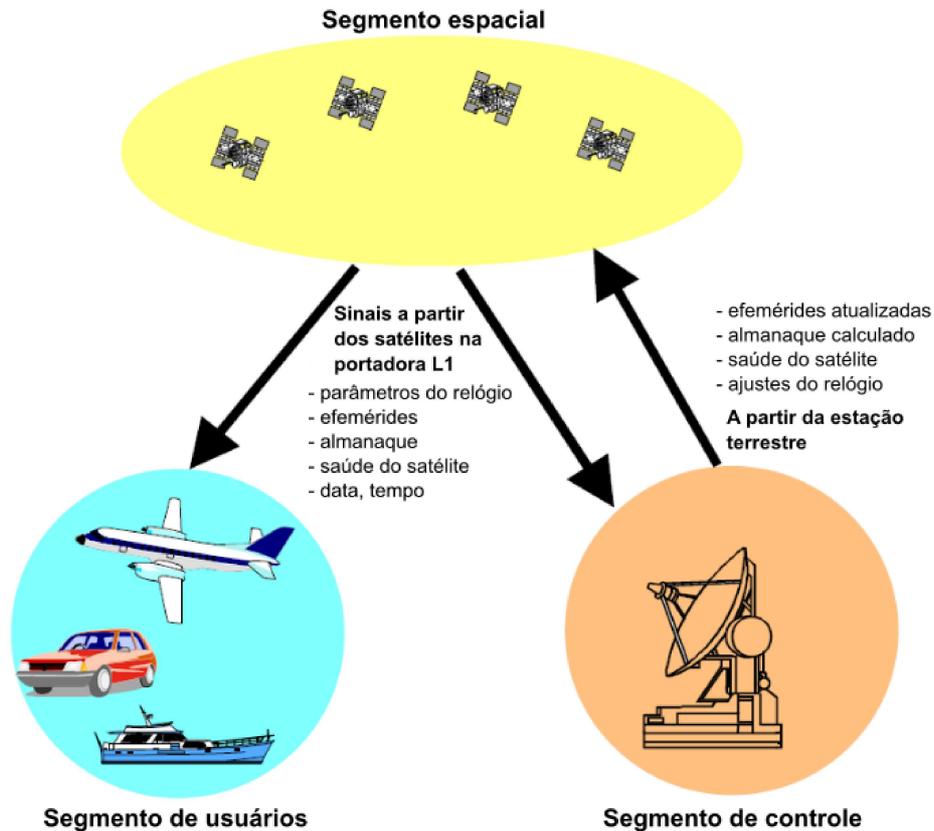
Fonte: (UBLOX, 2009)

Apesar do Sistema de Posicionamento Global (GPS, do inglês *Global Positioning System*) ser o mais popular, existem diferentes sistemas em operação: GPS (Estados Unidos), GLONASS (Rússia), Galileo (União Europeia), BeiDou (China), além dos regionais IRNSS (Índia) e QZSS (Japão). Essa coleção de sistemas de posicionamento é, atualmente, denominada Sistema Global de Navegação por Satélite, ou GNSS (NOVATEL, 2015).

2.1.1 Segmentos do sistema GNSS

Os sistemas GNSS consistem de três segmentos: espacial, de controle e de usuários (MONICO, 2008), conforme visto na Figura 5.

Figura 5 – Segmentos do sistema GNSS



Fonte: Adaptado de (UBLOX, 2009)

- Segmento espacial: é composto por satélites dos sistemas orbitando aproximadamente 20000 km acima da superfície terrestre. São enviadas diversas informações como:
 - Parâmetros do relógio: são enviados para que o segmento de controle verifique e envie as devidas correções;
 - Efeméride: trata-se da descrição matemática da órbita de um satélite. Essa informação é necessária para que o receptor calcule a posição do satélite no espaço em um determinado instante de tempo;
 - Almanaque: utilizado para predição da posição de todos os satélites da constelação. É uma informação menos acurada que a efeméride e é utilizada para encontrar os satélites na inicialização e também durante a navegação, possibilitando ao receptor calcular quais satélites estarão visíveis no horizonte em uma determinada localização e tempo;
 - Saúde do satélite: se o satélite estiver apresentando algum problema ou sua órbita estiver sendo ajustada, é emitido uma mensagem indicando que ele está fora de serviço.

- Data e tempo: para referencia temporal das informações.
- Segmento de controle: está em terra e é responsável por ajustar e enviar de volta ao satélite os parâmetros das órbitas e os relógios dos satélites, quando necessário, para manter a acurácia (NOVATEL, 2015) do sistema;
- Segmento de usuários: compreende aplicações militares e civis, como as mencionadas anteriormente. É o segmento que faz uso dos sinais do sistema GNSS para obter a localização de receptores sobre a superfície terrestre em diferentes aplicações. É onde a proposta de equipamento e análises realizadas no presente trabalho se concentram.

2.2 OBSERVÁVEIS E ERROS NAS MEDIÇÕES

Para entender a razão que justifica a utilização do GNSS RTK é necessário, primeiramente, entender as observáveis GNSS e os erros do sistema que reduzem a acurácia de um receptor operando individualmente.

2.2.1 Observáveis GNSS

A posição, velocidade e tempo podem ser definidas a partir das seguintes observáveis básicas do GNSS (MONICO, 2008):

- Pseudodistância a partir do código;
- Fase da onda portadora ou diferença de fase da onda portadora.

2.2.1.1 Pseudodistância

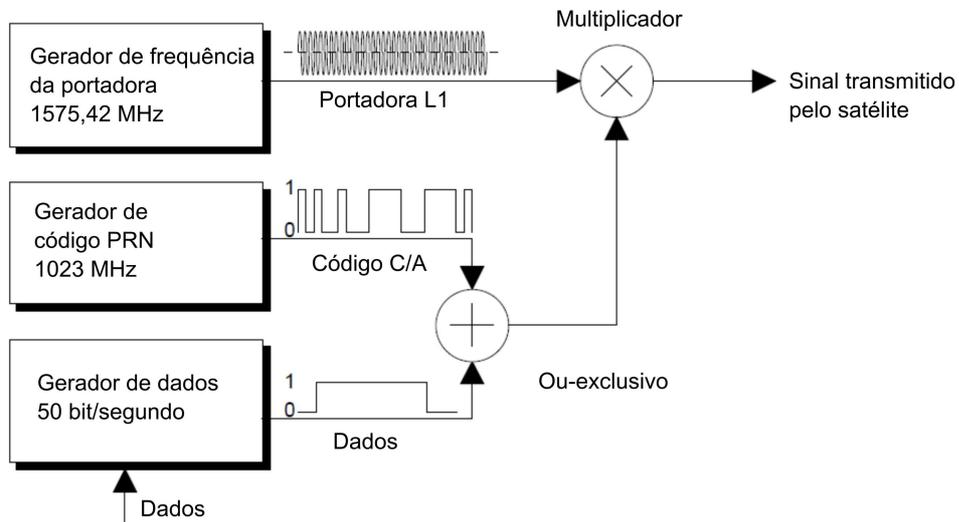
Para entender o conceito da pseudodistância é preciso compreender a forma como os satélites emitem seus sinais. Para o caso específico do GPS (ocorre de forma semelhante nos demais sistemas), cada satélite transmite dois sinais, simultaneamente, para os propósitos de posicionamento: o sinal L1, baseado na portadora com frequência 1575,42 MHz, e o sinal L2, com frequência 1227,60 MHz (MONICO, 2008). Um dos sinais modulados na portadora L1 é o código pseudoaleatório (PRN, do inglês *Pseudo Random Noise*), que é uma sequência binária de +1 e -1, ou 0 e 1, de característica semelhante a aleatória e gerada por um algoritmo (MONICO, 2008). Cada um dos satélites em órbita possui relógios atômicos que, por meio de seus pulsos, permitem ao sistema gerar as frequências para as seguintes operações do sistema (UBLOX, 2009):

- A mensagem de navegação a 50 Hz;
- O código C/A (*Coarse/Acquisition*, com comprimento de onda de aproximadamente 300 m, transmitido a 1,023 MHz e que modula a mensagem de navegação utilizando um operador *ou-exclusivo* (EXOR, do inglês *exclusive-or*);

- Geração da onda portadora L1 a 1575,42 MHz.

A Figura 6 exibe um diagrama simplificado de geração do sinal do satélite.

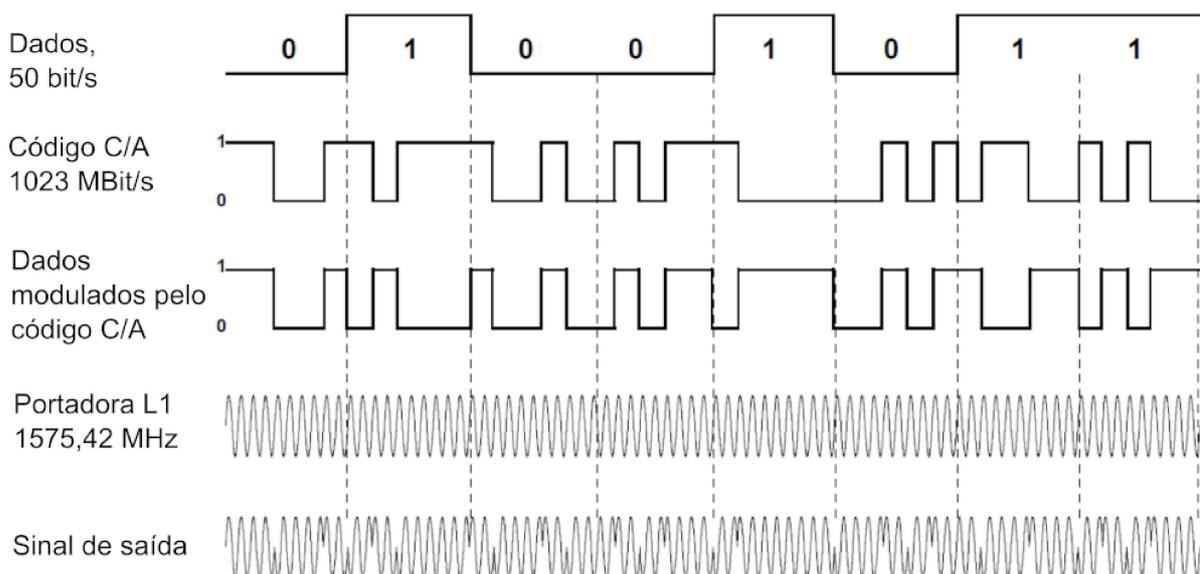
Figura 6 – Diagrama simplificado de geração do sinal do satélite



Fonte: Adaptado de (UBLOX, 2009)

A mensagem de navegação é modulada utilizando o código C/A e o resultado é modulado novamente por meio de uma operação de multiplicação com a onda portadora, conforme visto na Figura 7.

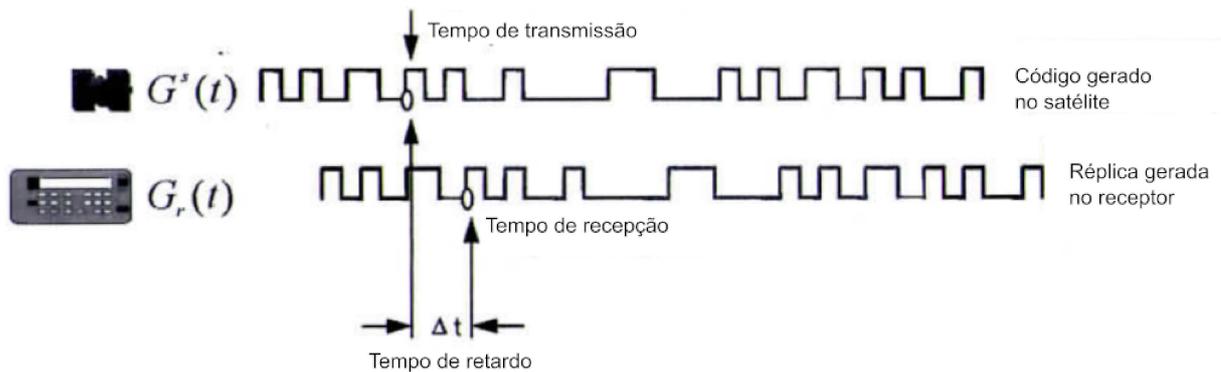
Figura 7 – Sinal resultante do satélite após modulação



Fonte: Adaptado de (UBLOX, 2009)

Ao receber o sinal, o receptor GNSS gera uma réplica do código produzido no satélite e, a partir de técnicas de correlação de código, consegue obter o retardo entre a chegada de uma transição específica do código do sinal gerado no satélite, $G^S(t)$, e o sinal gerado por ele próprio, $G^R(t)$, conforme visto na Figura 8. É válido ressaltar que esse processo ocorre para cada um dos satélites cujo receptor recebe o sinal.

Figura 8 – Medida do tempo de retardo



Fonte: Adaptado de (MONICO, 2008)

A diferença entre o tempo t_r registrado no receptor no instante da recepção do sinal e o tempo t_s , registrado no satélite no instante de transmissão do sinal, multiplicado pela velocidade da luz no vácuo (c) resulta na pseudodistância (PD) (denominada assim devido à não sincronia dos relógios do satélite e receptor). Com isso, a pseudodistância não resulta na distância geométrica ρ_T^S entre a antena do satélite e do receptor, em razão, entre outros fatores, da refração atmosférica (ionosfera (I_R^S) e troposfera (T_R^S)) e dos efeitos de multicaminhamento do sinal (*multipath* = dm), além de outros erros (orbital, por exemplo). A Equação 2.1 descreve a pseudodistância (MONICO, 2008).

$$PD_S^R = \rho_R^S + c[dt_R - dt^S] + I_R^S + T_R^S + dm_R^S + \epsilon_{PD_R}^S \quad (2.1)$$

em que

$\epsilon_{PD_R}^S$ é o erro da medida de pseudodistância.

Conforme mencionado anteriormente, o código C/A é gerado a uma frequência de 1,023 MHz, possui comprimento de onda de 300 m e é transmitido somente na onda portadora L1 (SEEBER, 2003). Em um nanossegundo a onda percorre uma distância de 30 cm, portanto, erros pequenos na medida de tempo podem resultar em grandes erros na medida de posição (NOVATEL, 2015), sendo esse um dos problemas de exatidão na determinação da posição usando a pseudodistância e uma das justificativas para uso da fase da onda portadora como observável principal, quando aplicável.

2.2.1.2 Fase da onda portadora

A fase da onda portadora (ϕ_R^S) é dada pela diferença entre a fase do sinal do satélite, recebido no receptor (ϕ^S), e a fase do sinal gerado pelo próprio receptor (ϕ_R) no instante da recepção do sinal (t_R). A fase observada (ϕ_R^S) em ciclos dada pela Equação 2.2(MONICO, 2008).

$$\phi_R^S(t) = \phi^S(t) - \phi_R(t) + N_R^S + \epsilon\phi_R^S \quad (2.2)$$

em que

t é o instante de recepção do sinal no receptor

$\phi^S(t)$ é a fase da portadora gerada no satélite e recebida no receptor no instante t

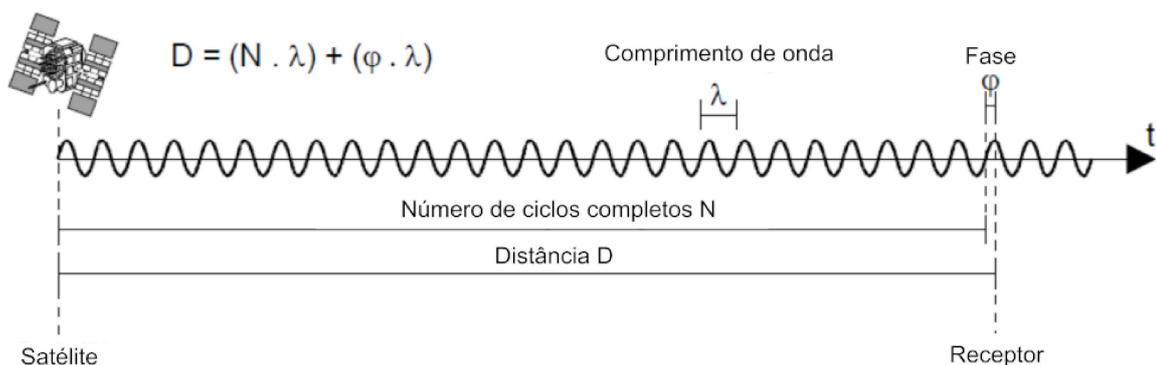
$\phi_R(t)$ é a fase gerada no receptor no instante t

N_R^S é a ambiguidade de fase

$\epsilon\phi_R^S$ é o erro da fase da onda portadora

As medidas de fase da onda portadora podem alcançar uma precisão milimétrica, porém um processo complexo chamado "solução de ambiguidade" é necessário para determinar o número de ciclos inteiros no instante da primeira observação entre o satélite e o receptor (NOVATEL, 2015). As ambiguidades estimadas podem ser números reais (ambiguidade/solução *float* ou flutuante), o que significa que a solução pode ser um número decimal, ou números inteiros (ambiguidade/solução fixa) caso o valor estimado seja próximo o suficiente de um número inteiro. A Figura 9 mostra a diferença de fase entre o satélite e o usuário.

Figura 9 – Princípio da medida da diferença de fase da onda portadora



Fonte: Adaptado de (UBLOX, 2009)

A diferença de fase (ϕ) é uma medida fracionária e é sempre menor que o comprimento de onda. Considerando um ruído no receptor equivalente a 1% do comprimento de onda (OGAJA, 2022), percebe-se que o erro nas medidas de pseudodistância é de aproximadamente 3 m, para o comprimento de onda de 300 m referente ao código C/A, e

de 1,9 mm para a portadora L1, que possui comprimento de onda de $\lambda = 0,19m$. Dessa forma, o ruído do receptor tende a ser muito menor quando se utiliza a fase da onda portadora como observável.

2.2.2 Fontes de erro no sistema GNSS

Existem uma série de fatores que dificultam a tarefa de um receptor GNSS para obter sua posição exata. As fontes de erro são listadas e mais detalhadas a seguir.

- **Erros no relógio do satélite**

Os relógios do satélite possuem grande acurácia, porém ainda assim possuem um leve desvio em relação ao sistema de tempo a eles associado. Pequenos erros no relógio do satélite podem representar grandes erros na posição calculada no receptor. Um erro de 10 nanossegundos no relógio do satélite, por exemplo, pode causar um erro de 3 m na posição do receptor (NOVATEL, 2015). Os relógios dos satélites são monitorados pelo segmento de controle, que os compara com uma referência mais acurada e envia correções para ajustá-los corretamente. Existem outras formas de compensar esse erro como, por exemplo, utilizando um sistema RTK ou baixando as informações precisas dos relógios dos satélites de algum provedor do serviço de posicionamento por ponto preciso (PPP, do inglês *Precise Point Positioning*), como o disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o IBGE-PPP.

- **Dados das efemérides (órbitas)**

Assim como em seus relógios, as pequenas variações nos resultados das órbitas podem acarretar em erros significantes na posição calculada. As estações GNSS terrestres monitoram continuamente as órbitas dos satélites. Quando a órbita se altera, a estação envia correções para que os satélites tenham suas efemérides atualizadas. Assim como no caso dos relógios, esse erro pode ser mitigado utilizando o RTK, PPP, dentre outras técnicas.

- **Refração Ionosférica**

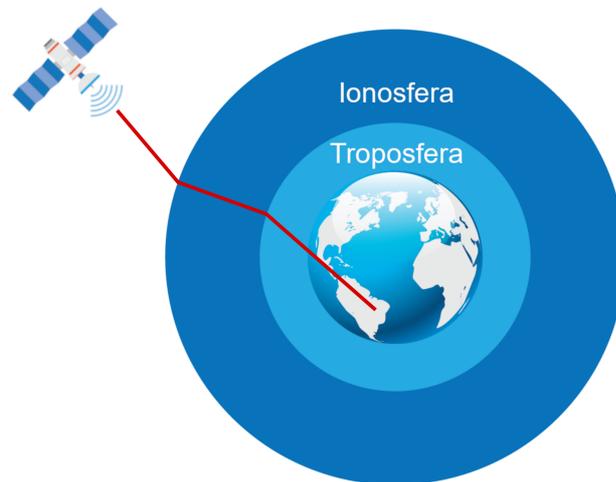
A Ionosfera é a camada da atmosfera que pode se localizar entre 60 km e 100 km acima da superfície terrestre. Essa camada contém partículas eletricamente carregadas chamadas Ions, que podem atrasar o sinal e causar erros significantes de posição. Esses erros podem variar com a atividade solar, época do ano, hora do dia, localização etc. Dessa forma, é difícil prever o quanto o atraso ionosférico impacta na posição. O atraso ionosférico também varia de acordo com a frequência do sinal que está passando pela ionosfera. Receptores GNSS que utilizam múltiplas frequências, como L1 e L2, por exemplo, podem usar isso a seu favor. Comparando as medidas da portadora de onda L1 e L2 o receptor é capaz de determinar o atraso e mitigar

o erro na posição calculada. Os atrasos ionosféricos variam de forma semelhante em uma área local e, portanto, novamente o sistema RTK pode ser utilizado para compensar os erros oriundos dos atrasos ionosféricos (NOVATEL, 2015).

- **Refração troposférica**

A troposfera é a camada atmosférica localizada até aproximadamente 15 km acima da superfície terrestre (UBLOX, 2009). A causa dos erros está relacionada com a variação da umidade do ar, temperatura e pressão atmosférica (NOVATEL, 2015). Assim como no caso da refração ionosférica, o efeito é semelhante em áreas locais, sendo possível mitigá-lo utilizando sistemas RTK. A Figura 10 mostra de forma ilustrativa o impacto de ambas as refrações no sinal enviado pelo satélite.

Figura 10 – Refração do sinal na ionosfera e troposfera



Fonte: Adaptado de (NOVATEL, 2015)

- **Ruídos do receptor**

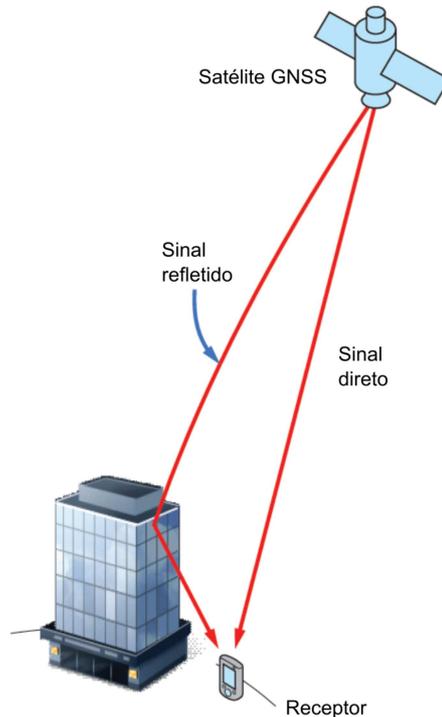
São os ruídos oriundos do *hardware* e do *software* que causam erro no cálculo da posição. A literatura menciona que receptores GNSS *high end* tendem a possuir menor ruído quando comparados a receptores de baixo custo (MONICO, 2008).

- **Multicaminho ou sinais refletidos**

Ocorre quando o receptor recebe, além do sinal que chega diretamente do satélite à antena, sinais refletidos em superfícies vizinhas a ela como construções, árvores, carros, asfalto, água etc. (SEEBER, 2003). Esse erro impacta em ambas as frequências da onda portadora e, geralmente, a melhor forma de evitá-lo é posicionando a antena longe de elementos presentes no ambiente e com boa visada do céu. Satélites com baixo ângulo de elevação são mais susceptíveis ao fenômeno em questão (MONICO,

2008), portanto também é importante configurar o parâmetro de máscara de elevação no receptor para negligenciar esses satélites. Outra forma é acrescentar uma placa metálica abaixo da antena, evitando que sinais refletidos na superfície abaixo degradem o sinal. A Figura 11 exibe um exemplo do sinal recebido no receptor após ser refletido em uma construção.

Figura 11 – Multicaminho do sinal



Fonte: Adaptado de (NOVATEL, 2015)

- **Perdas de ciclo**

Espera-se que a solução de ambiguidade, ou seja, a contagem correta de ciclos inteiros, se mantenha correta e contínua caso não ocorram perdas de sinal. Quando o sinal é perdido, o contador é reiniciado. A variação na posição da antena, bloqueio do sinal, interferências de outros sinais de frequências semelhantes, problemas no *hardware* ou *software* do receptor, mudanças atmosféricas etc., podem ocasionar as perdas de ciclo.

Alguns materiais e autores fornecem alguns valores típicos para cada um desses erros, conforme visto na Tabela 1. Foram incluídos erros típicos obtidos de duas referências distintas. A combinação de cada uma das fontes de erro projetada na linha que conecta o satélite ao receptor é denominada erro de distância equivalente do usuário (UERE, do inglês *User Equivalent Range Error* ou erro de distância do usuário (ERE, do inglês *User*

Range Error) (SEEBER, 2003) e geralmente é de aproximadamente 5 m para receptores convencionais.

Tabela 1 – Valores típicos para cada fonte de erro

Causa do erro	Erro (UBLOX, 2009)	Erro (NOVATEL, 2015)
Erros do relógio do satélite	1,5 m	2,0 m
Erros de órbita	1,5 m	2,5 m
Atraso ionosférico	3,0 m	5,0 m
Atraso troposférico	0,7 m	0,5 m
Ruído no receptor	0,5 m	0,3 m
Multicaminho	1,0 m	1,0 m

Conforme apresentado, diversos desses erros são mitigados/corrigidos a partir da utilização do sistema RTK ou PPP. Para aplicações que exigem coordenadas acuradas em tempo real, como o caso da embarcação desse trabalho, a utilização do RTK é mais apropriada.

2.2.2.1 Geometria dos satélites

Além de depender das observáveis mencionadas e de estar sujeito aos erros descritos, o posicionamento utilizando o sistema GNSS também tem sua acurácia afetada pela geometria dos satélites que emitem sinais para o receptor (SEEBER, 2003).

A relação entre o desvio padrão da observação (associado ao UERE), σ_R , e o desvio padrão associado à posição, σ_P , é denominada diluição da precisão (DOP, do inglês *Dilution of Precision*). O parâmetro DOP (e seus derivados) é obtido a partir de uma matriz de covariâncias relacionada com as observáveis dos satélites cujo receptor recebe o sinal em um dado instante, porém esse cálculo não será abordado por não se tratar do foco do trabalho. Apesar disso, a Equação 2.3 contribui para o entendimento da relação da DOP com a acurácia posicional.

$$\sigma^* = DOP \cdot \sigma_R \quad (2.3)$$

Quando um conjunto de satélites visíveis para o receptor se concentra em uma pequena região do céu, o erro na determinação da posição é maior e diretamente proporcional à DOP, que também é maior. Dessa forma, quando o valor de DOP é muito alto, o erro de posição é maior que o erro da distância medida (NOVATEL, 2015). Algumas considerações sobre a DOP:

- A DOP pode ser usada de base para selecionar os satélites a serem utilizados na determinação da posição, ou seja, satélites que minimizem a DOP para uma aplicação particular;

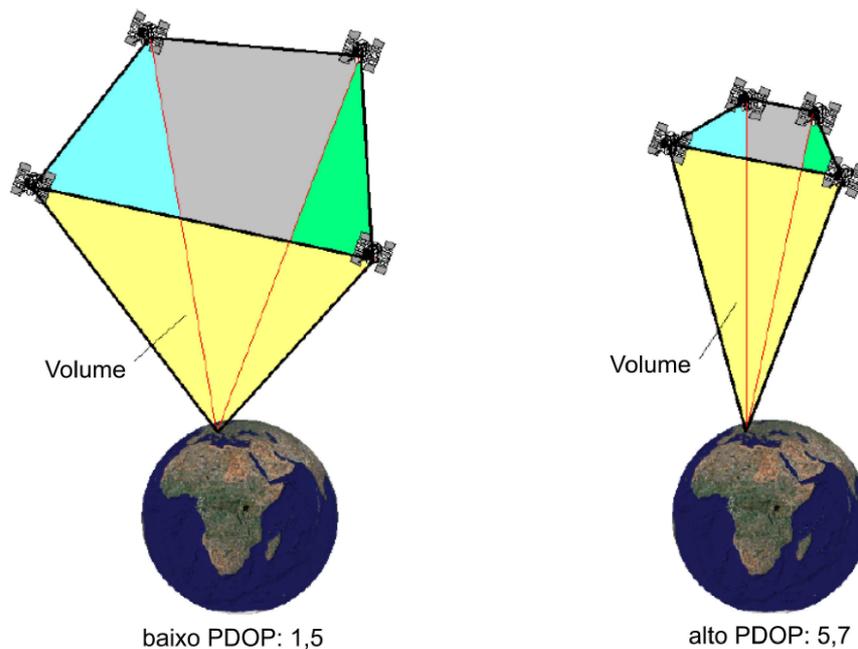
- Um valor de DOP acima de 6 resulta, geralmente, em acurácias inaceitáveis em operações utilizando o GNSS RTK (esse parâmetro foi avaliado, em tempo real, durante os testes realizados);
- Varia de acordo com o horário do dia e localização geográfica, porém para uma posição fixa a geometria dos satélites se repete todos os dias;
- Necessita apenas das posições dos satélites e da localização do receptor para ser calculada.

Existem diferentes designações de DOP, sendo: *HDOP* utilizado no posicionamento horizontal, *VDOP* utilizado no posicionamento vertical, *PDOP* utilizado no posicionamento tridimensional e *TDOP* utilizado na determinação do tempo. A *PDOP*, por exemplo, pode ser interpretada como o inverso do volume de um tetraedro formado pelas posições do usuário e dos satélites, conforme a Equação 2.4.

$$PDOP = \frac{1}{V} \quad (2.4)$$

Portanto, a melhor geometria ocorre quando o volume é maximizado, o que implica em uma *PDOP* mínima, conforme mencionado anteriormente. A Figura 12 exibe o comportamento descrito, onde a menor *PDOP* representa a melhor configuração de satélites.

Figura 12 – Quanto maior o volume, menor (e melhor) é o PDOP



Fonte: (NOVATEL, 2015)

2.3 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO GNSS

Existem diferentes métodos em que os receptores podem aprimorar seu desempenho por meio do uso de técnicas avançadas que mitigam ou eliminam erros durante o cálculo da posição. Em geral, essas técnicas envolvem (NOVATEL, 2015):

- Média de repetidas observações em um mesmo local;
- Modelagem dos fenômenos que causam erro e predição dos valores de correção;
- Correções diferenciais.

Foram abordadas as técnicas utilizadas nesse trabalho, sendo o posicionamento por ponto simples e o posicionamento cinemático em tempo real. Outras técnicas podem ser encontradas nas referências.

2.3.1 Posicionamento por ponto simples

Trata-se da estratégia apresentada até o momento, ou seja, a operação de um receptor individual, operando "sozinho" para determinar sua localização e tempo. Essa estratégia recebe o nome de posicionamento por ponto simples ou posicionamento absoluto (em inglês recebe diferentes nomes: *absolute position determination*, *point positioning*, *single-point positioning*). Em situações específicas, atende aos requisitos de algumas tarefas de aquisição de dados para sistemas de informação geográfica (GIS, do inglês *Geographic Information System*), sensoriamento remoto, entre outras. O campo típico de aplicação é a navegação (SEEBER, 2003), sendo comumente utilizado em *smartphones*, drones, carros e outras aplicações cotidianas.

2.3.2 Posicionamento relativo

O posicionamento por ponto simples com um receptor GNSS é, em geral, menos acurado que o posicionamento relativo entre duas estações (receptores). Isso ocorre pois a maioria dos erros que afetam o receptor são correlacionados (SEEBER, 2003). As fontes de erro podem ser agrupadas em três categorias:

1. Erros correlacionados com a distância;
2. Erros correlacionados com o tempo;
3. Erros não correlacionados.

Os erros do tipo 1 são majoritariamente relacionados às efemérides e a propagação do sinal. Esses erros podem desaparecer em situações em que os receptores se encontram

próximos. Erros do tipo 2 surgem quando as observações estão sincronizadas ou muito próximas. Erros do tipo 3 afetam ambas as estações e geram a necessidade de calibração.

Para mitigar os efeitos dos erros de tipo 1 utiliza-se, ao invés das coordenadas absolutas obtidas por meio de posicionamento por ponto simples, as coordenadas ajustadas por meio da utilização de uma estação de referência. Algumas estratégias são:

- (a) Utilização dos dados de uma ou mais estações de referência para realização de pós-processamento;
- (b) Uso de correções de posição ou da pseudodistância, em tempo real, a partir de uma estação de referência;
- (c) Uso da pseudodistância e fase da onda portadora, em tempo real, a partir da estação de referência;
- (d) Uso de dados, em tempo real, de um conjunto de estações conectadas à rede.

A opção (a) é geralmente chamada de GNSS relativo, enquanto as opções (b) e (d) são chamadas GNSS diferencial (DGNSS, do inglês *Differential GNSS*), porém com diferentes atributos. É mais comum encontrar essas denominações associadas ao sistema americano, GPS. Dessa forma, termos como GPS Diferencial (DGPS, do inglês *Differential GPS*) são mais comumente utilizados até mesmo para se referir a sistemas GNSS.

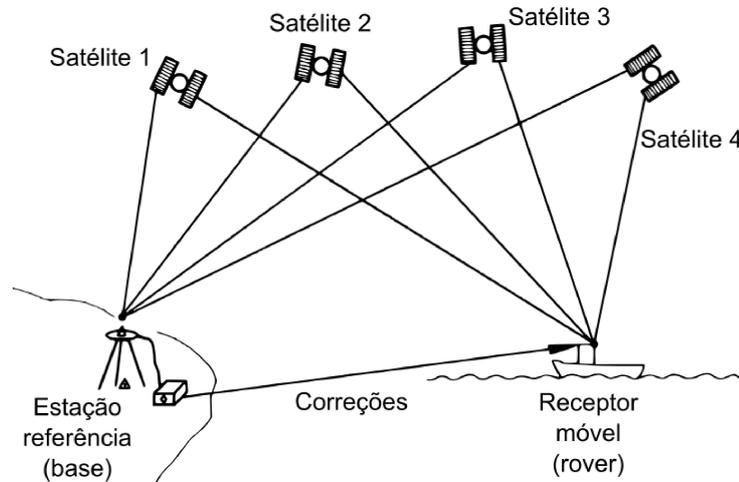
A opção (b) é a mais comumente denominada DGNSS, enquanto a opção (c) é denominada DGNSS preciso (PDGNSS, do inglês *precise DGNSS*), ou também RTK, que é a denominação aplicada nesse trabalho. A opção (d) é conhecida dentro do conceito de múltiplas estações de referência, estações de referência em rede ou também RTK em rede. O conceito de RTK em rede foi brevemente explorado na Seção **2.4.3**.

Os sistemas DGNSS e GNSS RTK se beneficiam da utilização de dois receptores operando simultaneamente. Ambos os receptores se comunicam entre si por meio de um *link* de dados, geralmente provido por um sistema de rádio que pode operar em frequências amplamente utilizadas como 2.4 GHz ou 900 MHz. Nesses sistemas, a posição de um receptor GNSS em local fixo, denominado estação base, é determinada utilizando técnicas de alta acurácia ou, caso conhecida, fornecida manualmente. Ao calcular os parâmetros relacionados ao erro, a base envia essas informações para o outro receptor, denominado *rover*, que incorpora as correções em seus cálculos de posição. O esquema de comunicação entre *base* e *rover* pode ser visto na Figura 13.

2.3.2.1 GNSS diferencial

Utilizando o princípio da *base* e *rover* já mencionados anteriormente, essa técnica aplica diferentes procedimentos para gerar as seguintes correções:

Figura 13 – Conceito de posicionamento relativo



Fonte: Adaptado de (SEEBER, 2003)

1. Correções no domínio da posição

As posições observadas na estação *base* são comparadas com a posição previamente conhecida. As correções baseadas nos erros de latitude ($\Delta\phi$), longitude ($\Delta\lambda$) e altitude (Δh) são transmitidas para que o *rover* faça a correção de sua posição.

2. Correções no domínio das medidas

As pseudodistâncias observadas em todos os satélites são comparadas com as distâncias obtidas a partir da posição conhecida dos satélites e do receptor. As correções são enviadas ao *rover* para que ele corrija suas pseudodistâncias observadas.

A opção 1 é a mais simples, porém inflexível. Ela funciona apenas se o *rover* estiver usando os mesmos satélites que a *base* e só é eficiente em curtas distâncias, sendo raramente aplicada.

A opção 2 é o método mais amplamente utilizado e pode proporcionar acurácia da ordem de 0,5 m a 3 m, dependendo do comprimento da linha base (distância entre *base* e *rover*). É mais flexível quando comparado ao método anterior e funciona bem em raios que variam de poucos metros até centenas de quilômetros de distância da *base* de referência. Devido a diminuição da correlação e aos vieses (órbita e atrasos ionosféricos e troposféricos) que ocorrem com o aumento da distância, o erro aumenta aproximadamente 1 m para cada 100 km de linha base (MONICO, 2008).

Estando a estação base localizada próxima ao local de interesse, existe forte correlação entre os erros envolvidos na *base* e no *rover*. Dessa forma, o receptor torna-se apto a corrigir suas posições ou observações coletadas após receber as devidas correções.

2.3.2.2 Posicionamento cinemático em tempo real (RTK)

Assim como no GNSS diferencial, o GNSS RTK também utiliza dois receptores, também denominados *base* e *rover*, para realizar sua operação. Enquanto no DGPS a acurácia é da ordem submétrica, no RTK pode-se obter acurácias centimétricas ou milimétricas em tempo real. A tecnologia por trás do RTK se baseia nos seguintes recursos:

- Transmissão da pseudodistância e fase da onda portadora da *base* para o *rover* em tempo real;
- Solução do vetor de ambiguidades no *rover*;
- Determinação do vetor da linha base em tempo real ou quase em tempo real.

Conforme visto, o GNSS diferencial utiliza a pseudodistância como observável principal. Já no RTK, embora a pseudodistância seja relevante na solução do vetor de ambiguidades, a observável fundamental é a fase da onda portadora.

Um fator chave para aplicação do RTK é a capacidade do *rover* em resolver as ambiguidades enquanto sua antena está em movimento. Esse recurso é denominado solução das ambiguidades em tempo real com o receptor em movimento (OTF, do inglês *On The Fly*). Enquanto os valores de ambiguidade estimados são números reais (*float solution*), a acurácia obtida é da ordem decimétrica. Com a ambiguidade resolvida (*fixed solution*), a acurácia passa a ser centimétrica ou mesmo milimétrica.

A maioria das implementações do RTK são soluções proprietárias e tem impacto direto no desempenho e no *hardware* necessário para executá-las. Fatores como o tempo para solução de ambiguidades (TTFA, do inglês *Time To Fix Ambiguities*) e o tempo para determinação precisa do vetor entre *base* e *rover* também são afetados pelo *software* que contém a implementação e pelo *hardware* que a executa. Esses fatores aliados à maior complexidade de *software* e *hardware* para operação são algumas justificativas para os altos valores cobrados por esses equipamentos.

Uma limitação desse sistema é oriunda do link de rádio geralmente empregado, que pode reduzir o comprimento da linha base a poucos quilômetros devido a perdas de sinal decorrentes da distância ou de obstáculos no trajeto. Para lidar com isso, hoje o mercado conta com links de rádio capazes de operar a dezenas de quilômetros. Além disso, existem diferentes abordagens como o RTK em rede, que permite a utilização de redes sem fio (telefonia móvel, Wi-Fi etc.) para envio das correções, expandindo o alcance do sistema para valores tão grandes quanto a área de cobertura do sinal.

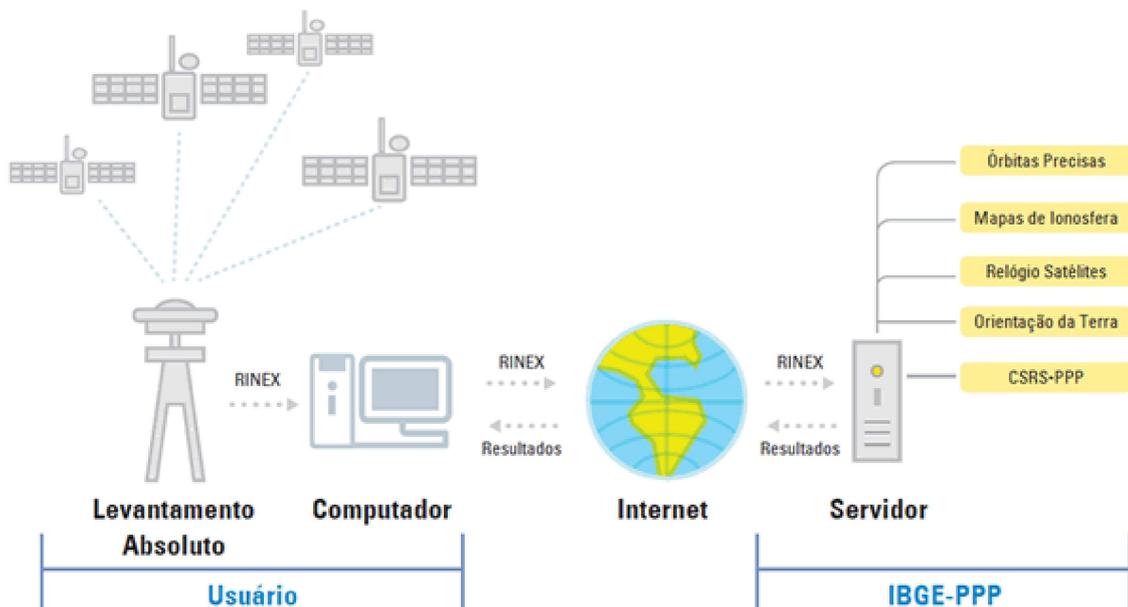
2.3.3 Posicionamento por ponto preciso

O posicionamento por ponto preciso (PPP, do inglês *Precise Point Positioning*) é uma técnica que mitiga os erros do sistema GNSS utilizando um receptor independente, ou seja, o posicionamento por ponto simples com seus dados pós-processados. Isso é feito por meio da correção dos dados coletados utilizando efemérides e correções dos relógios dos satélites, ambos com alta precisão, providos por algum serviço ou coletados pelo próprio operador em campo.

Vários países e organizações possuem seus próprios serviços de PPP disponíveis via acesso pago ou gratuito. No Brasil, o IBGE disponibiliza o serviço IBGE-PPP - Serviço online para pós-processamento de dados GNSS (IBGE, 2023a).

Para utilizar o serviço, além de possuir um login gratuito, o usuário precisa possuir o arquivo com a coleta de dados realizada com o receptor GNSS, estando esse no formato requisitado. Esse formato de arquivo é descrito brevemente na Seção 2.4. Ao enviar o arquivo, o sistema do IBGE realiza o processamento, aplica as devidas correções e retorna as posições corrigidas ao usuário, conforme visto na Figura 14.

Figura 14 – Serviço PPP do IBGE



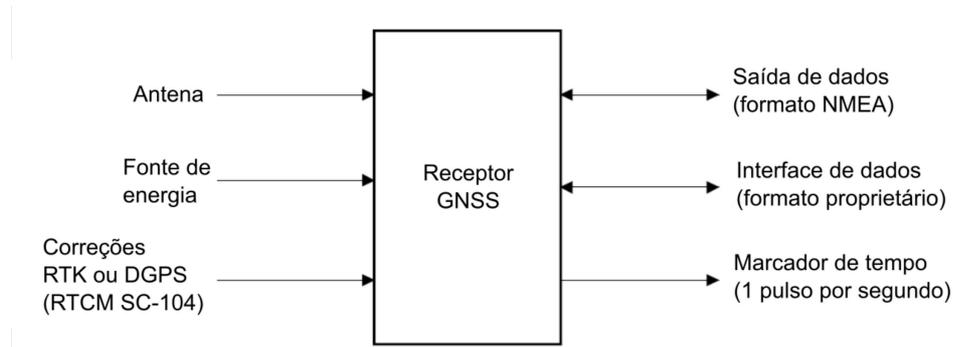
Fonte: Adaptado de (IBGE, 2023a)

Existem também outras formas de realizar o pós-processamento dos dados. Uma delas é a biblioteca *open-source* *RTKLIB* (TAKASU; YASUDA, 2009). Além de possibilitar as operações em tempo real, essa biblioteca também permite que o usuário utilize informações de uma base ou sistema arbitrário. Esse sistema pode ser equivalente ao do IBGE ou, também, uma base fixa instalada pelo próprio usuário.

2.4 INTERFACES DE DADOS

Para funcionar corretamente, os receptores GNSS enviam e recebem diversos sinais, conforme visto na Figura 15. Os valores de diferentes variáveis são transmitidos após a conclusão dos cálculos de posição e tempo.

Figura 15 – Diagrama de blocos do receptor GNSS e suas interfaces



Fonte: Adaptado de (UBLOX, 2009)

Para garantir a flexibilidade dos dispositivos existem diferentes padrões internacionais para troca de dados. Alguns fabricantes também possuem seus próprios padrões proprietários definindo formatos e protocolos (UBLOX, 2009).

Alguns dos formatos mais importantes no contexto desse trabalho são:

- NMEA: provê as variáveis computadas por meio de interfaces seriais a periféricos;
- RTCM: utilizado na transmissão das correções da *base* para o *rover*;
- RINEX: arquivo com diferentes dados das coletas destinado a pós-processamento.

Nessa seção foram abordados alguns dos principais formatos e protocolos que foram aplicados no âmbito desse trabalho.

2.4.1 Formato RINEX

O formato RINEX (do inglês *Receiver independent exchange format*) foi desenvolvido para facilitar o intercâmbio de dados entre diferentes *softwares* e dispositivos. Na data de escrita do trabalho o formato se encontrava em sua versão 4, que consistia em três arquivos codificados em ASCII (ROMERO, 2021):

1. Arquivo com dados de observação;
2. Arquivo com mensagens de navegação;
3. Arquivo com dados meteorológicos.

Cada tipo de arquivo consiste de uma seção destinada ao cabeçalho e outra destinada aos dados. O cabeçalho contém a informação geral sobre todos os dados e fica posicionado no começo do arquivo. A versão mencionada acomoda mensagens de navegação para todas as constelações do sistema GNSS e mensagens de dados do sistema como: correções de atraso ionosférico, orientações do planeta e compensações de tempo do sistema.

Muitos fabricantes de receptores GNSS fornecem ferramentas para efetuar a conversão de dados do formato proprietário para RINEX. Os receptores u-blox, por exemplo, exportam arquivos no formato ".ubx" que podem ser facilmente convertidos para RINEX utilizando a ferramenta *RTKCONV* disponível no *RTKLIB*.

2.4.2 Formato RTCM

Para transmissão de dados em tempo real, a *Radio Technical Commission for Marine Services* (RTCM) estabeleceu um formato apropriado que, atualmente, é internacionalmente aceito e suportado pela grande maioria dos receptores GNSS.

O comitê especial (SC, do inglês *special commitee*) 104 foi responsável por planejar os padrões de formatos para transmissão de correções do GNSS diferencial (nesse caso o termo diferencial é aplicado para todos os sistemas que recebem correções, inclusive o RTK).

O RTCM SC-104 foi originalmente desenvolvido em 1983 para o sistema GPS. Em 1994 a versão 2.1 adicionou suporte para o RTK. Em 1998 o sistema foi expandido para operar com a constelação GLONASS. Em 2001 foram adicionadas novas mensagens para aprimorar seu funcionamento com o RTK e em 2004 o formato foi aprimorado, trazendo melhorias de uso de banda e mais tipos de mensagem, se tornando RTCM 3. Ao longo do processo o nome do padrão se alterou e a versão 3.1 se tornou *RTCM Standard 10403.1*.

Na data de escrita desse documento, a versão era a 3.3, ou *RTCM Standard 10403.3*, com seu último (terceiro) complemento tendo sido lançado em agosto de 2022 (RTCM, 2022).

2.4.3 Protocolo Ntrip

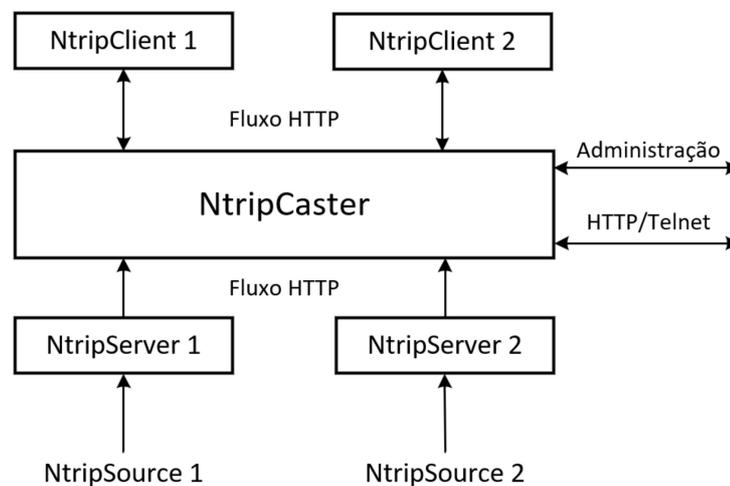
Uma das formas de transmitir e compartilhar as correções do sistema RTK é por meio da internet. Para isso, a agência da Alemanha de cartografia e geodésia (BKG, do alemão *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*) desenvolveu, juntamente com parceiros como a universidade de Dortmund e a Trimble Terrasat GmbH, o protocolo Ntrip (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*). O Ntrip é baseado nos protocolos HTTP e TCP/IP e pode trabalhar em redes com ou sem fio. Trata-se de um protocolo útil para aplicações que exigem dados em tempo real sem a necessidade de uma base para envio de correções.

A intenção de criação do Ntrip era, na época, usar a internet como alternativa para os métodos tradicionais (LENZ, 2004) de envio de correções via rádio ou por meio de redes de telefonia móvel (GSM, 3G, 4G, 5G e qualquer outra tecnologia de comunicação com banda suficiente). A "rede" Ntrip consiste de três componentes, conforme a lista abaixo (LENZ, 2004):

- *NtripSources*: Gera os dados DGPS e RTK nas localizações específicas;
- *NtripServers*: Transfere os dados de uma ou multiplas fontes para o o Ntrip;
- *NtripCaster*: Transmite todos os dados entre as fontes e os receptores de dados.

A operação do sistema é exibida na Figura 16 e funciona da seguinte forma: um receptor GNSS (*NtripSource*) envia continuamente mensagens RTCM até um servidor (*NtripCaster*). Um usuário (*NtripClient*) com um aplicativo "cliente" e com uma conexão de internet se conecta ao servidor (do IBGE, por exemplo) e escolhe a(s) estação(ões) cujos dados ou correções diferenciais deseja receber. As correções são recebidas pelo receptor GNSS do usuário (*NtripClient*) e desta forma obtêm-se as posições corrigidas (IBGE, 2023b).

Figura 16 – Componentes da "rede" Ntrip



Fonte: Adaptado de (LENZ, 2004)

A aplicação do Ntrip possui algumas vantagens em relação aos métodos utilizando rádios:

- Maior cobertura e alcance: O Ntrip permite a distribuição de correções via internet, expandindo o alcance do sinal para distância onde o sinal do rádio alcança;
- Custo-benefício: O Ntrip cria necessidade de apenas um modem 4G ou Wi-Fi para recebimento de correções, eliminando a necessidade de rádios ou equipamentos mais caros para envio de correções da *base* para o *rover*;

- Flexibilidade: Permite que múltiplas fontes de correções sejam utilizadas, possibilitando ao usuário escolher a que melhor se adequa às suas necessidades;
- Escalabilidade: Permite que um grande número de clientes se conectem ao *Ntrip-Caster* para utilização do serviço e recebimento de correções;
- Confiabilidade: A conexão de internet é mais confiável e menos susceptível a interferências quando comparada aos links de rádio, o que aumenta a confiabilidade do sistema;
- Segurança: Permite o uso de autenticação e criptografia, que garante maior segurança na transmissão dos dados quando comparado ao método utilizando rádio.

No Brasil, o IBGE disponibiliza o serviço RBMC-IP, que consiste na transmissão em tempo real, pela internet, das observações coletadas a partir de diversas estações GNSS de operação contínua espalhadas pelo território nacional, pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC). No fim de 2022, o servidor "caster" do IBGE recebia dados de 131 estações da RBMC espalhadas em todo o território brasileiro (IBGE, 2023b).

Apesar das vantagens, é importante mencionar que o acesso a internet é um pré-requisito primordial para aplicação do Ntrip. Em locais onde não existe cobertura de telefonia móvel ou redes disponíveis, como pode ser o caso de aplicação desse trabalho, o sistema utilizando link de rádio ainda é o mais confiável. Além disso, o uso da internet pode introduzir erros relacionados à latência, perda de pacotes entre outros, o que também pode manter o sistema com rádio como opção mais confiável em determinados cenários.

2.4.4 Padrão de comunicação NMEA-0183

O NMEA-0183 é um padrão de comunicação entre dispositivos eletrônicos como receptores GNSS, sonares, microcontroladores, entre outros. É um padrão desenvolvido pela *National Marine Electronics Association* (NMEA) e é amplamente utilizado para estabelecer a comunicação entre dispositivos de diferentes fabricantes.

Trata-se de um protocolo baseado em textos simples codificado em ASCII, responsável por enviar informações de posição, velocidade, tempo, entre outros, para periféricos utilizando interfaces como, por exemplo, seriais em níveis TTL ou RS-232. Portanto, é um padrão que define as interfaces físicas e elétricas, o protocolo e o padrão de tempo adotado entre diferentes dispositivos.

2.4.4.1 Estrutura do protocolo

O protocolo NMEA consiste em sentenças cuja a primeira palavra, chamada de tipo de dados, define a interpretação do restante da sentença. Cada sentença começa

com um cifrão (\$) e termina com uma sequência de *carriage return/line feed*, com limite máximo de 80 caracteres de texto visível. Os dados estão contidos nessa única linha e são separados por vírgulas, portanto os programas que leem os dados devem usar apenas vírgulas para determinar os limites do campo, sem depender de posições das colunas. O separador decimal dos valores é dado por um ponto simples ".". O campo *checksum*, ao final da sentença, consiste em um asterisco * seguido de dois dígitos hexadecimais gerados por meio da operação *ou-exclusivo* de todos os caracteres entre, mas não incluindo \$ e * (HEXAGON, 2017). A lista a seguir traz alguns exemplos de sentenças NMEA (SIRF, 2007):

```
$GPGGA,130304.0,4717.115,N,00833.912,E,1,08,0.94,00499,M,047,M,,*59<CR><LF>
$GPVTG,309.62,T, ,M,0.13,N,0.2,K,A*23<CR><LF>
$GPGLL,3723.2475,N,12158.3416,W,161229.487,A,A*41<CR><LF>
$GPGSA,A,3,07,02,26,27,09,04,15, , , , , ,1.8,1.0,1.5*33<CR><LF>
$GPGSV,2,2,07,09,23,313,42,04,19,159,41,15,12,041,42*41<CR><LF>
$GPRMC,161229.487,A,3723.2475,N,12158.3416,W,0.13,309.62,120598,,*10<CR><LF>
$GPZDA,181813,14,10,2003,00,00*4F<CR><LF>
```

Analisando a lista acima, percebe-se que as sentenças seguem a seguinte estrutura:

```
$GPDTS,Inf1,Inf2, Inf3,Inf4,Inf5,Inf6,Infn*CS<CR><LF>
```

A Tabela 2 descreve brevemente as informações contidas na sentença.

Tabela 2 – Informações contidas em uma sentença NMEA

Campo	Descrição
\$	Começo da sentença.
GP	Constelação utilizada.
DTS	Tipo da sentença utilizada (DTS, do inglês <i>data set</i>).
Inf ₁ até Inf _n	Número da informação (ex.: latitude, longitude, número de satélites etc.)
,	Separador dos campos
*	Separador do <i>checksum</i> .
CS	<i>Checksum</i> , para verificar a integridade da sentença.
<CR><LF>	Fim da sentença: <i>carriage return</i> (<CR>) e <i>line feed</i> (<LF>).

Além do prefixo GP, existem outros que variam de acordo com a constelação de satélites utilizada. A Tabela 3 traz alguns desses prefixos (TRIMBLE, 2007).

Tabela 3 – Alguns tipos de sentenças NMEA

Prefixo	Constelação
GA	Galileo
GB	BeiDou
GP	GPS
GL	GLONASS
GN	GNSS (constelações combinadas. Ex.: GPS e GLONASS)
GQ	QZSS

O prefixo referente à constelação é seguido por uma sequência de três letras que define o tipo da sentença (DTS). A Tabela 4 traz alguns tipos de sentença com base em seu conteúdo. É válido ressaltar que existem vários outros tipos de sentenças, contendo diferentes informações além das aqui exibidas.

Tabela 4 – Alguns tipos de sentenças NMEA

Sentença	Descrição
GGA	Dados fixos de sistema de posicionamento global.
VTG	Curso sobre o solo e sobre a velocidade do solo.
GLL	Posição geográfica (latitude e longitude).
GSA	GNSS DOP e satélites ativos.
GSV	Número de satélites do GNSS na visualização.
RMC	Dados mínimos do GNSS específicos recomendados.
ZDA	Hora e data.

Cada dispositivo pode suportar um conjunto específico de sentenças, compatível com uma ou mais constelações, e nem todas as sentenças são compatíveis com todos os dispositivos. Conforme exposto na Seção 2.12, o ADCP *RiverSurveyor M9* suporta apenas sentenças da constelação GPS e dos tipos GGA e VTG. As estruturas dessas sentenças podem ser vistas no Anexo A.

É válido ressaltar que conhecer a estrutura das mensagens NMEA é determinante para integração do receptor GNSS com outros equipamentos, além de possibilitar a leitura e arquivamento dos dados.

2.5 COMPONENTES DE UM RECEPTOR GNSS

Para receber os sinais da constelação de satélites, determinar a posição, velocidade e tempo do receptor, além de prover ao operador uma interface que possibilite o uso, os receptores GNSS possuem uma série de componentes, cada um desempenhando um papel importante para o funcionamento do sistema.

Esses componentes consistem de receptores, antenas, conversores, *softwares*, em

uma variedade de níveis de desempenho e integração (NOVATEL, 2015). A lista a seguir traz alguns dos componentes mais comuns utilizados em um sistema GNSS.

(a) Antena

É responsável por receber os sinais dos satélites. Deve possuir boa sensibilidade para garantir a recepção de sinais fracos e deve permitir a recepção do sinal em todas as elevações e azimutes visíveis. A proteção contra multicaminho (sinais refletidos) é normalmente conseguida com a instalação da antena sobre um disco de metal (plano de terreno, do inglês *ground plane*) ou por meio de outras tecnologias mais avançadas.

(b) Módulo GNSS

É um módulo que integra diferentes funções vitais no funcionamento do receptor como: seções de RF (rádio frequência), oscilador, microprocessador etc. Além de processar, interpretar e converter os sinais, também faz a decodificação da mensagem de navegação, implementa técnicas de posicionamento como o RTK e provê portas para comunicação com dispositivos externos.

(c) Fonte de energia

Um receptor GNSS precisa de uma fonte de energia estável e confiável. Ele pode ser energizado por uma bateria própria ou por uma fonte externa, como a bateria de um carro. Alguns receptores modernos possuem baixo consumo, podendo ser energizados por baterias de baixa capacidade ou mesmo pilhas comuns.

(d) Microcontroladores/SBCs

Os microcontroladores ou os computadores de placa única (SBC, do inglês *Single Board Computer*) podem ser integrados aos módulos GNSS para obtenção de mais recursos ou adição de camadas adicionais de processamento dos dados. Um bom exemplo de aplicação desse equipamento é no módulo *Emlid Reach*, que possui uma *Intel Edison* para realização do processamento de dados, adição de conectividade sem fio (Wi-Fi), memória interna para arquivamento de informações e implementação das interfaces para comunicação com o *front-end* do sistema. O Emlid Reach foi o módulo utilizado nesse trabalho e as razões para escolha desse módulo foram elencadas na Seção 3.4.1. A Figura 17 exhibe o equipamento.

(e) Sistema de comunicação para troca de dados entre dispositivos.

Os receptores destinados a funcionamento em conjunto com uma estação de referência (RTK, DGPS etc.) tem disponível interfaces de comunicação que permitem conectividade via rádio, internet, rede de telefonia móvel etc. Receptores que operam utilizando RTK ou Ntrip, por exemplo, precisam de um link constante para recebimento das correções oriundas da estação de referência (base).

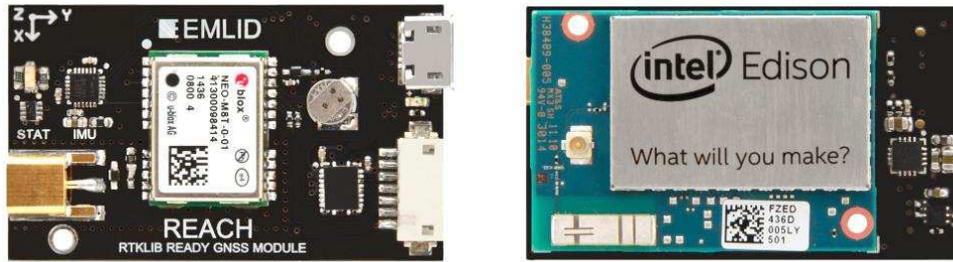


Figura 17 – Intel Edison integrada ao módulo GNSS u-blox M8T

(f) Conversores para níveis de comunicação apropriados

Diferentes receptores podem trabalhar com diferentes níveis lógicos para comunicação. Alguns dos níveis mais utilizados para comunicação serial são o TTL (do inglês *transistor-transistor logic*) e o RS232 (do inglês *Recommended Standard 232*).

- No caso da interface com níveis lógicos TTL, o nível lógico 0 corresponde a aproximadamente 0 V e o nível lógico 1 corresponde à tensão de operação do sistema (+3,3 V ... + 5 V);
- No caso da interface com níveis lógicos RS-232, o nível lógico 0 corresponde a uma tensão positiva no intervalo [+3 V, +15 V] e o nível lógico 1 corresponde a uma tensão negativa no intervalo [-3 V, -15 V]. Esses níveis de tensão podem variar de acordo com o equipamento, porém permanecem próximos a essa faixa.

Muitos receptores utilizam os níveis RS-232 pois esse permite a transmissão de dados via cabo por distâncias mais longas, possui suporte para grande quantidade de dispositivos, seus níveis de tensão em intervalos maiores o tornam mais resiliente a ruídos etc. Para que um módulo GNSS com interface TTL precise ser conectado a um equipamento com interface RS-232, é necessária a conversão dos níveis lógicos, que pode ser realizada com um conversor equivalente ao visto na Figura 18.

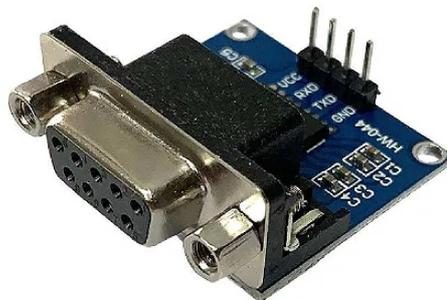


Figura 18 – Conversor bidirecional TTL - RS-232

(g) Interface de usuário

A interface de usuário provê acesso aos recursos do receptor GNSS. Isso pode ser realizado por meio de um *display*, no próprio equipamento, contendo informações relevantes da operação. Também pode ocorrer por meio de luzes que indicam o *status* da operação. Alguns equipamentos combinam ambas as abordagens, como o visto na Figura 19. Outros equipamentos possuem links de comunicação que permitem ao operador acessar a interface por meio de um notebook, *smartphone* ou outros aparelhos com um sistema próprio de visualização. Atualmente é comum encontrar fabricantes que disponibilizam suas interfaces em múltiplas plataformas e múltiplos sistemas operacionais. A Emlid, por exemplo, possui aplicativos próprios que podem ser instalados no *Android* e no Windows. As Figuras 20 e 21 exibem as interfaces de usuário dos equipamentos nos sistemas operacionais mencionados.



Figura 19 – Interface de um receptor GNSS via *display* e leds

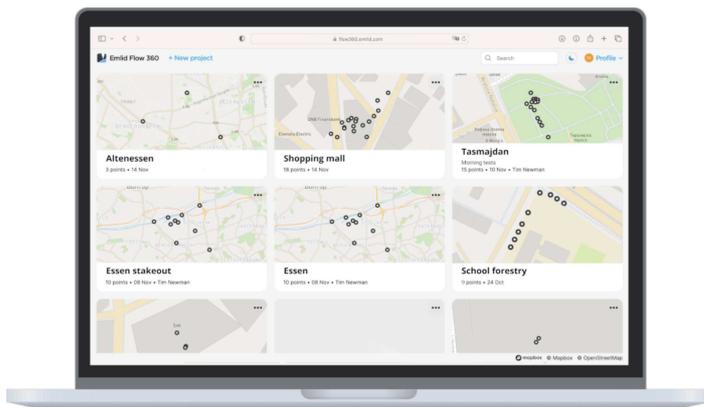


Figura 20 – Emlid Flow - Notebook

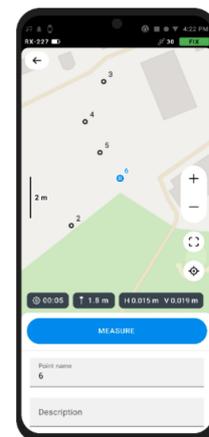


Figura 21 – Emlid Flow - Smartphone

2.6 SISTEMAS DE COORDENADAS

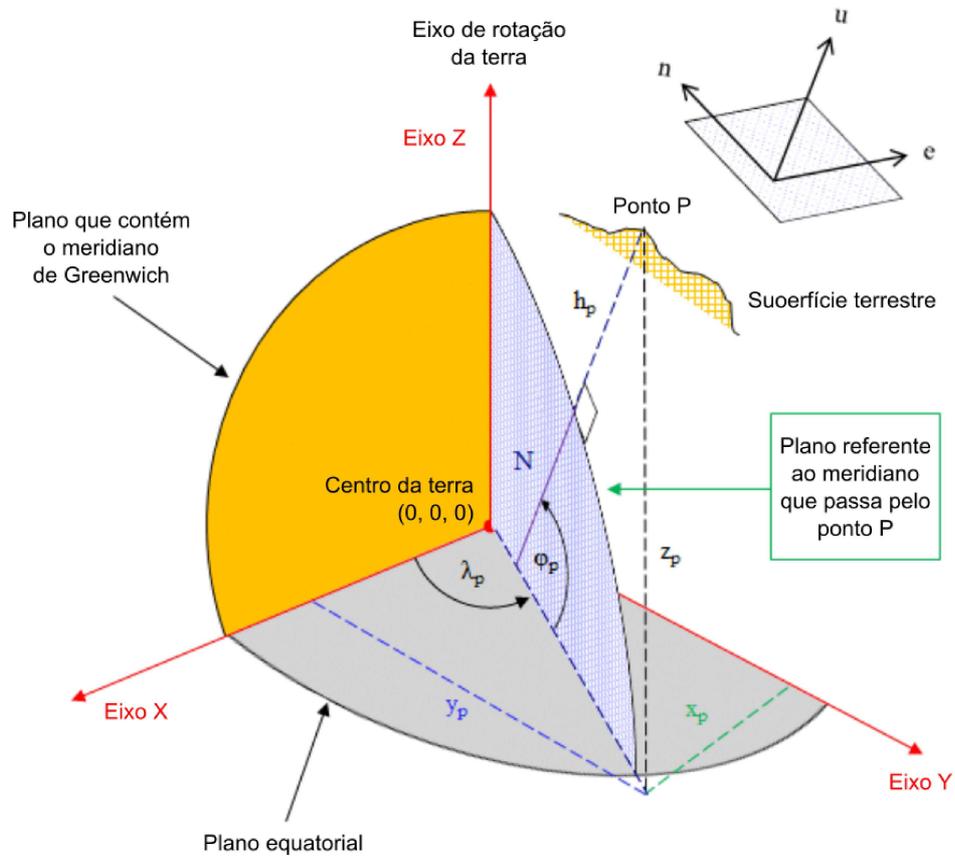
Diferentes sistemas de coordenadas são utilizados para representar um determinado ponto na superfície terrestre. Algumas delas são destacadas na lista abaixo, com as devidas referências visuais apresentadas na Figura 22.

- Sistema de coordenadas geodésicas (ou elipsoidais): é representado por meio das coordenadas de latitude (ϕ), longitude (λ) e altitude (h).
 - A latitude geodésica é o ângulo contado sobre o meridiano que passa por P, compreendido entre a normal passante por P e o plano equatorial;
 - A longitude geodésica é o ângulo contado sobre o plano equatorial, compreendido entre o meridiano de Greenwich e o ponto P;
 - A altitude elipsoidal corresponde a distância de P à superfície do elipsoide medida sobre a sua normal.
- Sistema de coordenadas cartesianas geocêntricas: é um sistema centrado (geocêntrico) e fixo na terra (ECEF, do inglês *Earth-centered, Earth-fixed*). É caracterizado por três retas (X, Y e Z), denominados eixos coordenados, mutuamente perpendiculares.
 - O eixo X é coincidente ao plano equatorial, positivo na direção de longitude 0° ;
 - O eixo Y é coincidente ao plano equatorial, positivo na direção de longitude 90° ;
 - O eixo Z é paralelo ao eixo de rotação da Terra e positivo na direção norte.
- Sistema de coordenadas cartesianas locais (ou coordenadas topocêntricas (OGAJA, 2022)): É um sistema formado a partir de um plano tangente à superfície terrestre e perpendicular à normal N, composto por três eixos mutuamente ortogonais (e, n, u, do inglês *east, north, up*) (SIMÕES; ALBARICI; BORGES, 2017).
 - O eixo e aponta para a direção leste;
 - O eixo n aponta em direção ao norte geodésico;
 - O eixo u coincide com a normal ao elipsoide que passa pelo vértice escolhido como origem do sistema (o ponto P) e tem seu sentido voltado para cima.

2.7 REPRESENTAÇÕES DA SUPERFÍCIE TERRESTRE

Antes de avançar para as conversões, é necessário compreender alguns conceitos que envolvem as representações da superfície terrestre. Os parâmetros dessas representações são utilizados no equacionamento que permite a conversão entre os diferentes sistemas de coordenadas apresentados.

Figura 22 – Sistemas de coordenadas

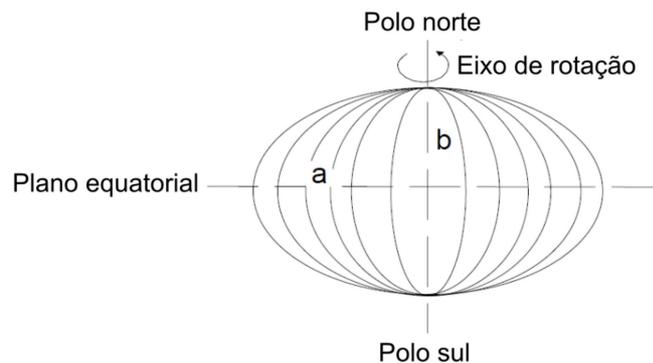


Fonte: Adaptado de (OGAJA, 2022)

2.7.1 Elipsoide

Uma superfície simples e que representa matematicamente a superfície terrestre é o elipsoide. Um elipsoide nada mais é do que uma elipse rotacionada em torno do eixo que interliga seus polos norte e sul, conforme visto na Figura 23.

Figura 23 – Produzindo um elipsoide de revolução



Fonte: Adaptado de (UBLOX, 2009)

Um elipsoide é definido por dois parâmetros:

- O semi-eixo maior: a (no plano equatorial);
- O semi-eixo menor: b (interligando os polos norte e sul).

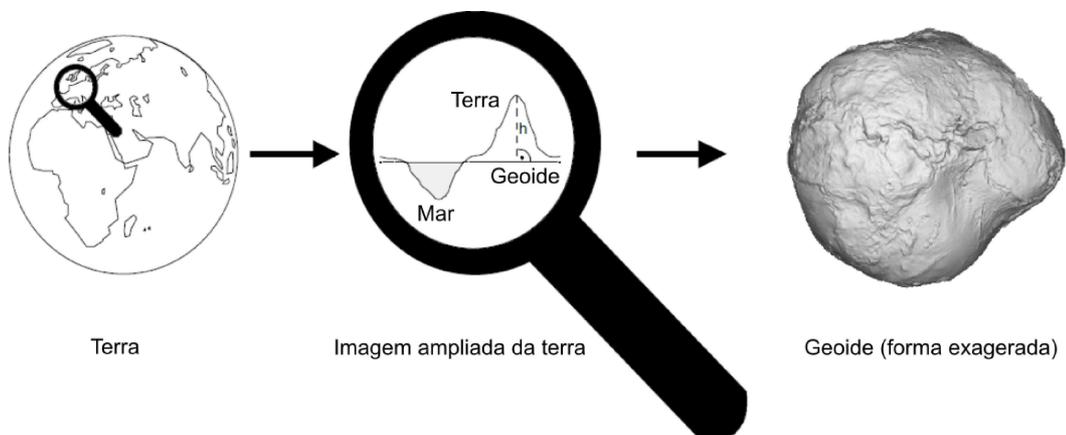
O valor pelo qual a superfície diverge de uma esfera perfeita é denominada achata-mento (f , do inglês *flattening*), e é dado pela Equação 2.5.

$$f = \frac{a - b}{a} \quad (2.5)$$

2.7.2 Geoide

Apesar de ser comum encontrar a representação do planeta como um elipsoide, a superfície física (topográfica) do planeta é representada por um geoide, que a define considerando o mar como nível zero. A Figura 24 mostra um exemplo do geoide que define o planeta terra.

Figura 24 – Aproximação da superfície terrestre utilizando um geoide



Fonte: (UBLOX, 2009)

Devido a irregular e complexa forma do planeta, seu formato não pode ser representado de forma simples por modelos matemáticos. Com isso, usar um modelo matemático de um elipsoide é a solução para representar horizontalmente o planeta em áreas específicas. Para representar verticalmente, o geoide é a forma mais apropriada.

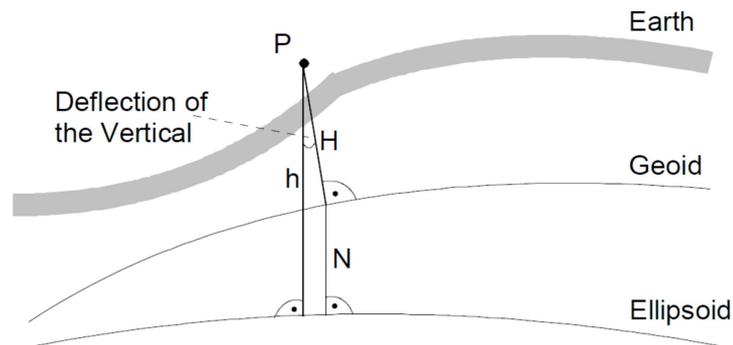
2.8 SISTEMAS DE REFERÊNCIA

Conforme mencionado, devido a conveniência para operações matemáticas, o elipsoide é amplamente utilizado como superfície de referência para coordenadas geográficas.

O ponto em que o elipsoide de referência é fixo em um determinado ponto do geóide, designado ponto de fixação, é o ponto de uma rede geodésica que estabelece as relações entre ambos (RGCI, 2007).

A separação vertical entre um geóide e um elipsoide de referência específico é denominada ondulação geoidal (N) e seus valores numéricos dependem do elipsoide utilizado. A relação geométrica entre a ondulação geoidal, a altitude elipsoidal (ou geométrica) (h) e a altitude ortométrica (H) pode ser vista na Figura 25.

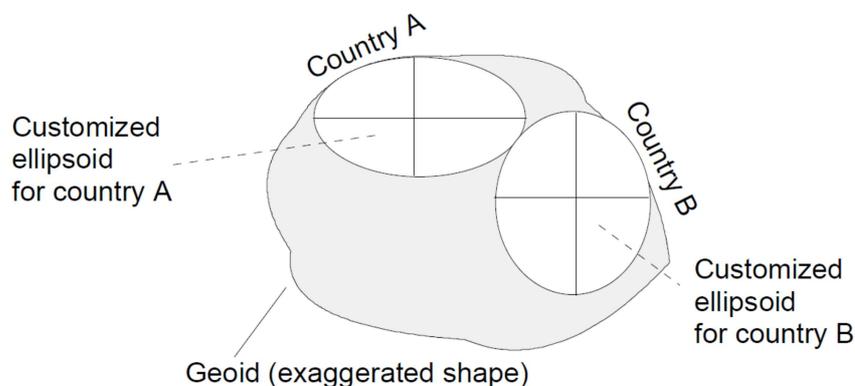
Figura 25 – Aproximação da superfície terrestre utilizando um geóide



Fonte: (UBLOX, 2009)

A reta normal ao elipsoide (vetor referente a altitude elipsoidal) e a reta perpendicular ao geóide (vetor referente a altitude ortométrica) não se coincidem, divergindo por um ângulo denominado deflexão vertical. Para manter essa divergência em um valor mínimo, cada país utiliza um elipsoide não geocêntrico como superfície de referência para diferentes aplicações. A Figura 26 mostra o uso de elipsoides locais para representar áreas específicas do geóide.

Figura 26 – Elipsoides de referência local



Fonte: (UBLOX, 2009)

Quando um elipsoide de referência é fixo em um determinado ponto do geóide, define-se o *datum* geodésico. Esse é um conjunto de parâmetros que constituem a referência

de um determinado sistema de coordenadas geográficas, sendo definido por um conjunto de, no mínimo, 5 parâmetros:

a: semi-eixo maior do elipsoide de referência.

f: achatamento do elipsoide.

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$: coordenadas da origem do elipsoide com respeito ao geocentro.

Para $\Delta X = \Delta Y = \Delta Z = 0$, o *datum* geodésico é denominado *datum* global. O Sistema de referência geodésico 1980 (GRS80, do inglês *Geodetic Referente System 1980*), adotado pela *International Union of Geodesy and Geophysics* (IUGCC), pertence a esse grupo (SEEBER, 2003).

O Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), de responsabilidade do IBGE, tem como base o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), em sua realização do ano de 2000 (SIRGAS2000). Trata-se de um sistema adotado em 2005, com várias justificativas de adoção, dentre elas o uso do GNSS (IBGE, 2006).

O SIRGAS2000 é caracterizado por alguns dos parâmetros mencionados anteriormente. Alguns desses parâmetros são (IBGE, 2005).

- Sistema geodésico de referência: Sistema de Referência Terrestre Internacional (ITRS, do inglês *International Terrestrial Reference System*);
- Figura geométrica para Terra:
Elipsóide do Sistema Geodésico de Referência de 1980 (GRS80)
 - Semi-eixo maior $a = 6.378.137$ m;
 - Achatamento $f = 1/298,257222101$.
- Origem: Centro de massa da Terra;
- Orientação: Polos e meridiano de referência consistentes em $\pm 0,005''$ com direções definidas pelo BIH (*Bureau International de l'Heure*), em 1984,0.

2.9 CONVERSÃO DE COORDENADAS

Conforme visto, o protocolo NMEA exporta as informações de posição utilizando latitude, longitude e altitude. Receptores GNSS também salvam arquivos em diversos formatos, como o RINEX mencionado anteriormente, que podem ser utilizados para análise posterior das informações coletadas.

Para realização das análises utilizando medidas métricas, faz-se necessário converter as coordenadas salvas para um sistema cartesiano, que represente bem o local onde as

coletas foram feitas e que permita a realização do cálculo de alguns parâmetros como acurácia e precisão do equipamento. Esse sistema pode ser, por exemplo, o sistema de coordenadas geodésicas, representado em um sistema de referência como o SIRGAS2000.

A transformação do sistema de coordenadas geodésicas para coordenadas locais é um processo de três estágios (DRAKE, 2002):

1. Determinação da latitude, longitude e altitude em um ponto de referência (origem do sistema) (λ_0, ϕ_0, h_0) ;
2. Conversão do sistema de coordenadas geodésicas (λ, ϕ, h) para o sistema de coordenadas cartesianas geocêntricas (X, Y, Z) (cartesiano);
3. Conversão do sistema de coordenadas cartesianas geocêntricas (X, Y, Z) para o sistema de coordenadas cartesianas local (e, n, u) utilizando o método das rotações e translações.

A Figura 27 traz as relações entre os sistemas utilizados nas conversões.

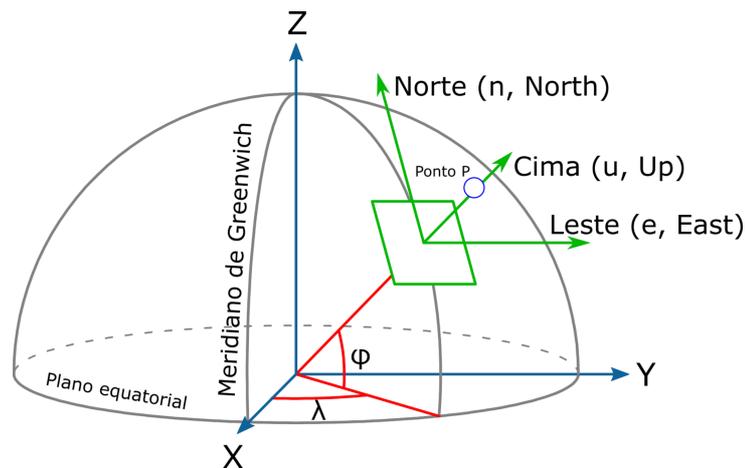


Figura 27 – Sistemas de coordenadas. Adaptado de (Wikipedia, 2021)

A conversão entre o sistema de coordenadas geodésicas (λ, ϕ, h) para o sistema de coordenadas cartesianas geocêntricas (X, Y, Z) é dada pelas Equações 2.6, 2.7 e 2.8:

$$X_P = (N + h)\cos(\phi)\cos(\lambda), \quad (2.6)$$

$$Y_P = (N + h)\cos(\phi)\sin(\lambda), \quad (2.7)$$

$$Z_P = (N(1 - e^2) + h)\sin(\phi). \quad (2.8)$$

Em que N é o raio de curvatura da seção no primeiro vertical, vista na Figura 22 dada pela Equação 2.9

$$N = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2(\phi))^{\frac{1}{2}}} \quad (2.9)$$

O quadrado da primeira excentricidade e , relacionada ao semi-eixo maior a , ao semi-eixo menor b e ao achatamento é dada pela Equação 2.10

$$e^2 = 2f - f^2 \quad (2.10)$$

As coordenadas geocêntricas X_P, Y_P e Z_P correspondem ao ponto com coordenadas geodésicas conhecidas (λ_P, ϕ_P, h_P) , o qual se deseja determinar suas coordenadas cartesianas locais (e_P, n_P, u_P) .

No Brasil, para realização dessas conversões utiliza-se o SIRGAS2000, que adota o elipsoide GRS80, com parâmetros que podem ser vistos na Tabela 5.

TABELA 5 – Parâmetros do GRS80

Parâmetro	Descrição	Valor
a	Semi-eixo maior	6.378.137,000m
b	Semi-eixo menor	6.356.752,298m
f	Achatamento	1/298,25722356
e^2	Excentricidade ao quadrado	0,006694385

A conversão de coordenadas cartesianas geocêntricas $(X_P, Y_P$ e $Z_P)$ para coordenadas cartesianas locais (e_P, n_P, u_P) é feita pelo método das rotações e translações, conforme as Equações 2.11, 2.12 e 2.13 (INCRA, 2022).

$$e = -\sin(\lambda_0)(Y_P - Y_0) + \cos(\lambda_0)(X_P - X_0), \quad (2.11)$$

$$n = -\sin(\phi_0)\cos(\lambda_0)(X_P - X_0) - \sin(\phi_0)\sin(\lambda_0)(Y_P - Y_0) + \cos(\phi_0)(Z_P - Z_0), \quad (2.12)$$

$$u = \cos(\phi_0)\cos(\lambda_0)(X_P - X_0) + \cos(\phi_0)\sin(\lambda_0)(Y_P - Y_0) + \sin(\phi_0)(Z_P - Z_0). \quad (2.13)$$

em que

e_P, n_P, u_P são as coordenadas cartesianas locais do ponto de interesse (P).

X_P, Y_P e Z_P são as coordenadas cartesianas geocêntricas do P.

λ_0, ϕ_0 são a latitude e a longitude adotadas como referência (origem do sistema).

X_0, Y_0 e Z_0 são as coordenadas cartesianas geocêntricas adotadas como origem do sistema (λ_0, ϕ_0 convertidas).

Com a realização dessas conversões torna-se possível, entre várias aplicações, realizar o cálculo de área, utilizar o método de posicionamento por geometria analítica, cálculo de acurácia e precisão do equipamento etc.

2.10 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO EQUIPAMENTO

Após realizadas as conversões, torna-se possível realizar o cálculo de parâmetros de desempenho do equipamento. Nessa seção foram abordadas algumas das métricas utilizadas nessas avaliações.

2.10.1 Acurácia

A acurácia pode ser compreendida como sendo o grau de proximidade de uma estimativa com seu valor verdadeiro e representa os erros sistemáticos (tendência ou viés) e os erros aleatórios do sistema. A precisão expressa o grau de consistência da grandeza medida com sua média (MIKHAIL; ACKERMANN, 1976 apud MONICO et al., 2009) e tem como indicativo a distribuição de probabilidade, representando somente os erros aleatórios.

A acurácia para cada uma das componentes é dada pela Raiz do Erro Quadrático Médio dos elementos de cada uma: e ($REQM_e$), n ($REQM_n$) e u (acurácia vertical, $REQM_u$) (CARVALHO; SILVA; POZ, 2015). A acurácia planimétrica (ou horizontal, $REQM_P$) é dada pela combinação das componentes e e n . A acurácia tridimensional (3D) leva em consideração todas as componente e , n e u .

Os cálculos são realizados por meio das Equações 2.14, 2.15 e 2.16, respectivamente (FERRER-GONZÁLEZ et al., 2020). É válido ressaltar que os cálculos utilizando a $REQM$ para definição da acurácia envolvem, conseqüentemente, a medida de precisão.

$$REQM_{\text{coordenada}} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\text{coordenada}_i - \text{referência})^2}{n}}, \quad (2.14)$$

$$REQM_{\text{planimétrico}} = \sqrt{\frac{\sum_i^n [(e_i - e_{ref})^2 + (n_i - n_{ref})^2]}{n}}, \quad (2.15)$$

$$REQM_{3D} = \sqrt{\frac{\sum_i^n [(e_i - e_{ref})^2 + (n_i - n_{ref})^2 + (u_i - u_{ref})^2]}{n}}. \quad (2.16)$$

em que

coordenada: e , n ou u no instante i obtida pelo equipamento;

referência: coordenada e , n ou u de referência;

n : número de elementos da amostra;

i : inteiro que varia de 1 a n .

Para o cálculo da precisão, utiliza-se a dispersão das amostras em torno da média, ou seja, o desvio padrão (CARVALHO; SILVA; POZ, 2015), dado pela Equação 2.17.

$$\sigma_{\text{coordenada}} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\text{coordenada}_i - \text{média})^2}{n}} \quad (2.17)$$

em que

coordenada: e, n ou u no instante i obtida pelo equipamento;

média: média das coordenadas e, n ou u que compõem a série temporal;

i: inteiro que varia de 1 a n.

As formas para cálculo de acurácia apresentadas são difundidas, porém existem literaturas e fabricantes que utilizam métricas diferentes para cálculo da acurácia. Dentre as diversas existentes, foi adotada uma segunda neste trabalho de forma a viabilizar comparações com resultados apresentados em outros trabalhos.

Essa outra métrica está relacionada com o valor da probabilidade acumulada até 95% da diferença entre o valor de posição obtido em testes e o valor real e conhecido utilizado como referência. Além do valor mencionado, também são utilizados como valores típicos 50%, 68% e 75%. Dizer que um receptor GNSS possui acurácia de 5 m (95%) é equivalente a dizer que seu erro de posição é inferior ou igual a 5 m em 95% do tempo.

2.10.2 Disponibilidade

A disponibilidade de um sistema de navegação é dada pela porcentagem do tempo em que o sistema está disponível para o uso do operador (ESA, 2011). Um receptor GNSS RTK ideal apresenta disponibilidade próxima a 100%. Nesse trabalho foi verificada a disponibilidade em dois cenários:

- Solução de ambiguidades fixa para o posicionamento utilizando RTK: representada pelo tempo em que o receptor foi capaz de manter a solução com status *fix*;
- Solução de ambiguidades fixa ou flutuante: representada pelo tempo em que o receptor foi capaz de manter a solução em algum dos dois estados.

2.10.3 Continuidade

A continuidade do sistema é a capacidade de manter seu desempenho ininterrupto durante a operação. Uma vez que o receptor RTK obtém uma solução fixa, existem situações que podem causar a perda desse status, revertendo-o para uma solução flutuante. A perda desse status é uma perda de continuidade. Esse trabalho utiliza duas métricas para caracterizar a continuidade (JACKSON et al., 2018):

- Perda da solução fixa: número de vezes, por minuto, que a solução fixa é perdida;
- Tempo médio para reaquisição da solução fixa: tempo médio de toda a observação que o receptor leva para computar a solução fixa novamente.

2.10.4 Tempo para primeiro fixo

O tempo para primeiro fixo (TTFF, do inglês *Time to first fix*) é computado a partir do momento em que o receptor GNSS é acionado (sem conhecimento ou existência de um estado operacional anterior) até a primeira vez em que a solução se torna fixa. Duas métricas de TTFF foram adotadas (JACKSON et al., 2018):

- TTFF RTK flutuante: tempo para a primeira solução flutuante;
- TTFF RTK fixo: tempo para primeira solução fixa com 10 segundos de continuidade subsequentes.

É comum que receptores GNSS obtenham o primeiro fixo e, na sequência, percam esse status. O critério de 10 segundos é utilizado para ignorar essas situações em que o receptor ainda não obteve a solução fixa de forma estável.

2.11 EMBARCAÇÃO AUTÔNOMA DE SUPERFÍCIE

A embarcação autônoma de superfície deste trabalho é do tipo catamarã, ou seja, um veículo aquático de múltiplos cascos em que dois cascos são posicionados paralelamente. Catamarãs autônomos são, geralmente, de pequeno porte e facilitam o transporte, manuseio e operação. A Figura 28 mostra um exemplo de catamarã, sendo a segunda versão do Aero4River. Essa figura consta apenas a exemplo ilustrativo. A terceira (e última) versão do Aero4River possui formato e recursos aprimorados, sendo apresentada na Seção 3.1.

Existem diferentes topologias de catamarãs que se diferenciam da apresentada e que são voltadas para diversas aplicações. Nessa dissertação, o catamarã utilizado (Aero4River) apresenta quatro propulsores posicionados na parte superior dos cascos, com possibilidade de rotação independente no eixo perpendicular à superfície de água (SILVA, 2021).

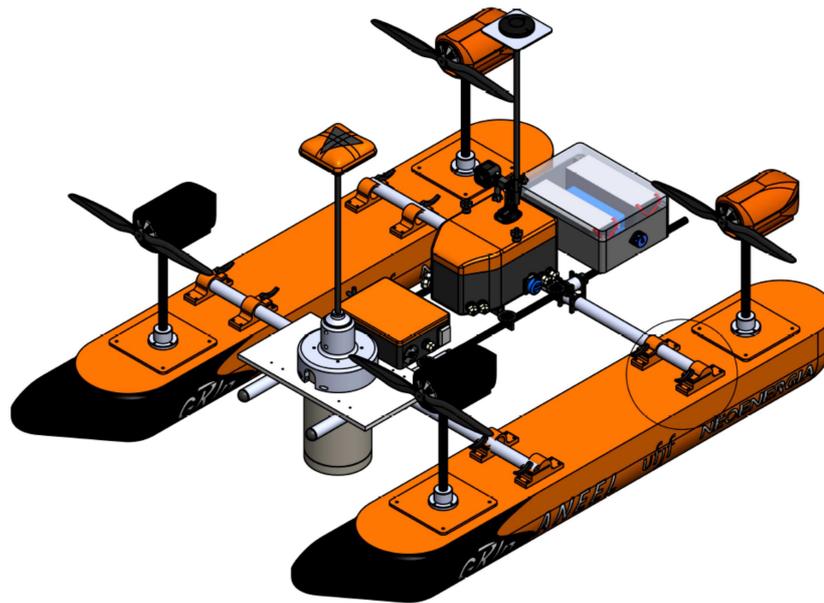
Essa característica possibilita que esse ASV navegue em águas mais rasas que os barcos convencionais, além de embarcar o sensor ADCP eliminando a interferência que um sistema de propulsão submerso geraria.

Assim como a grande maioria dos robôs, o Aero4River se beneficia da navegação utilizando o receptor GNSS e possui compatibilidade para navegação utilizando RTK.

2.12 Perfilador hidroacústico de correntes

O perfilador hidroacústico de correntes, ADCP, é um sensor que possui um conjunto de transdutores que emitem pulsos a uma frequência fixa dentro de uma coluna de água e recebem de volta o eco desses pulsos, retornados a partir de pequenas partículas e sedimentos presentes na água (MUSTE; YU; SPASOJEVIC, 2004). O eco recebido é

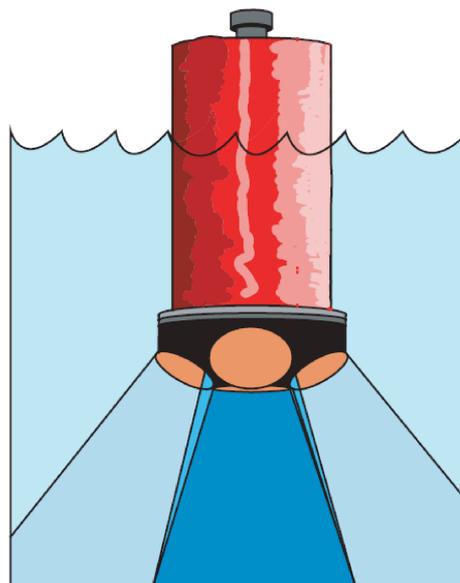
Figura 28 – Segunda versão do catamarã do projeto



Fonte: Grupo de Robótica Inteligente (GRIn)

dividido em "faixas" para produzir sucessivos segmentos, onde cada um é denominado célula de profundidade ou *bin*, que é processado independentemente. A velocidade relativa da água entre ADCP e sedimentos para cada célula é determinada usando a diferença de frequência entre a onda transmitida e a onda recebida (efeito *Doppler*). A Figura 29 mostra um ADCP em seu funcionamento convencional, ou seja, com seus transdutores montados próximos a superfície da água e apontando para baixo (SIMPSON, 2001).

Figura 29 – ADCP em sua operação convencional



Fonte: (SIMPSON, 2001)

Como a velocidade medida pelo ADCP é uma velocidade relativa, ou seja, velocidade da água mais a do barco, para se conhecer a velocidade da água é necessário extrair a velocidade do barco. Nesse caso, sugere-se a não movimentação do barco e, conseqüentemente, do ADCP, para que a velocidade do barco não afete a velocidade da água (GAMARO, 2020). A outra alternativa é uma forma acurada de definir a velocidade do barco de forma independente da velocidade da água.

O ADCP tem duas formas de determinar seu deslocamento (e conseqüentemente sua velocidade):

- Rastreamento de fundo (BT, do inglês *Bottom Tracking*)

Determina a velocidade e a direção do barco utilizando pulsos com comprimento de transmissão mais longos que os pulsos da água. Esses pulsos também são utilizados para medir a profundidade e se refletem mais intensamente quando comparados aos pulsos curtos utilizados para medir a velocidade da água. Esse método pode ser afetado caso exista uma grande quantidade de sedimentos se deslocando no leito e/ou no fundo do rio, o que gera um erro na velocidade relativa do barco e, conseqüentemente, na da água. Esse problema é mitigado com a utilização do RTK.

- Utilizando um sistema RTK

O uso de receptores GNSS RTK contribui para identificação da velocidade do barco durante a travessia, sendo a constelação de satélites a referência e não mais o fundo do rio. Essa é uma forma acurada de se definir a velocidade de forma não correlacionada com as aferições de velocidade da água.

Essa fundamentação contribui para a compreensão do funcionamento do sistema, bem como a importância de uso do RTK e seus possíveis ganhos na aplicação.

2.13 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou os principais componentes de um sistema GNSS, as fontes de erro presentes e os métodos de posicionamento utilizados. As principais interfaces de dados para troca de informações também foram apresentadas, com o propósito de facilitar o entendimento acerca da integração com outros dispositivos. Para possibilitar o entendimento do *hardware* envolvido, foram apresentados os principais componentes de um receptor GNSS.

Após a descrição para o entendimento sobre os equipamentos que compõem sistema GNSS, foram apresentadas as representações da superfície terrestre, úteis para conversão de coordenadas que possibilitam a realização das análises em um sistema métrico com referencial local. As coordenadas convertidas permitem a verificação de parâmetros de

desempenho do equipamento como acurácia, disponibilidade, continuidade e tempo para obtenção da solução fixa.

Por fim, foram apresentados alguns fundamentos da aplicação, composta por uma ASV e um sensor ADCP para aquisição de informações de vazão da água. A embarcação utilizada é denominada Aero4River e é do tipo catamarã, composta por dois cascos e propulsão aérea. A navegação da embarcação é beneficiada com o uso do RTK devido ao ganho de acurácia de posicionamento.

A apresentação de todos esses conceitos permitirá o entendimento do fluxo utilizado no Capítulo 3, que envolve os conceitos do sistema GNSS, a proposta de um receptor GNSS de baixo custo, a integração com a ASV e com o ADCP e as conversões de coordenadas e avaliações de desempenho realizadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a proposta de desenvolvimento do receptor de baixo custo. Para isso, foram descritos os equipamentos utilizados, seus esquemas de montagem e configuração, descrição de implementações e metodologias utilizadas na avaliação dos resultados de testes práticos. O GNSS RTK de baixo custo proposto recebe, deste ponto em diante, o nome *RTKBox* devido ao formato da base e à sua característica modular.

Também serão abordadas, nesse capítulo, as estratégias adotadas para realização dos testes práticos de avaliação do RTKBox, apresentadas na Seção 3.6.

3.1 MOTIVAÇÃO E DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Em sua configuração básica, o ADCP fornece dados para o operador, em solo, por meio de um cabo de 10 m fornecido pelo fabricante junto ao equipamento. Além de limitar drasticamente o alcance do sensor e, conseqüentemente, do Aero4River durante as operações, o cabo afeta a movimentação autônoma do barco, se tornando um grande limitador para a operação.

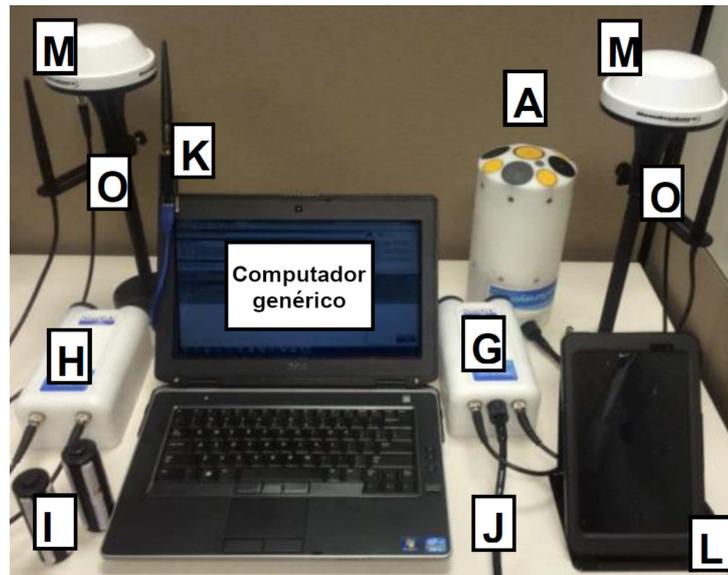
Além disso, a única conexão física disponível no ADCP impede a conexão de um GPS externo caso o operador opte por permanecer em terra. Para conectar um receptor GPS externo ao mesmo tempo em que se utiliza a telemetria (com o cabo de 10 m), o operador e o receptor devem estar na mesma embarcação e se movimentando junto ao ADCP. Isso ocorre devido ao fato do cabo ser único, obrigando que o operador e o receptor estejam no mesmo local.

No caso do Aero4River, é impossível que o operador permaneça constantemente junto à embarcação, restando-lhe a opção de permanecer em terra ao passo em que o ADCP deverá, obrigatoriamente, utilizar a técnica de *bottom tracking* para adquirir sua velocidade. O *bottom tracking*, descrito na Seção 2.12, está sujeito ao efeito de fundo móvel e pode culminar na definição errônea da medida de velocidade do sensor que, conseqüentemente, afeta as medidas de vazão realizadas.

Para ambos os cenários, o fabricante dispõe de equipamentos opcionais como o link de comunicação sem fio e o GPS RTK, que resolvem ambos os problemas citados. A Figura 30 e a Tabela 6 exibem a lista padrão de componentes e os opcionais, acompanhados de breves descrições.

O custo de ambos os equipamentos, entretanto, encarece consideravelmente a solução. Conforme exposto na Seção 3.4.4, um sistema GNSS RTK pode custar dezenas de milhares de reais. Além disso, o ADCP só permite conexão com receptores que operam utilizando o sistema americano GPS, limitando consideravelmente a gama de receptores disponíveis e eliminando a possibilidade de operação com o sistema mais novo, o GNSS.

Figura 30 – Periféricos opcionais do ADCP



Fonte: (SONTEK, 2018a)

TABELA 6 – Periféricos do ADCP

Item	Descrição
A	ADCP RiverSurveyor M9
G	PCM Rover (Posicionamento absoluto ou RTK)
H	Base do GPS RTK
I	Baterias para o PCM (duas para cada PCM)
J	Cabo de 1 m para comunicação e alimentação do ADCP
K	Rádio USB para comunicação sem fio
L	Tablet para realização das operações
M	Antena do GPS
O	Antena do rádio

O sistema proposto nesse trabalho foi motivado a partir das limitações existentes no sistema original. Para possibilitar a operação com o operador em terra acompanhando as coletas em tempo real, foi proposto um PCM próprio com sistema de comunicação sem fio e conversores que possibilitam energizar o ADCP utilizando o próprio sistema do barco.

O módulo de energia e comunicação é o componente responsável por garantir a comunicação entre o ADCP, embarcado no Aero4River, e o operador em terra. O PCM permite que o operador envie comandos para o ADCP, além de transmitir os dados coletados pelo ADCP em tempo real de volta para o operador. O PCM também é responsável por centralizar a comunicação entre o receptor GNSS RTK embarcado e o ADCP, estando nele o *hardware* responsável por viabilizar a comunicação entre ambos. Por fim, é atribuição do PCM regular o nível de tensão para que o ADCP e o receptor GNSS sejam corretamente energizados, convertendo o nível de tensão fornecido pelo Aero4River

para valores compatíveis com ambos.

Para garantir informações de posição/velocidade acuradas para o ADCP e também para o sistema de navegação do Aero4River foi proposto um sistema GNSS RTK, denominado RTKBox, com base que permanece em solo e se comunica sem fio, enviando correções de posição para a embarcação. A solução garante maior exatidão na coleta dos dados do ADCP, na navegação, além de eliminar as restrições impostas pelo uso do cabo fixo à embarcação. A Figura 31 exibe um resumo do sistema, acompanhado das respectivas descrições.

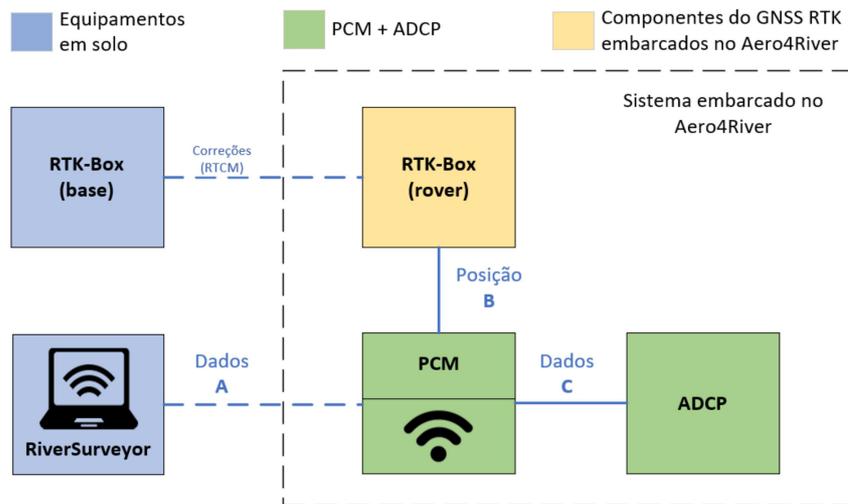


Figura 31 – Esquema de funcionamento do PCM no barco

- A. Comunicação sem fio a partir de rádio operando em frequência de 868 Hz que fornece todos os dados coletados para a estação em terra e que podem ser visualizados pelo operador a partir do *software River Surveyor*. O operador também pode enviar comandos ao ADCP que incluem configurações, início e final das coletas, dentre outros. Originalmente essa comunicação é realizada por meio de um cabo de 10 m, que limita a movimentação do barco;
- B. Saída de dados de posição que passam pelo PCM e são entregues ao ADCP. São necessárias conversões para integração do receptor GNSS ao ADCP, conforme evidenciado na Seção 3.5.1. As funções dos itens B e C são realizadas por um único cabo;
- C. Troca de dados a partir do cabo interligado ao ADCP que incluem: as informações trocadas com o computador e disponibilizadas no *software* de operação, os dados de localização fornecidos pelo GNSS e a alimentação, todos fornecidos pelo PCM. Essas funções são realizadas a partir do cabo de 8 vias ligado diretamente ao ADCP.

Com isso o PCM proposto cumpre a função de fornecer energia, dados de posição e telemetria sem fio ao ADCP. Conforme mencionado, a versão original necessita de um cabo de 10 m ligado constantemente ao operador e o link de comunicação sem fio elimina esse problema, favorecendo a movimentação livre do Aero4River. A ligação entre PCM e ADCP é realizada por meio de um único cabo, onde trafegam todas as informações mencionadas. As correções oriundas da base do sistema RTK também são enviadas sem fio, possibilitando à embarcação navegar sem qualquer cabo ou instrumento que limite sua operação. A Figura 32 exibe o Aero4River acompanhado dos equipamentos propostos.

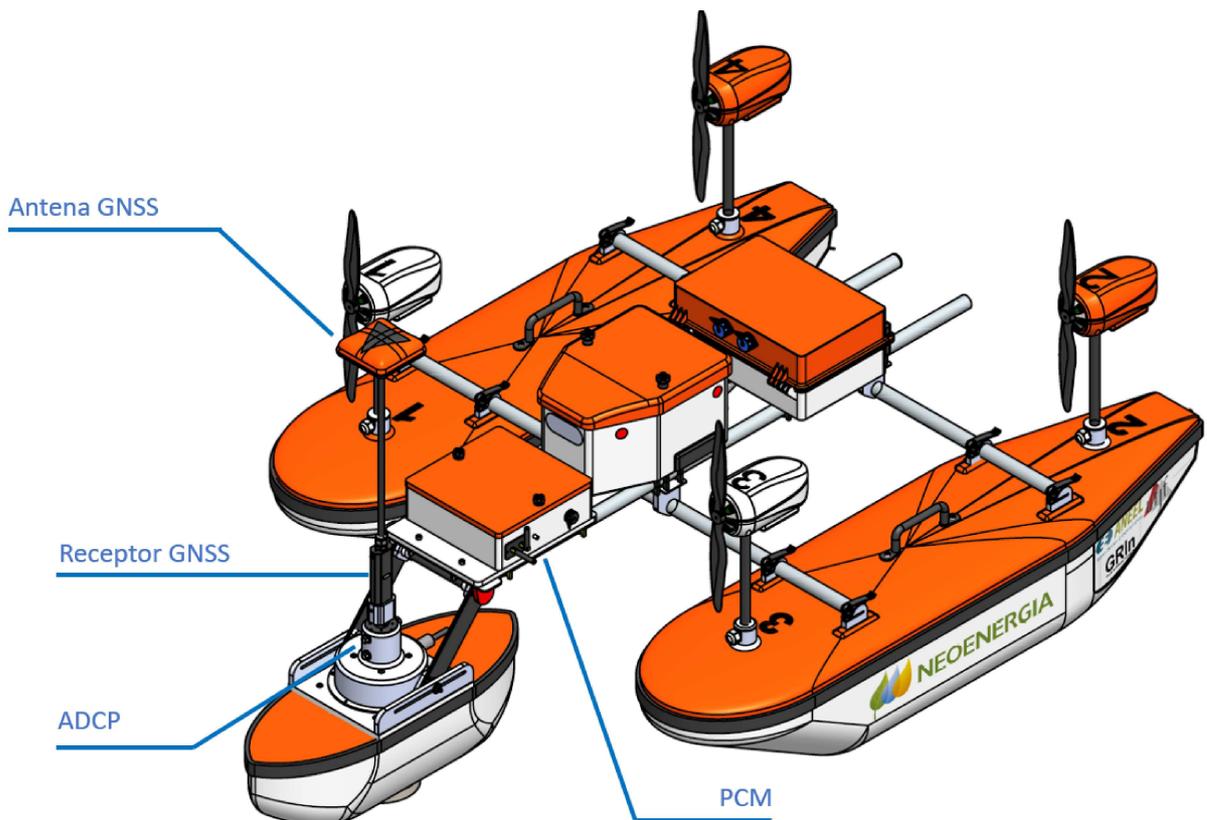


Figura 32 – Modelagem 3D do Aero4River

O receptor GNSS é posicionado acima do plano dos motores, conforme recomendação da Emlid, de forma a evitar possíveis interferências. O receptor também se encontra no mesmo eixo do sensor ADCP, dispensando configurações adicionais de *offset* de posicionamento da antena em relação ao sensor.

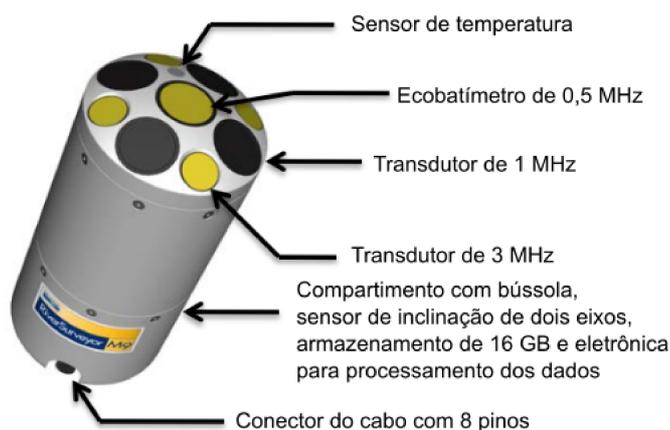
3.2 ADCP UTILIZADO

O River Surveyor M9 foi o ADCP utilizado nesse trabalho. Trata-se de um equipamento amplamente utilizado em operações em rios e canais abertos, com propósito de medidas de vazão e também para obtenção de dados geométricos da seção, perfis hidrodinâmicos, entre outros. A determinação desse sensor ocorreu antes do início desse trabalho

e parte das motivações dessa proposta são oriundas da utilização desse equipamento em conjunto com o Aero4River.

Esse ADCP conta com 9 transdutores distribuídos em 2 conjuntos de frequências distintas, contendo 4 transdutores cada, para determinação da velocidade da água e *bottom tracking* e um transdutor vertical de baixa frequência capaz de medir a profundidade (MOTTA, 2016). Alguns detalhes podem ser vistos na Figura 33.

Figura 33 – Configurações do River Surveyor M9



Fonte: Sontek (2018b)

Para esse trabalho, alguns detalhes de sua operação foram cruciais para especificação dos componentes do conjunto que opera junto ao receptor GNSS, sendo que os principais dizem respeito a sua parte eletrônica e de comunicação, como pode ser visto na Tabela 7.

TABELA 7 – Características do ADCP

Alimentação e comunicações	
Entrada	12 V - 18 V
Comunicação com dispositivos externos	RS232
GPS	RS232
Protocolo de comunicação	38400 N, 8, 1
Frequência dos dados	10 Hz
Sentença NMEA	VTG ou GGA

A comunicação RS232 desse ADCP traz a necessidade de conversão dos níveis lógicos TTL. Além disso, seu nível de tensão é diferente do fornecido pelo barco e também do utilizado no receptor GNSS, tornando necessária a conversão da tensão para energizá-lo. Um outro detalhe importante é que o ADCP só trabalha com o sistema GPS, ou seja, com a constelação norte americana.

Além de operar apenas com o GPS, o ADCP opera especificamente com as sentenças *GPGGA* ou *GPVTG* do protocolo NMEA. O fabricante, inclusive, recomenda que as

sentenças NMEA adicionais sejam desativadas no receptor GNSS a fim de evitar quaisquer problemas de comunicação (SONTEK, 2018b). Dessa forma, o RiverSurveyor M9 é pronto para uso, ou *out-of-the-box*, conjuntamente com o Emlid Reach, necessitando de circuitos adicionais para compatibilizar a solução.

3.3 PROPOSTA DO PCM

O PCM desenvolvido visou, conforme mencionado, a integração do ADCP ao Aero4River, possibilitando operação remota, sem fio, e com utilização do RTKBox para fornecimento de informações de posição acurada ao barco e ao sensor. O diagrama com o esquema do PCM pode ser visto na Figura 34.

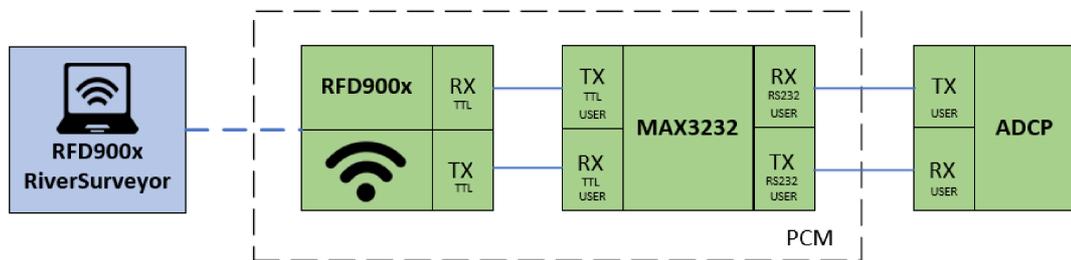


Figura 34 – Diagrama do PCM proposto

Para conversão dos níveis lógicos TTL para RS232 foi utilizado o mesmo circuito do RTKBox, o MAX3232. No decorrer do desenvolvimento do RTKBox já haviam sido verificadas as inconsistências de alcance existentes no XBee. Por essa razão, optou-se pela utilização do link de comunicação sem fio RFD868x. Esse rádio opera em frequência de 868 MHz e, de acordo com o fabricante, possui alcance de aproximadamente 40 km em cenários livres de obstáculos (RFDESIGN, 2019).

A Figura 35 mostra o equipamento real. Conforme mencionado, a ligação entre ADCP e PCM é realizada por um único cabo. O Aero4River disponibiliza a energia ao PCM, que a converte para os níveis apropriados de operação do ADCP e do RTKBox.



Figura 35 – PCM (destacado) junto a demais componentes do Aero4River

3.4 PROPOSTA DO RTKBOX

O RTKBox teve como objetivo fornecer dados acurados de posição ao ADCP, por meio da utilização da técnica de posicionamento RTK, utilizando componentes de baixo custo e facilmente encontrados em território nacional. As seções seguintes descrevem os componentes utilizados, os esquemas de montagem, especificações e custos do equipamento.

3.4.1 MÓDULO GNSS UTILIZADO

Como o objetivo é o de possibilitar o uso de um sistema RTK de baixo custo conjuntamente a embarcação, o módulo GNSS RTK deve atender ao requisito de minimização de custos do projeto. Para isso, foi utilizado o módulo Emlid Reach, que se encontrava disponível no Grupo de Robótica Inteligente da UFJF e apresenta baixo custo comparado a outras opções de mercado.

A Emlid fabrica diferentes tipos de módulos, sendo o Emlid Reach o mais básico deles. Esse módulo permite a integração com outros dispositivos por meio da porta serial, porta USB ou via comunicação Wi-Fi. Como mencionado anteriormente, possui uma Intel Edison responsável por realizar seu processamento. A Figura 36 mostra o módulo.



Figura 36 – Módulo GNSS Emlid Reach

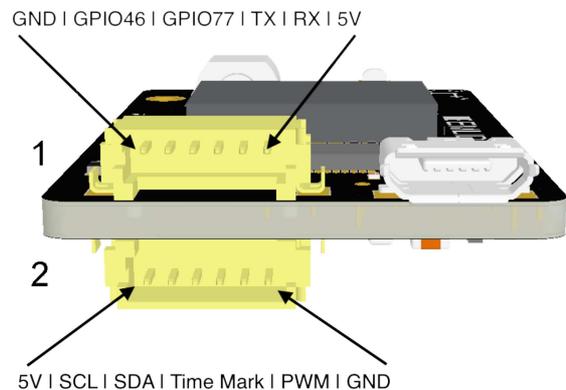


Figura 37 – Portas de comunicação do Emlid Reach

O Emlid Reach possui uma versão mais recente, o Reach M+, que possui um processador novo e uma capa plástica de proteção. Na essência, ambos se assemelham nas características e são equipados com módulos u-blox para realização de suas tarefas principais.

Os módulos u-blox equipam muitos robôs e equipamentos de baixo custo em operação atualmente. Eles possuem baixo custo e grandes possibilidades para configuração e integração com outros dispositivos. O módulo GNSS Emlid Reach trabalha com o u-blox da linha M8, que possui especificações de acordo com a Tabela 8.

A Figura 37 mostra algumas portas de comunicação do Emlid Reach. As portas USB, TX e RX (UART1), SCL e SDA (I2C) podem ser utilizadas na comunicação com outros equipamentos. Nesse trabalho as portas USB, RX e TX foram exploradas.

TABELA 8 – Especificações técnicas do Emlid Reach (u-blox M8T (UBLOX, 2020b))

Descrição	Especificação
GNSS	GPS L1C/A, SBAS L1C/A, QZSS L1C/A, QZSS L1 SAIF, GLONASS L1OF, BeiDou B1, Galileo E1B/C
Acurácia horizontal (por ponto simples)	2,5 m
Taxa de atualização	5 Hz
Tensão de entrada	4,75 - 5,5 V
Corrente de operação	200 mA
Interfaces	UART, USB, SPI, I2C, Wi-Fi
Preço	US\$ 460,00 (Reach M+ com taxas e impostos inclusos)

Os módulos Emlid Reach executam o RTKLIB internamente, implementando a própria biblioteca de execução do RTK. Eles operam conjuntamente com aplicativos como o ReachView (ou, atualmente, Emlid Flow), que possuem uma interface web para que o usuário realize suas operações.

A antena utilizada em conjunto com o módulo é uma Tallysman TW4721, vista na Figura 38. Trata-se de uma antena de banda única que possui um consumo aproximado de 10 mA, conforme especificações do fabricante (TALLYSMAN, 2015).



Figura 38 – TW4721



Figura 39 – XBee

3.4.2 Comunicação base/rover e componentes de energia do sistema

Para que a base seja capaz de enviar correções para o rover em tempo real, faz-se necessária a utilização de um link de comunicação sem fio. Os sistemas de comunicação com um maior alcance para realização de comunicação serial sem fio geralmente são dispositivos RF (de radiofrequência). Alguns podem alcançar centenas de metros, enquanto outros podem alcançar dezenas de quilômetros.

Assim como no caso do Emlid Reach, a definição dos receptores RF também esteve condicionada a manutenção do baixo custo do equipamento. Com isso, optou-se pela utilização de um módulo Xbee, que possui baixo custo e se encontrava disponível no laboratório para realização de testes.

O Xbee é uma marca de dispositivos de baixo consumo, energeticamente econômicos, que se comunicam sem fio e são comumente utilizados para controle remoto, automação e aplicações de internet das coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*). Trata-se de um dispositivo capaz de proporcionar transmissões de dados de maneira segura em pequenas e médias distâncias. Algumas especificações podem ser vistas na Tabela 9. O módulo Xbee pode ser visto na Figura 39.

TABELA 9 – Especificações técnicas do XBee (XBee-PRO XSC (DIGI, 2020))

Descrição	Especificação
Banda de frequência	902 MHz a 928 MHz
Taxa de transferência	10 ou 20 Kbps
Alcance em ambiente urbano	Até 610 m
Tensão de entrada	2,4 - 3,6 V
Corrente de operação	240 mA
Preço	U\$ 96,00 (com impostos e taxas inclusos)

Para ligação do XBee ao sistema, foi utilizada uma antena omnidirecional de 2.1 dBi com conector RPSMA-macho e um adaptador para USB/Serial, que permite a configuração e conexão do XBee ao Emlid Reach. O custo de uma antena é de aproximadamente R\$ 100,00, enquanto o do adaptador é R\$ 40,00. Ambos podem ser vistos na Figura 40.

Para fornecer energia ao sistema, uma bateria de lítio-ion de 7,4 V, 4400 mAh, ligada a um regulador de tensão *step-down* LM2596 com saída ajustada para 5 V, é capaz de alimentar o sistema durante um período de até 8h. O custo da bateria é de aproximadamente R\$ 150,00, enquanto o conversor tem custo de R\$ 20,00. A figura 40 exhibe também esses componentes.



Figura 40 – Antena, adaptador para o XBee, bateria e regulador de tensão

3.4.3 Circuito elétrico

Para uso da base ou do rover de forma independente o circuito é simples e consiste na ligação do Xbee ao Emlid Reach conjuntamente com demais componentes para fornecimento de energia ao sistema. A Figura 41 exibe as ligações.

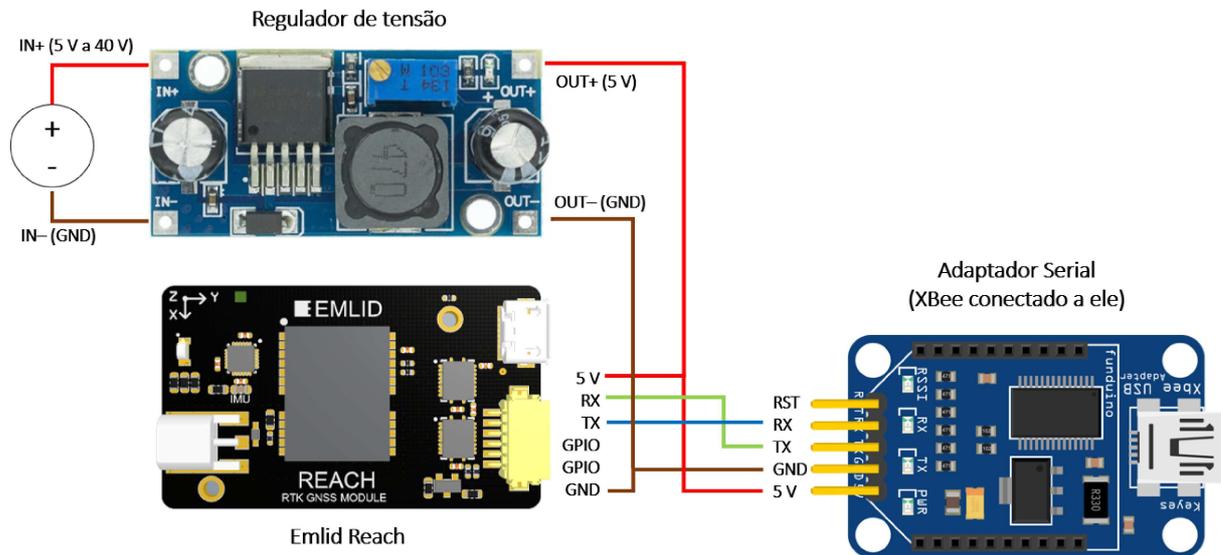


Figura 41 – Esquema de ligação

Para alocar todos os componentes, além de possibilitar a operação do equipamento em situações com maior incidência de luz solar ou mesmo de chuva leve, foi desenvolvida uma carcaça de proteção. O protótipo do equipamento, visto na Figura 42, foi projetado com apoio de *software* CAD 3D e teve sua carcaça impressa em impressora 3D, com acabamento em massas utilizadas para reparos automotivos. A Seção 3.4.4 traz informações mais detalhadas da solução.



Figura 42 – Protótipo do sistema montado

3.4.4 Custo e especificações

O circuito apresentado pode ser utilizado tanto na base, quanto no rover. O custo do equipamento é exibido na Tabela 10. No cálculo foi considerado a cotação do dólar a R\$ 5,20 com taxas e impostos inclusos.

TABELA 10 – Custo do equipamento

Componente	Quantidade	Custo
Emlid Reach	2	R\$ 4784,00
Antenas para o Emlid Reach	2	R\$ 1060,80
XBee S3B	2	R\$ 624,00
Antenas para XBee	2	R\$ 70,82
Adaptador USB/Serial	2	R\$ 116,00
Bateria 7,4 V, 4400 mAh	2	R\$ 200,00
Arduino Nano	2	R\$ 132,00
Regulador de tensão	2	R\$ 25,20
Placa metálica de 10mm x 10mm para antena	2	R\$ 72,28
Insumos para acabamento externo	2	R\$ 200,00
	Total	R\$ 7.485,10

Nos insumos para acabamento externo foram considerados materiais como o insumo para impressão da carcaça em impressora 3D e massas automotivas para o acabamento realizado manualmente. No caso do barco, o sistema embarcado já possui local apropriado e não precisaria desse acabamento, diminuindo o custo desses insumos pela metade.

Além disso, foram consideradas duas baterias, porém o Aero4River conta com energia própria e o GNSS pode ser alimentado por essa fonte, sendo a segunda bateria incluída no cálculo apenas para demonstrativo do custo do sistema independente e pronto para operar em qualquer outra aplicação.

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, 2020). 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.

A critério de comparação, a Tabela 11 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 11 – Equipamentos equivalentes

Nome	Componentes	Custo
Navin RTK	Base, rover e link de comunicação	R\$ 31.500,00 ¹
Reach M2 UAV RTK	Base, rover e link de comunicação	R\$ 26.960,00 ²
DJI D-RTK 2	Base e link de comunicação	R\$ 28.990,00 ³
GNSS RTK de baixo custo	Base, rover e link de comunicação	R\$ 7.485,10

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.

Dessa forma, o equipamento possui custo inferior a R\$ 10.000,00, mais barato que as soluções comerciais geralmente encontradas no mercado. A Tabela 12 traz suas especificações técnicas.

TABELA 12 – Especificações técnicas do sistema com 2 receptores

Descrição	Especificação
GNSS	GPS L1C/A, SBAS L1C/A, QZSS L1C/A, QZSS L1 SAIF, GLONASS L1OF, BeiDou B1, Galileo E1B/C
Interfaces	UART, USB, SPI, I2C, Wi-Fi
Banda de frequência do rádio	902 MHz a 928 MHz
Alcance em ambiente urbano	Até 610 m
Corrente normal de operação	500 mA
Tensão	3,2 a 40 V (determinada pelo regulador de tensão)
Preço	R\$ 7.485,10 (com impostos e taxas inclusos)

¹<<https://loja.allcomp.com.br/produto/gnss-navin-rtk-c-par-de-radios.html>>. Acesso em: 29 ago. 2022.

²<<https://loja.emlid.com.br/product/reachm2-uav-rtk-kit/>>. Acesso em: 29 ago. 2022.

³<<https://www.dronedireto.com.br/dji-d-rtk-2-gnss-mobile-station-drone-matrice-series>>. Acesso em: 29 ago. 2022.

3.5 INTEGRAÇÃO ENTRE RECEPTOR GNSS E ADCP

3.5.1 Ajuste da sentença NMEA

Conforme mencionado na Seção 2.12, a compatibilidade do ADCP é garantida com o GPS (sistema americano). O Emlid Reach, por sua vez, retorna seus dados por meio do protocolo NMEA, porém com sentença iniciada por "GN", devido à utilização das constelações GNSS. Tal cenário impossibilita a comunicação direta entre ambos os equipamentos.

Figura 43 – Pseudocódigo para ajuste da sentença NMEA

Algoritmo 1: CONVERSÃO DA SENTENÇA NMEA

Entrada: Sentenças NMEA: GNRMC, GNGGA, GPGSA, GLGSA, GAGSA, GPGSV, GLGSV, GAGSV, GNGST, GNVTG
Saída: Sentenças NMEA: GPGGA, GPVTG

```

1 início
2   para Dados disponíveis na serial faça
3     se Byte lido for "$ (Primeiro byte da sentença NMEA) então
4       | /* Subseção 2.4.4.1: primeiro caractere da sentença é $ */
5       | Inicia variável de índices do buffer
6     fim
7     se Byte lido ≠ '\r' (Lê a sentença até o é carriage return) então
8       | /* Subseção 2.4.4.1: penúltimo caractere da sentença é '\r' */
9       | Armazena byte no buffer
10    fim
11    se Byte lido ≠ '\n' (Último caractere da sentença é o line feed) então
12      | /* Subseção 2.4.4.1: o último caractere da sentença é o '\n' */
13      | /* Nesse ponto a sentença foi completamente lida */
14      | se Cinco primeiros caracteres = GNVTG então
15        | Converte conteúdo da sentença de GNVTG para GPVTG
16        | Elimina checksum da sentença antiga
17        | Faz o cálculo do novo checksum utilizando um XOR em todos os
18        | bits da nova sentença
19      fim
20      | se Cinco primeiros caracteres = GNGGA então
21        | Converte conteúdo da sentença de GNGGA para GPGGA
22        | Elimina checksum da sentença antiga
23        | Faz o cálculo do novo checksum utilizando um XOR em todos os
24        | bits da nova sentença
25      fim
26    fim
27  fim
28 fim

```

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. Além disso, as demais mensagens, exceto a GPGGA e GPVTG, são filtradas para não serem repassadas ao ADCP, conforme orientação do fabricante (SONTEK, 2018b). Isso possibilita que o ADCP seja capaz de realizar a leitura dos dados de qualquer GNSS (sentenças GGA e VTG). A Figura 43 exibe o pseudocódigo da implementação realizada em C++ para execução no Arduino.

3.5.1.1 Cálculo do checksum

O *checksum* da sentença é determinado por meio de uma operação *exclusive-or* envolvendo todos os caracteres da sentença compreendidos entre o começo (\$) e o separador do *checksum* (*). O operador *exclusive-or* retorna verdadeiro se, e somente se, os dois operandos forem diferentes, ou seja, um verdadeiro e outro falso.

Cada caractere da sentença é expressado em uma sequência de 8 bits (ASCII). Essa sequência é dividida em conjuntos de 4 bits (*nibbles*) e cada um é convertido em um valor hexadecimal (0 ... 9, A ... F) (UBLOX, 2009). O *checksum* consiste em dois valores hexadecimais convertidos em caracteres ASCII.

Em C++ essa operação é realizada por meio de operadores *bitwise* (operações bit-a-bit). O operador EXOR é representado pelo acento circunflexo $\hat{}$. Assumindo dois caracteres codificados em ASCII $A = 65 = 01000001$ e $B = 66 = 01000010$, tem-se a operação *bitwise* EXOR:

$$A = 0100\ 0001$$

$$B = 0100\ 0010$$

$$A \hat{ } B = 0000\ 0011$$

Um exemplo prático do procedimento realizado no algoritmo da Figura 43 pode ser visto no Anexo B.

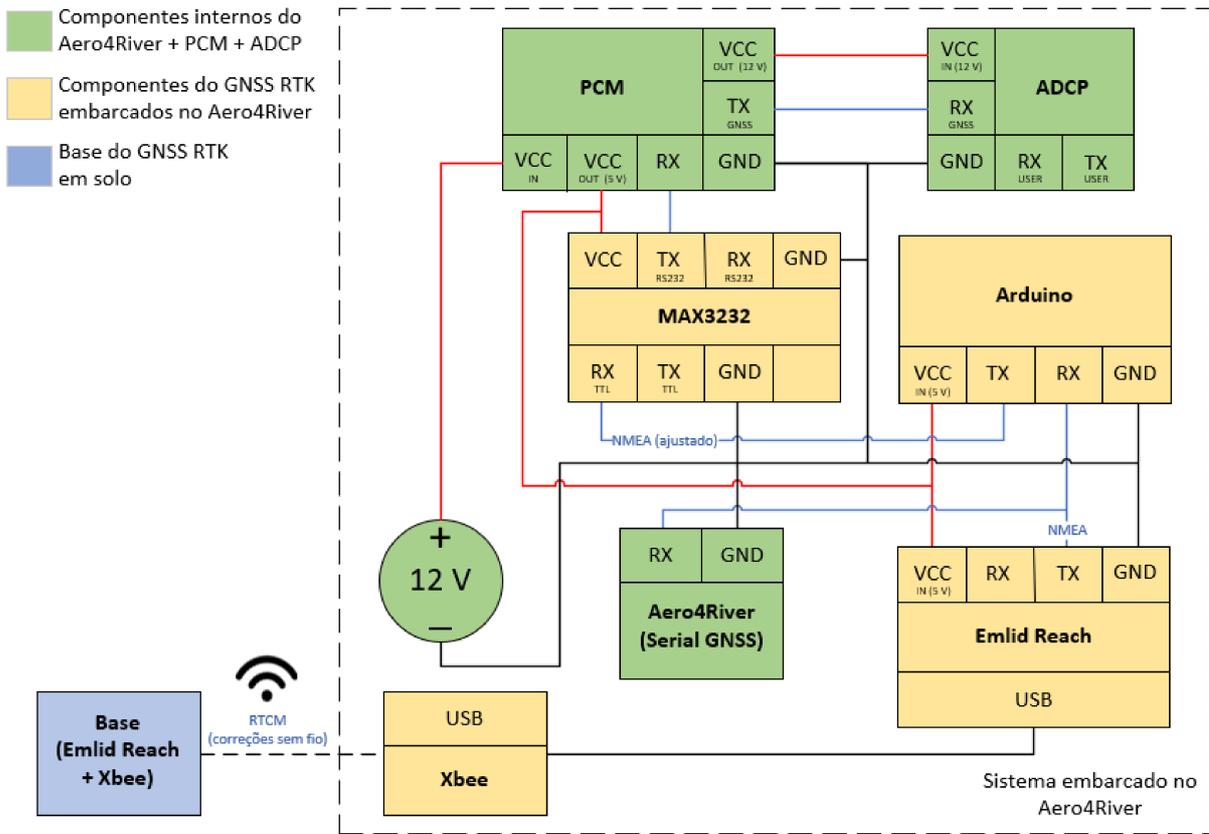
3.5.2 Circuito eletrônico

Assim como em outros sensores, o ADCP se comunica usando o padrão RS232, 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 completo do receptor GNSS embarcado no Aero4River é exibido na Figura 44.

Algumas considerações sobre o circuito da Figura 44.

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

Figura 44 – Ligação do GNSS RTK ao sistema do barco e ao ADCP



Fonte: Próprio autor

- A comunicação entre base e rover é realizada pelo Xbee S3B que repassa as mensagens no formato RTCM3;
- Para conexão do Rádio (Xbee) ao Emlid Reach foi utilizada a porta USB, a fim de manter a serial livre para comunicação com o Arduino (tanto na base quanto no rover);
- O Emlid Reach fornece os dados de posição por meio do protocolo NMEA em níveis lógicos TTL. Os dados podem alimentar o Arduino e a controladora do Aero4River (Pixhawk) simultaneamente;
 - É possível enviar os dados da base, quando conectada à estação em solo, para envio das correções utilizando o *Mission Planner* ou *MAVSDK*.
- O conversor MAX3232 recebe a sentença NMEA, corrigida no Arduino, em níveis de tensão em TTL e a transmite para o ADCP em níveis de tensão RS232;
- Arduino, MAX3232 e Emlid Reach tem sua energia fornecida por meio de um regulador que diminui a tensão de entrada para 5 V;

- A energia provida para os itens anteriores e para o ADCP é fornecida pelo PCM, embarcado no Aero4River.

Para o correto funcionamento no circuito, o Emlid Reach precisa ser corretamente configurado para que o output de posição do rover e o envio das correções da base seja realizado utilizando os protocolos corretos na frequência correta. Os detalhes dessa configuração podem ser encontrados no Apêndice A.

3.6 PROCEDIMENTO DE COLETA DE DADOS

Essa seção apresenta os procedimentos e metodologia proposta para realização dos testes com o RTKBox. Foram realizados testes estáticos e cinemáticos com o propósito de verificação do equipamento em ambas as situações.

Os testes estáticos tiveram o propósito de coletar dados do rover do RTKBox parado, de forma a possibilitar a verificação do desempenho do equipamento nessas circunstâncias. O cenário de operação do Aero4River pode exigir coletas em regiões específicas com a embarcação parada ou com movimento lento.

Os testes cinemáticos refletem um cenário próximo ao de operação do Aero4River com o ADCP. Em uma travessia da embarcação, é esperado que o sistema RTK tenha maiores dificuldades para se manter com solução fixa devido à maior dificuldade para solução das ambiguidades. Esses testes visam o levantamento de dados para verificação do desempenho do RTKBox nessas condições.

3.6.1 Testes estáticos

Os testes foram realizados na faculdade de engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora - Campus Juiz de Fora. As coordenadas de referência foram obtidas utilizando um receptor GNSS TechGeo GRT-G2 equipado com uma antena NovAtel NOV702GG.

Os testes do receptor de baixo custo foram realizadas em três pontos diferentes, sendo aqui denominados P1, P2 e P3. Na coleta da posição de referência, foram adquiridas aproximadamente 2 h de dados no P1, 4 h no P2 e 7 h no P3. O mesmo procedimento foi realizado para definir a posição da base, onde o equipamento ficou 8 h na posição referência. As observações coletadas foram processadas no serviço PPP-IBGE para que a referência fosse determinada com a melhor exatidão possível. Todas as referências utilizadas nesse trabalho possuem marcos geodésicos espalhados próximos aos galpões das faculdades de engenharia (civil e elétrica).

Nos testes com o RTKBox foram realizadas coletas nos pontos P1, P2 e P3 durante períodos de 2 h, com frequência de 1 Hz, que estão descritas na Seção 4. Os testes foram realizados utilizando o sistema Ntrip, recebendo correções da estação MGJF, pertencente

à RBMC-IP, e também via link de rádio. A Figura 45 exibe os locais onde os testes foram realizados. O número de horas adotado foi suficiente para as medições e foi definido de acordo com a disponibilidade do equipamento e do autor para realização dos testes.

Figura 45 – Pontos da faculdade de engenharia



Fonte: Próprio autor

3.6.2 Testes cinemáticos

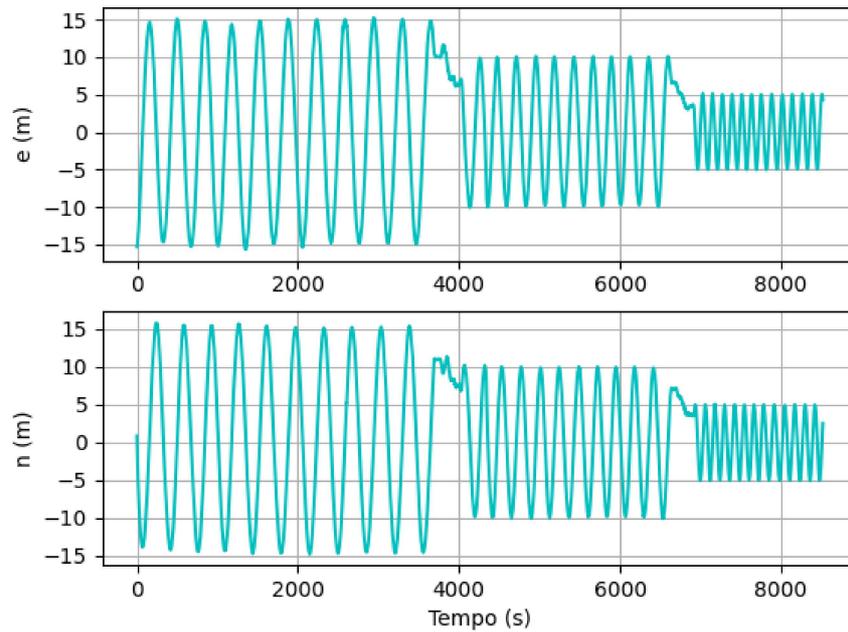
Os testes cinemáticos foram realizados para avaliação do desempenho do sistema ao longo do movimento realizado pelo Aero4River ao longo das coletas. Nos testes foi utilizada uma corda, com uma de suas pontas fixa a um poste (de coordenadas conhecidas) e a outra junto a uma pessoa que realizava trajetórias circulares com raio fixo de 5 m, 10 m e 15 m. Foram realizadas aproximadamente 30 voltas.

As conversões do sistema de coordenadas geodésico para o sistema de coordenadas geodésico local é realizada utilizando como referência as coordenadas do centro da circunferência (o poste). A avaliação de cada uma das componentes e e n , individualmente, em função do tempo fornece uma senoide com valores de pico (mínimos e máximos) equivalentes ao raio da respectiva circunferência. A Figura 46 mostra a senoide mencionada.

É possível observar que a Figura 46 apresenta uma senoide que varia em amplitude, se apresentando de três formas diferentes. A amplitude começa em 15 m, passando por 10 m e terminando com 5 m, valores esses que correspondem ao comprimento da corda (ou raio da circunferência) utilizada nos testes.

Comparando esses valores, relativos ao movimento, aos valores de raio (referências de 5 m, 10 m e 15 m) é possível obter a acurácia utilizando as Equações da Subseção 3.7.

Figura 46 – Série temporal do teste cinemático



Fonte: Próprio autor

A Figura 47 exibe diferentes momentos do teste em uma mesma imagem, capturados por um drone.

Figura 47 – Trajetória do teste cinemático



Fonte: Próprio autor

Além da acurácia utilizando a REQM, também foram avaliados parâmetros como a acurácia utilizando o critério de 95% da probabilidade acumulada e a disponibilidade da solução fixa e flutuante. Como o propósito do equipamento é a utilização no ADCP para

obtenção dos dados de posição horizontal em superfície aquática (altitude constante), as informações do posicionamento vertical não foram avaliadas.

3.6.3 Testes com o Aero4River

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 (receptor GNSS u-blox M8P presente no receptor GNSS Here 3). As Figuras 48 e 49 mostram o equipamento embarcado.

Figura 48 – Base e rover



Fonte: Próprio autor

Figura 49 – Receptor embarcado



Fonte: Próprio autor

Nesse teste foi comparada a diferença do erro do posicionamento utilizando o RTK e utilizando o posicionamento por ponto simples. Também foram validadas a comunicação do barco com a estação em terra, a comunicação da base com o rover e o funcionamento da integração realizada entre RTK e ADCP.

3.7 ANÁLISE DOS DADOS

Para análise dos dados, todos os códigos foram implementados em Python 3.8.9, utilizando a biblioteca Pandas 1.3.0 para importar os arquivos de posição e o Numpy 1.21.0 para realização dos cálculos⁵.

Todos os cálculos foram realizados com as coordenadas convertidas para o sistema de coordenadas cartesianas locais, utilizando as conversões apresentadas na Seção 2.6. Foram avaliadas as métricas de desempenho apresentadas na Seção 2.10, sendo: acurácia, disponibilidade, continuidade e tempo para primeiro fixo.

⁵<https://github.com/GuiABP/GNSS_RTK/tree/main/Analises>

Os resultados obtidos foram comparados com os obtidos por Sanna, Pisanu e Garau (2022), Jackson et al. (2018) e Madawalagama et al. (2019). Nesses dois últimos trabalhos os testes são realizados em três cenários específicos, conforme visto na Figura 50.

Figura 50 – Cenários/casos dos testes



Fonte: Próprio autor

- Caso 1: apresenta visada livre do céu. É o cenário ideal para obtenção de um melhor desempenho do equipamento;
- Caso 2: apresenta alguns obstáculos que podem prejudicar de forma leve o desempenho do equipamento;
- Caso 3: apresenta muitos obstáculos como vegetação e construções que podem afetar severamente o desempenho do equipamento.

No contexto desse trabalho, pode-se afirmar que o ponto P1 corresponde ao caso 3, pois encontra-se em um local com muitas obstruções. Nesse caso a expectativa é de que as métricas de desempenho sofram maiores prejuízos.

Os pontos P2 e P3 correspondem ao caso 2, pois encontram-se em localidade com alguns obstáculos que podem gerar redução de desempenho no equipamento. Nenhum dos pontos testados nesse trabalho se assemelha ao caso 1, não tendo sido esse cenário avaliado.

A distinção desses casos/cenários é crucial para o comparativo justo dos equipamentos, tendo sido evidenciados no Capítulo 4 para tornar possível a avaliação em circunstâncias semelhantes.

Por outro lado, deve-se ressaltar que o cenário de operação do barco é, geralmente, mais próximo do caso 1. A presença de árvores e demais obstáculos nos locais de navegação do barco também podem criar um cenário próximo ao caso 2. Um ambiente com maior quantidade de obstáculos, semelhante ao caso 3, não é esperado na operação com o barco, porém foi considerado nesse trabalho por tratar-se de um cenário crítico e que pode ocorrer, mesmo com menor probabilidade.

3.8 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou a proposta de um sistema composto por dois receptores de baixo custo denominado RTKBox. Também foi proposto um módulo de energia e comunicações para operação integrada ao sensor ADCP, denominado PCM.

Os equipamentos desenvolvidos visaram a resolução de problemas impostos pela utilização do ADCP em sua versão mais básica, sem opcionais. Esses desafios consistiam de limitações de movimentação do Aero4River devido a um cabo que deveria permanecer fixo ao ADCP durante a operação. O cálculo de velocidade realizado internamente pelo ADCP também poderia apresentar falhas, dependendo do local de realização da coleta de informações.

O PCM desenvolvido resolveu o problema da conectividade, eliminando a necessidade do cabo e permitindo ao operador permanecer em solo durante as coletas. O RTKBox, por sua vez, resolveu a questão da acurácia de posição e velocidade fornecida ao ADCP.

Conforme almejado, a proposta do RTKBox contou com dispositivos de baixo custo como o Arduino e o Xbee, mantendo o custo final do sistema abaixo de R\$ 10.000,00. Além disso, o sistema contou com dispositivos facilmente encontrados em mercado nacional, fato esse que possibilita a reprodução do sistema por quaisquer pesquisadores/desenvolvedores que desejam aplicar um sistema GNSS RTK a seus projetos.

A metodologia de testes apresentada contemplou testes estáticos e cinemáticos, permitindo explorar cenários de operação mais próximos aos encontrados pelo Aero4River durante as operações. Os testes e análises utilizando a metodologia proposta encontram-se no Capítulo 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 TESTES ESTÁTICOS

Seguindo a metodologia apresentada na Seção **3.6.1**, foram realizados testes em cada um dos pontos mencionados. Todos os pontos da faculdade de engenharia possuem o marco geodésico com a referência de posição e, portanto, suas coordenadas foram utilizadas para a avaliação de acurácia.

Para a coleta nos pontos da universidade a base foi posicionada utilizando um tripé de baixo custo adaptado para o equipamento. A antena ficou situada a 1,62 m do solo, conforme visto na Figura 51. Foi utilizado o inclinômetro de um *smartphone* para garantir a centralização acima dos marcos de referência.

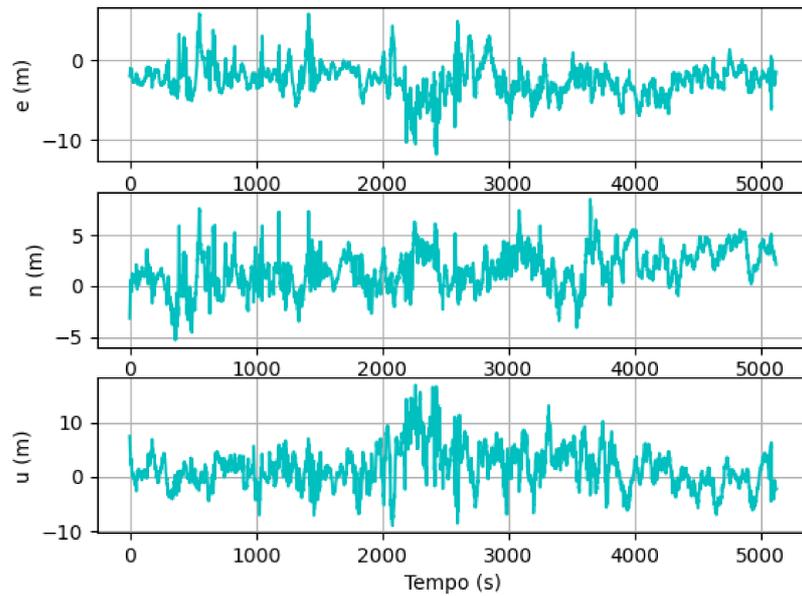
Figura 51 – Equipamento montado em tripé de baixo custo



Fonte: Próprio autor

Para evidenciar as vantagens do posicionamento usando RTK em relação ao posicionamento por ponto simples, foi realizado um teste onde o receptor foi posicionado em um mesmo local utilizando ambas as abordagens. Nos testes o equipamento foi posicionado por mais de 1h30min coletando dados a uma frequência de 1 Hz. As Figuras 52 e 53 mostram o posicionamento por ponto simples e por RTK, respectivamente.

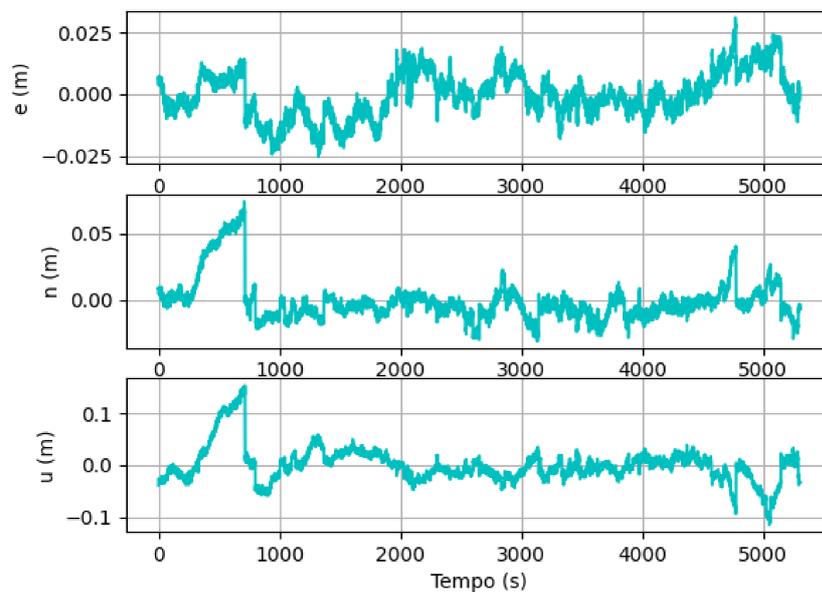
Figura 52 – Série temporal de teste utilizando posicionamento por ponto simples



Fonte: Próprio autor

No posicionamento por ponto simples, visto na Figura 52, percebe-se oscilações de, em média, 5 m com picos de até 10 m. Conforme o esperado, a altitude apresenta erros e oscilações com picos maiores quando comparada as componentes n e e . A componente vertical é mais sensível à configuração geométrica dos satélites e aos erros não modelados de refração atmosférica, sendo esse erro aproximadamente duas vezes maior que o erro horizontal (SEEBER, 2003).

Figura 53 – Série temporal de teste utilizando RTK via NTRIP



Fonte: Próprio autor

No posicionamento utilizando RTK, visto na Figura 53, percebe-se picos consideravelmente inferiores aos do posicionamento por ponto simples, apresentando variações de $\pm 0,03$ m para componentes horizontais e 0,05 m para componente vertical.

4.1.1 Acurácia

Seguindo a metodologia da Seção 2.10.1, foram realizados os testes para verificação da acurácia do equipamento, que foi posicionado por períodos de 2h em cada um dos pontos da Universidade. Os dados de outros receptores avaliados em trabalhos relacionados foram incluídos para comparação. As informações podem ser visualizadas na Tabela 13.

TABELA 13 – Raiz do erro médio quadrático das componentes e, n, u , horizontal e tridimensional

Teste	$REQM_e$	$REQM_n$	$REQM_u$	$REQM_H$
P1 (RTK via NTRIP)	0.0541 m	0.0867 m	0.4379 m	0.1022 m
P2 (RTK via radio)	0.0459 m	0.0289 m	0.0725 m	0.0542 m
P3 (RTK via radio)	0.0209 m	0.0416 m	0.0167 m	0.0466 m
P3 (RTK via NTRIP)	0.0762 m	0.0201 m	0.0711 m	0.0788 m

Como é possível perceber, em todos os testes o equipamento obteve uma acurácia planimétrica de ordem centimétrica. Sobre os testes, algumas considerações:

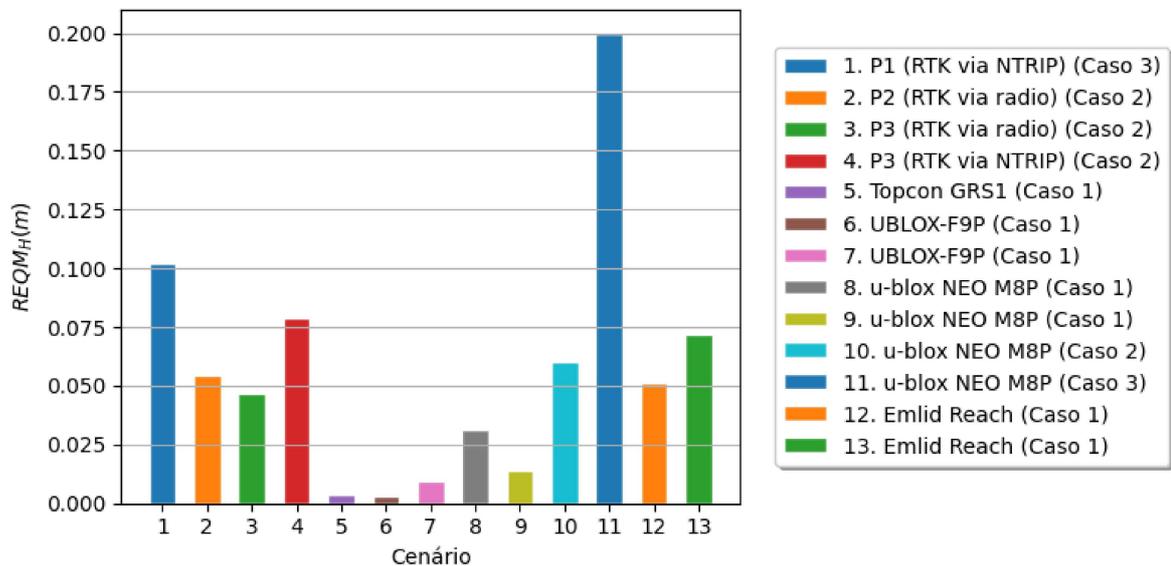
- Nos testes no ponto P1 o erro foi maior quando comparado aos demais. Além disso, foi observado um valor considerável de erro na componente vertical. Essas características estão, possivelmente, relacionadas às características desse local, que encontra-se em meio a dois galpões que obstruem parcialmente a visada do céu. Conforme evidenciado na Seção 2.2.2, uma forma de mitigar esse erro é configurando o parâmetro de máscara de elevação para que sejam negligenciados os sinais de satélites com baixo ângulo e que, conseqüentemente, sofrem mais com o multicaminhamento decorrente das construções no entorno. Outra característica observada nesse ponto foi a instabilidade no link de comunicação entre base e rover na utilização do posicionamento RTK. O Xbee utilizado mostrou baixa resiliência às construções físicas e, possivelmente, a outros sinais de dispositivos eletrônicos em funcionamento dos galpões próximos. Devido a intermitência do sinal, os testes utilizando posicionamento RTK com link de rádio sofreram com constantes perdas de comunicação entre base e rover e, por isso, foram descartados. Utilizando o Ntrip o sistema foi capaz de operar continuamente por todo o tempo do teste, porém sujeito às dificuldades impostas pelo local e já relatadas;
- Após constatadas as dificuldades de coleta no ponto P1, para realização dos testes no ponto P2 a base foi reposicionada no ponto P3, cujas coordenadas também já eram

conhecidas devido ao marco geodésico presente no local. Nesse ponto foi realizada a coleta dos dados utilizando apenas o posicionamento RTK com correções via rádio. Conforme o esperado, nesse caso foi observada acurácia planimétrica centimétrica e um maior erro na componente vertical do sistema de coordenadas;

- No ponto P3 foram realizados diferentes testes com o sistema utilizando posicionamento RTK via rádio e também Ntrip. Nesse caso a base estava posicionada em seu local original, inicialmente planejado para realização dos testes, conforme visto na Figura 45 da Seção 3.6.1. Apesar dos prédios presentes no entorno, nesse caso o sistema foi capaz de manter sua comunicação consistente entre base e rover, além de alcançar acurácia planimétrica e tridimensional em nível centimétrico, conforme o esperado.

A critério de comparação, foram reunidos os dados obtidos dos trabalhos Sanna, Pisanu e Garau (2022) e Madawalagama et al. (2019), que utilizam a mesma metodologia para definição da acurácia do equipamento. A Figura 54 exibe os dados da acurácia horizontal do presente trabalho e dos mencionados, avaliados para cada um dos casos explicitados na Seção 3.6.1.

Figura 54 – Comparativo do REQM do presente trabalho e dos relacionados



Fonte: Próprio autor

Conforme é possível perceber no gráfico da Figura 54, os resultados do trabalho de Sanna, Pisanu e Garau (2022) são superiores aos desse trabalho e também aos de Madawalagama et al. (2019). Alguns fatores justificam essa diferença:

- São utilizadas antenas *choke ring* geodésicas que mitigam consideravelmente os efeitos do multicaminhamento dos sinais;
- As bases utilizadas nos testes contém receptores geodésicos multifrequência com as antenas mencionadas e posicionadas em regiões completamente desobstruídas que garantem boa visada das constelações de satélites;
- O receptor utilizado no rover, o u-blox F9P, conta com um dos módulos mais recentes lançado pela u-blox, com operação em múltiplas frequências e maior número de constelações. Também foi utilizada uma antena profissional de maior custo.

Também é possível observar que o teste 11, do trabalho de Madawalagama et al. (2019), apresenta maior valor de erro comparado aos demais. Nesse caso, o autor utilizou uma antena *patch*, ou seja, uma antena pequena, geralmente desenvolvida para circuitos internos e que possui valor menor associado. Trata-se de uma antena do mesmo tipo do que a utilizada nesse trabalho. Além disso, o caso 3 dos testes é o mais crítico, onde a antena e o receptor são posicionados em um local com menor visada e maior susceptibilidade aos efeitos de multicaminho do sinal.

Enquanto as antenas *choke ring* utilizadas no trabalho de Sanna, Pisanu e Garau (2022) podem possuir custos de centenas ou milhares de dólares, as antenas utilizadas nesse trabalho e no de Madawalagama et al. (2019) custam, geralmente, algumas dezenas de dólares. Portanto, trata-se de uma diferença esperada e oriunda da característica de baixo preço almejada por esse trabalho

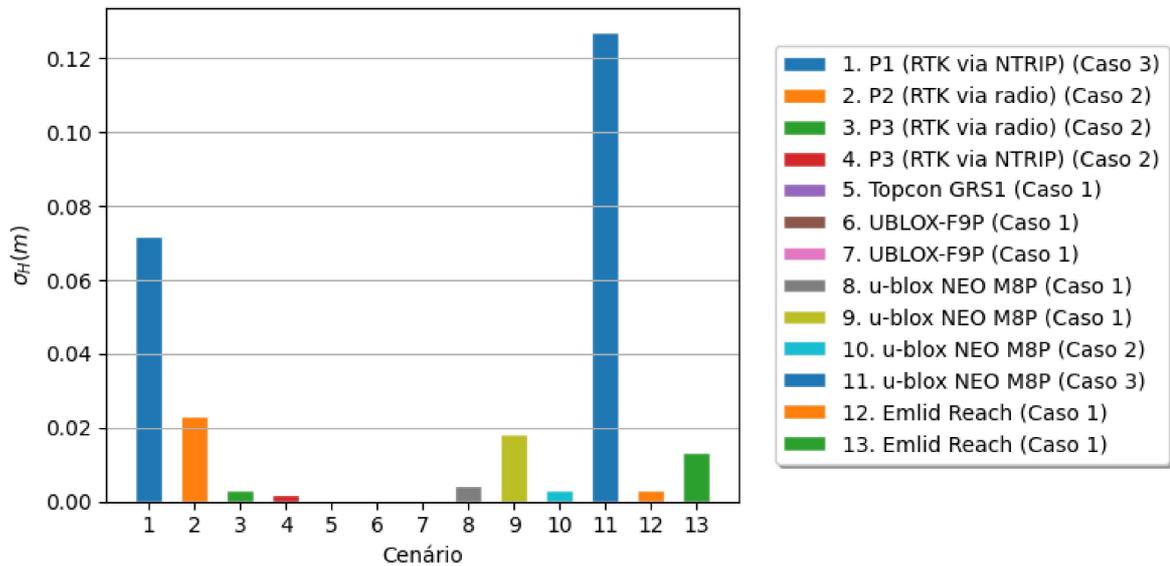
Por fim, o teste 1 realizado no P1 nesse trabalho foi o que apresentou maior erro devido ao local dos testes. Ainda assim o receptor foi capaz de se manter abaixo dos 0,1 m de acurácia nas situações avaliadas e com valores próximos a equipamentos equivalentes presentes na literatura.

Assim como na análise anterior, da acurácia, também foram obtidos os valores de precisão a partir dos testes do sistema avaliado nesse trabalho e comparados com trabalhos semelhantes presentes na literatura. A Tabela 14 apresenta a precisão do equipamento e a Figura 55 apresenta o comparativo com os presentes nos trabalhos relacionados.

TABELA 14 – Desvio padrão das componentes e , n , u e horizontal

Teste	σ_e (m)	σ_n (m)	σ_u (m)	σ_H (m)
P1 (RTK via NTRIP)	0.037	0.062	0.071	0.072
P2 (RTK via radio)	0.023	0.002	0.013	0.023
P3 (RTK via radio)	0.001	0.002	0.005	0.003
P3 (RTK via NTRIP)	0.001	0.002	0.004	0.002

Figura 55 – Comparativo do desvio padrão do presente trabalho e dos relacionados



Fonte: Próprio autor

Como é possível perceber, os valores de precisão apresentam características semelhantes aos de acurácia, havendo maior degradação nos mesmos testes observados na análise anterior. As justificativas se assemelham: o uso de antenas de baixo custo, com receptores de única frequência e posicionados em locais com baixa visibilidade do céu devido aos obstáculos próximos.

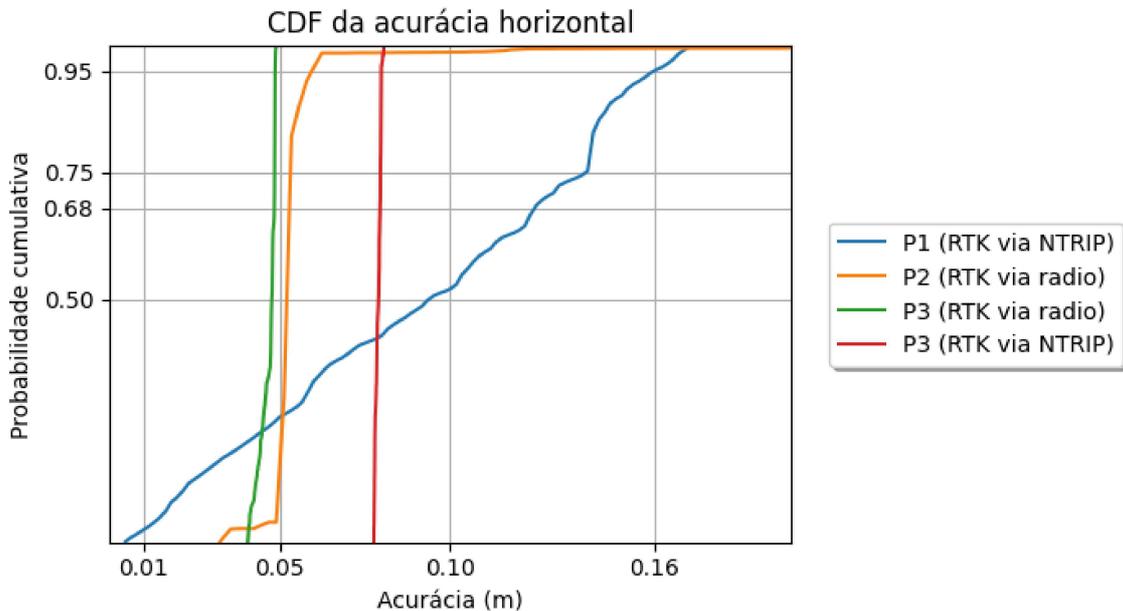
Apesar disso, os receptores GNSS avaliados nesse trabalho apresentam um desvio padrão milimétrico em dois dos testes realizados, referentes ao ponto 3 que é o local que menor obstrução. Nesse caso, os testes comprovam que o sistema consegue se manter com acurácia e precisão centimétrica/milimétrica, suficiente para proporcionar dados de posição confiáveis para navegação e para integração com o ADCP.

Para realizar a última verificação do valor de acurácia e sua coerência frente a outros equipamentos do mercado, foi verificado o valor referente a 95% dos valores acumulados na função de probabilidade acumulada. Os valores obtidos podem ser vistos na Tabela 15 e as curvas da probabilidade acumulada para cada um dos testes vistas na Figura 56.

TABELA 15 – Acurácia horizontal (95% da função de distribuição acumulada)

Teste	Acurácia
P1 (RTK via NTRIP)	0,157
P2 (RTK via rádio)	0,058
P3 (RTK via rádio)	0,049
P3 (RTK via NTRIP)	0,080

Figura 56 – Probabilidade cumulativa

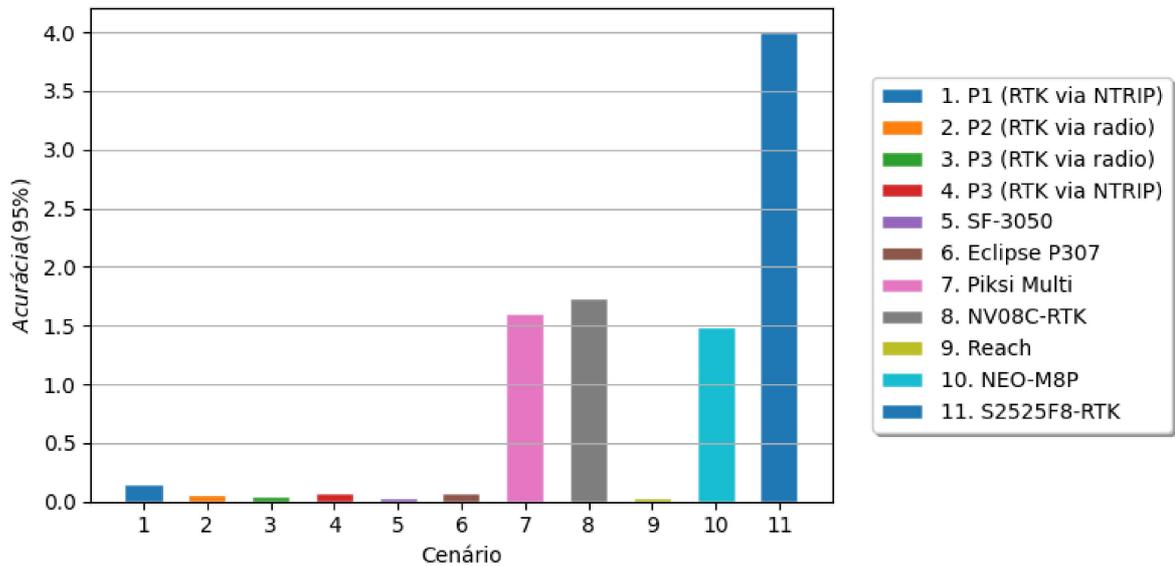


Fonte: Próprio autor

Conforme é possível perceber, novamente o teste no ponto P1, realizado em local com grande obstrução decorrente de vegetação e construções, causou uma degradação considerável da acurácia nesse cenário. Enquanto as curvas dos demais testes tem sua concentração de elementos da amostra predominantemente abaixo de 0,1 m, a curva referente ao teste P1 é mais uniforme e distribuída em valores correspondentes a erros mais altos. A justificativa para tal comportamento é a mesma das análises anteriores, sendo esse mais um indicativo que comprova as limitações do equipamento para operação nesse cenário.

Apesar disso, o desempenho do equipamento nos demais cenários é, conforme já demonstrado, centimétrico e coerente com demais dispositivos, equivalentes ou e maior custo, encontrados no mercado. A Figura 57 traz os dados do presente trabalho comparados aos dados presentes no trabalho de Jackson et al. (2018). Os dados desse último trabalho foram coletados em um cenário correspondente ao caso 1, ou seja, em ambiente com poucas obstruções e boa visada. Embora os testes do equipamento desse trabalho tenham sido realizados em cenários do caso 2, o desempenho se apresentou próximo a diferentes equipamentos avaliados por Jackson et al. (2018).

Figura 57 – Comparativo de acurácia em 95% da função de probabilidade acumulada



Fonte: Próprio autor

4.1.2 Disponibilidade

Para o teste de disponibilidade foram avaliados os dois cenários descritos na Seção 2.10.2. Os valores obtidos nesse trabalho foram, novamente, comparados com os valores obtidos por Jackson et al. (2018) e Madawalagama et al. (2019). A Tabela 16 exhibe os valores de disponibilidade obtidos nos testes e a Figura 58 exhibe o comparativo com os valores dos trabalhos relacionados.

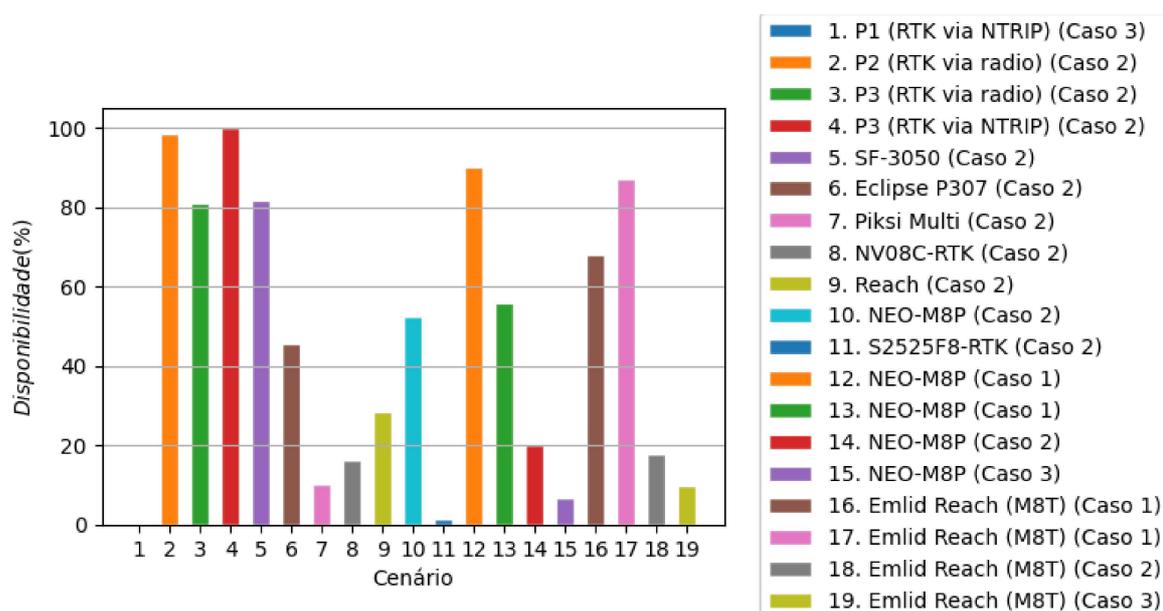
TABELA 16 – Teste de disponibilidade do sinal em *fix* e/ou *float*

Teste	Disponibilidade (fix)	Disponibilidade (fix/float)	Satélites (média)
P1 (RTK via NTRIP)	0,0 %	100,0 %	11,5
P2 (RTK via rádio)	98,6 %	100,0 %	11,6
P3 (RTK via rádio)	81,1 %	100,0 %	11,8
P3 (RTK via NTRIP)	100,0 %	100,0 %	12,1

Conforme é possível perceber por meio da Tabela 16, novamente o ponto P1 foi o que obteve piores resultados devido às características do local. Em nenhum momento o sistema foi capaz de obter uma solução fixa (disponibilidade de 0%), porém conseguiu se manter com a solução flutuante durante todo o teste.

Nos demais testes, nos pontos P2 e P3, o sistema se manteve com solução fixa na maior parte do tempo. Considerando o teste completo, o sistema foi capaz de se manter com a solução fixa ou flutuante durante todo o tempo.

Figura 58 – Disponibilidade da solução fixa ao longo do teste



Fonte: Próprio autor

Comparado aos receptores avaliados nos demais trabalhos, percebe-se que o sistema foi capaz de manter sua disponibilidade durante um tempo acima da média dos demais avaliados. Percebe-se que em todos os cenários de caso 3, com muitos obstáculos, os receptores de todos os trabalhos apresentaram dificuldades em manter a solução fixa disponível durante os testes. Percebe-se que, embora utilizados nos comparativos, os receptores S2525F8-RTK e NV08C-RTK, do trabalho de Jackson et al. (2018), possuem desempenho inferior aos demais em todas as métricas avaliados.

4.1.3 Continuidade

Os testes de continuidade demonstram a capacidade do equipamento de manter sua solução fixa, de forma contínua, ao longo dos testes realizados. A Tabela 17 exhibe os resultados obtidos pelo equipamento.

TABELA 17 – Teste de continuidade

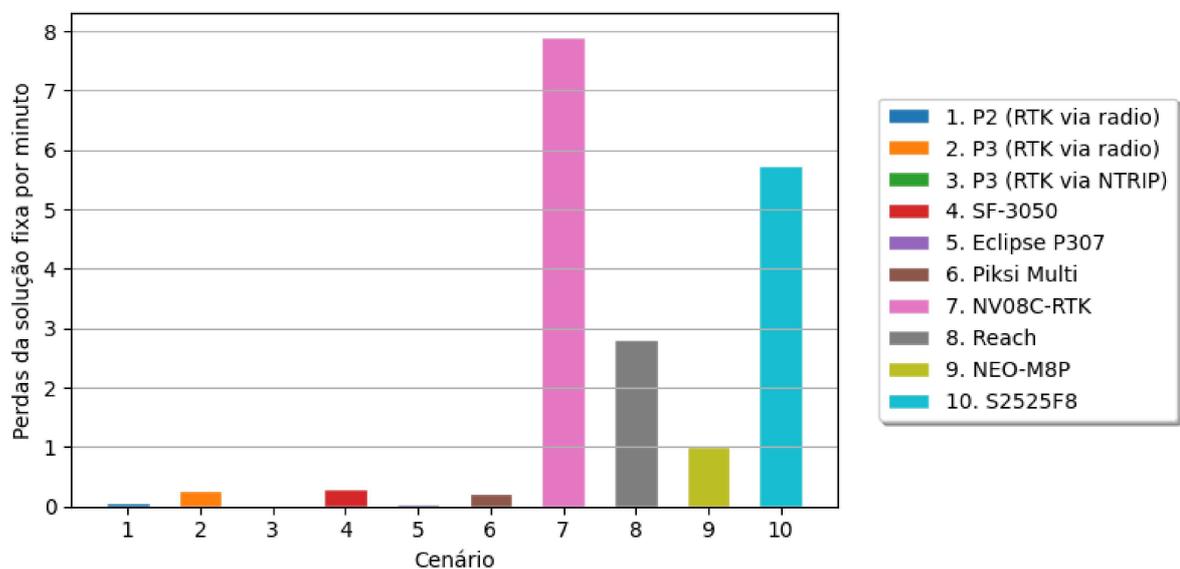
Teste	Perdas por minuto	Tempo médio de reaquisição
P1 (RTK via NTRIP)	*	*
P2 (RTK via rádio)	0,077	10,60 s
P3 (RTK via rádio)	0,265	42,88 s
P3 (RTK via NTRIP)	0,000	0,00 s

Não foram incluídos os dados do ponto P1 pois o sistema obteve solução fixa em apenas um momento curto do teste. Dessa forma, o sistema não apresentou soluções fixas

suficientes para que fossem avaliados os parâmetros de perdas por minuto e tempo médio de aquisição.

Nos pontos P2 e P3 o sistema conseguiu operar de forma consistente, apresentando poucas perdas de solução fixa por minuto. Para avaliação dos valores, foram comparados os dados obtidos com os presentes nos trabalhos relacionados, conforme visto nas Figuras 59 e 60. Todos os testes no caso 3 foram removidos pois apresentaram baixa continuidade e altos tempos de reaquisição, conforme evidenciado na Tabela 17 e também nos dados dos trabalhos relacionados.

Figura 59 – Perdas da solução fixa por minuto

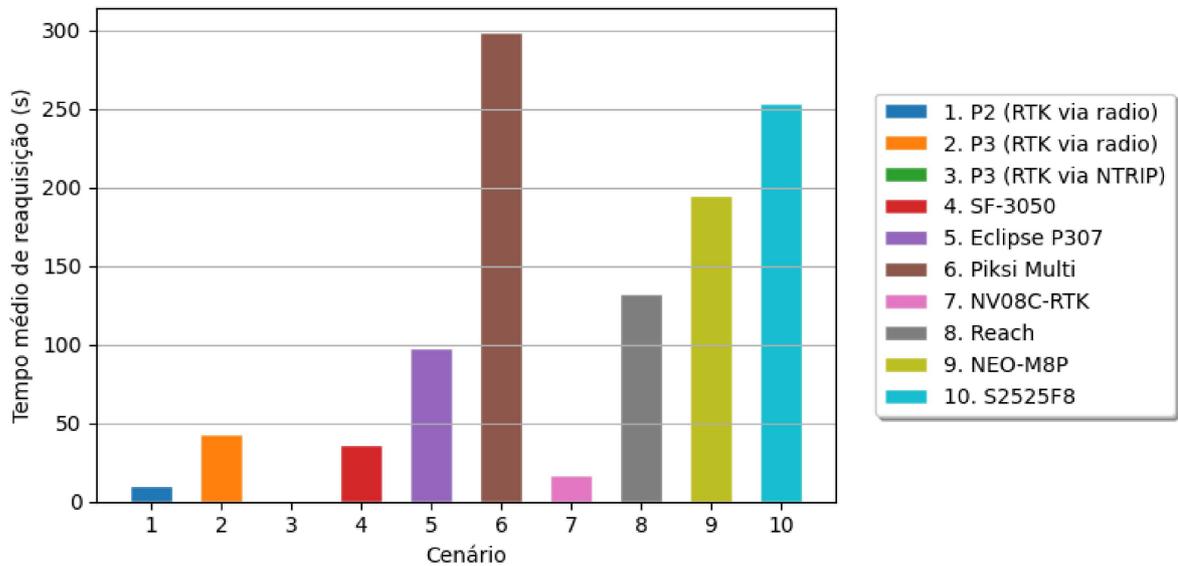


Fonte: Próprio autor

Conforme é possível perceber na Figura 59, o sistema RTK deste trabalho se manteve com um número baixo de perdas de solução fixa, por minuto, quando comparado aos demais trabalhos relacionados. Em um dos testes no ponto P3, o sistema foi capaz de manter continuidade em 100% do tempo do teste.

Em relação ao tempo médio de reaquisição da solução fixa, visto na Figura 60, os testes nos pontos P2 e P3 também apresentaram valores próximos aos encontrados na literatura. No ponto P2, que possui mais obstruções próximas que o ponto P3, percebe-se que em ambos os cenários, de tempo de reaquisição e de perdas por minuto, os dados foram ligeiramente piores. Comparado ao ponto P3, o ponto P2 apresenta mais obstruções do campo de visão, sendo esse um dos fatores mais determinantes para justificativa desse resultado.

Figura 60 – Tempo médio de reaquisição da solução fixa



Fonte: Próprio autor

4.1.4 Tempo para primeira solução fixa

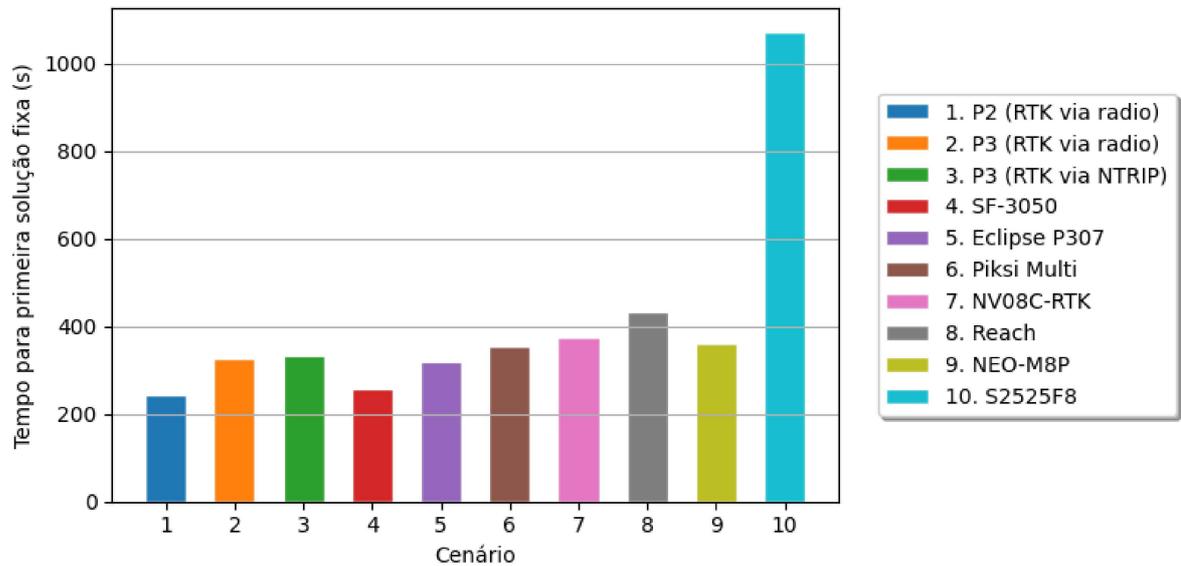
A Tabela 18 exibe os tempos para obtenção da primeira solução fixa.

TABELA 18 – Tempo para o primeiro fixo

Teste	Tempo para o primeiro fixo
P1 (RTK via NTRIP)	33min35s*
P2 (RTK via rádio)	4min05s
P3 (RTK via rádio)	5min26s
P3 (RTK via NTRIP)	5min35s

Seguindo o padrão observado, o ponto P1 obteve resultados insatisfatórios, apresentando tempo excessivo para obtenção da primeira solução fixa. Vale lembrar que nas análises anteriores essa solução não se manteve contínua e, portanto, não foi sequer contabilizada nas avaliações de disponibilidade e continuidade. Nos pontos P2 e P3, observou-se um tempo de aproximadamente 5 minutos para que o receptor fosse capaz de obter a solução fixa. A análise desses valores foi, novamente, feita com base em comparativo com os trabalhos relacionados, conforme visto na Figura 61. Novamente, foram removidos os cenários do caso 3 devido ao grande tempo e dificuldade do receptor desse trabalho e, também, dos demais trabalhos para operação no cenário com muitas obstruções.

Figura 61 – Tempo para primeira solução fixa



Fonte: Próprio autor

Conforme é possível perceber na Figura 61, o tempo médio para obtenção da primeira solução fixa no equipamento deste trabalho foi coerente com os demais trabalhos avaliados, se apresentando abaixo da média em todos os cenários.

4.2 TESTES CINEMÁTICOS

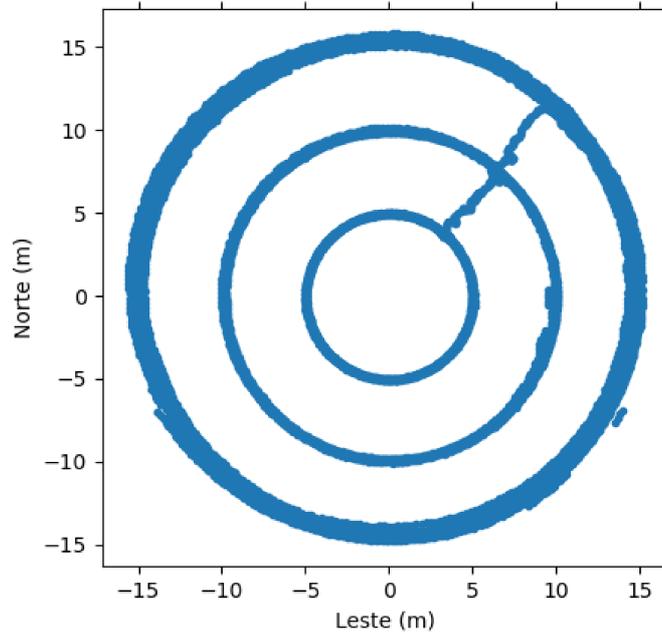
Seguindo a metodologia da Seção 3.6, foram realizados testes com o rover recebendo correções via rádio. As voltas realizadas em torno do poste, com raio fixo em cada um dos cenários, podem ser vistas na Figura 62. As circunferências foram realizadas sequencialmente e, em uma primeira análise preliminar, é possível perceber na própria Figura 62 que a circunferência de 15 m apresenta contorno mais largo, indicando que nesse teste a variância é maior. Essa característica foi abordada com maior detalhamento adiante.

A Tabela 19 traz os cálculos da REQM para cada uma das componentes e e n e também a planimétrica.

TABELA 19 – REQM para os cenários dos testes cinemáticos

Teste	$REQM_e$ (m)	$REQM_n$ (m)	$REQM_H$ (m)
Circunferência de 5m	0.046	0.054	0.071
Circunferência de 10m	0.095	0.123	0.156
Circunferência de 15m	0.177	0.359	0.400

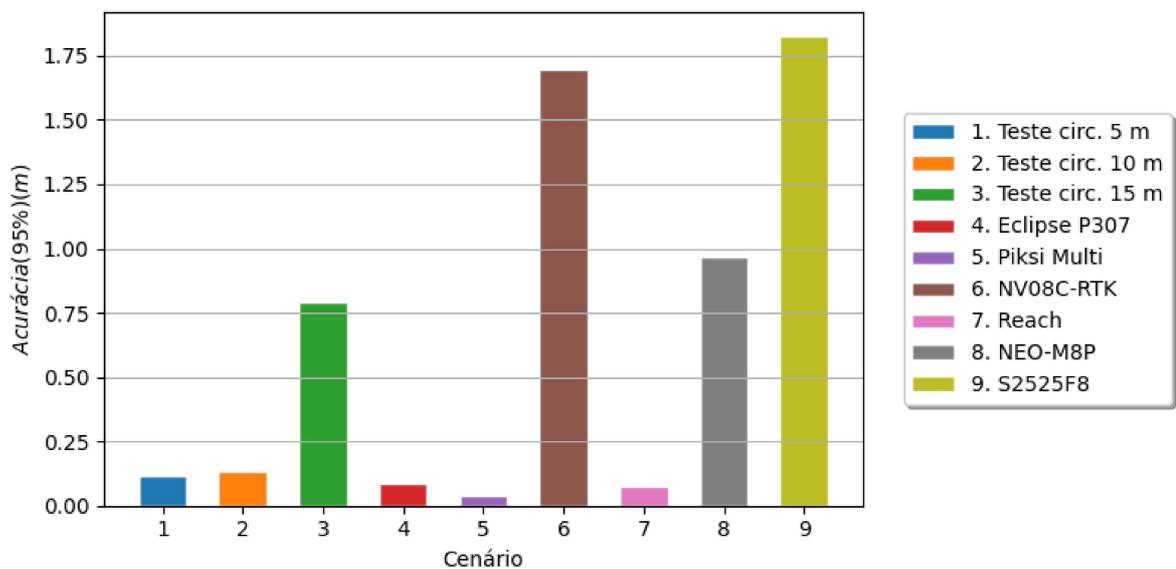
Figura 62 – Trajetória realizada no teste cinemático



Fonte: Próprio autor

Assim como nos cenários de testes estáticos, os testes cinemáticos foram comparados aos realizados por Jackson et al. (2018). Esse último trabalho realiza testes cinemáticos com um carro em movimento e a referência são os dados coletados pelo receptor profissional NavCom SF-3050, que encontrava-se embarcado no carro e coletando dados simultaneamente com os demais receptores avaliados. A Figura 63 exibe o comparativo.

Figura 63 – Comparativo entre receptores no teste cinemático



Fonte: Próprio autor

Conforme é possível observar na Figura 63, os valores de acurácia obtidos utilizando a metodologia de trajetória em circunferências se aproximam daqueles obtidos no trabalho de Jackson et al. (2018), com deslocamento com o receptor embarcado em um carro. Nos testes 1 e 2, com circunferências de 5 m e 10 m respectivamente, os erros obtidos ficaram abaixo de 0,14 m. O valor se assemelha ao obtido no trabalho relacionado utilizando um Emlid Reach e também se assemelha aos receptores mais caros, de múltipla frequência, como o Eclipse P307 e o Piksi Multi.

O teste em circunferência de 15 m foi o que apresentou maior valor de erro. Durante os testes, foi possível observar alguns fatos:

- O teste utilizando a corda pode ser melhor controlado com menores comprimentos. Com maiores comprimentos torna-se mais complicado manter a corda tracionada e as oscilações em decorrência do movimento são maiores;
- O erro é proporcional ao aumento do comprimento da corda utilizada. Quando maior a corda, mais difícil garantir que o comprimento está sendo corretamente respeitado.

Portanto, para os testes em cenário cinemático, os valores de 5 m e 10 m são mais apropriados para aferição da exatidão do equipamento, visto que com um comprimento maior, como 15 m, torna-se mais difícil controlar fontes de erro externas como movimentação, tracionamento da corda e medida exata do comprimento de referência.

4.3 APLICAÇÃO DO SISTEMA NO AERO4RIVER E NO ADCP

O passo seguinte à verificação do desempenho do sistema GNSS foi o teste de integração com o ADCP, além de validação da comunicação sem fio, descrita na Seção 3.5, com o *software* RiverSurveyor. A realização desses testes foi qualitativa e realizada na represa Dr. João Penido, situada em Juiz de Fora - MG. A Tabela 20 traz os testes realizados e os resultados obtidos.

TABELA 20 – Testes realizados com o Aero4River e ADCP

Teste	Resultado
Conectividade entre ADCP e <i>RiverSurveyor</i>	Bem-sucedido
Comparativo entre receptor GNSS comum e RTK embarcados	Bem-sucedido
Troca de mensagens NMEA GGA e VTG entre receptor RTK e ADCP	Bem-sucedido
Coleta e averiguação qualitativa dos dados coletados pelo ADCP	Bem-sucedido

Um dos testes realizados foi registrado em vídeo e pode ser acessado por meio de link público¹ no canal do GRIn, no *YouTube*.

Durante os testes o ADCP foi capaz de se manter conectado e energizado utilizando o PCM projetado. Em nenhum momento houve perda de conexão e o barco foi capaz de se afastar aproximadamente 600 m do local onde se encontrava a base RTK e o computador executando o *RiverSurveyor*.

O receptor GNSS RTK embarcado foi capaz de prover as mensagens convertidas (de GNGGA e GNVTG para GPGGA e GPVTG, respectivamente) de forma consistente e sem perdas para o ADCP durante todo o intervalo de testes. O *software RiverSurveyor* exibe o status do sistema GNSS durante os testes em tempo real. A Figura 64 exibe um dos momentos do teste, que pode ser visto na íntegra no vídeo disponibilizado, e comprova a integridade de funcionamento do equipamento. O ícone azul com a indicação RTK avisa ao usuário que o ADCP está utilizando coordenadas do receptor GNSS convertidas e corretamente entregues ao sensor.

Figura 64 – RiverSurveyor exibindo status de conexão correta com receptor GNSS RTK

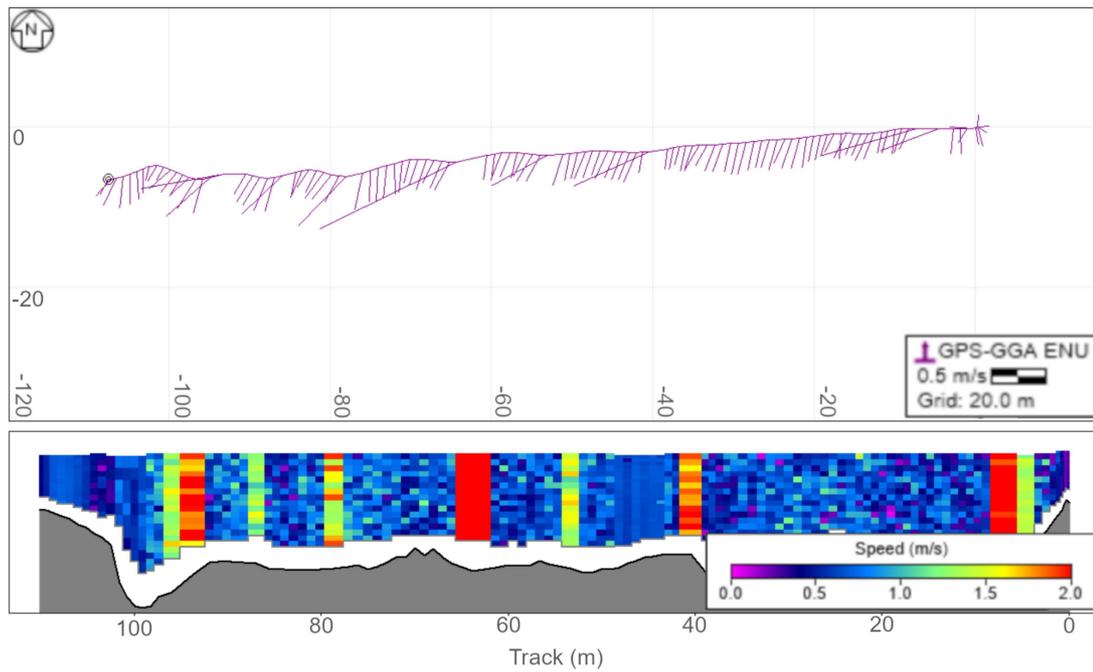


Fonte: Próprio autor

O vídeo também exibe a travessia do barco entre duas margens arbitrárias da represa. A Figura 65 mostra o perfil da região de travessia em um dos testes. A travessia foi realizada de forma manual e é possível notar que o sensor foi capaz de capturar as regiões mais rasas nas proximidades das margens e regiões mais profundas no meio do percurso. A avaliação quantitativa desses dados não foi realizada por não se tratar do escopo desse trabalho.

¹<<https://www.youtube.com/watch?v=W71Bhr0KxIU>>

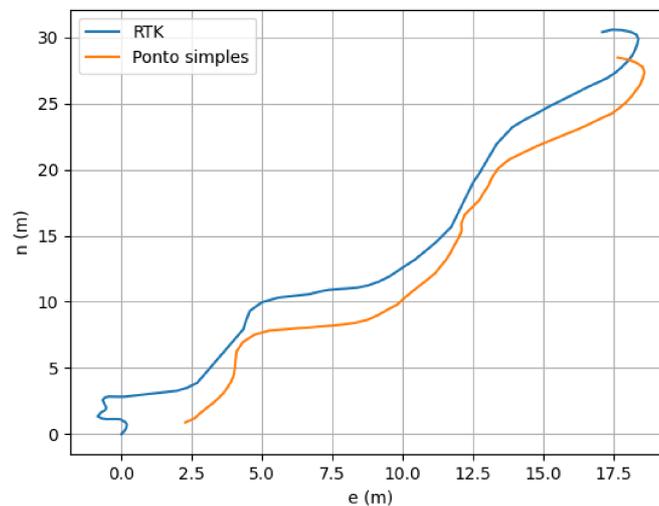
Figura 65 – Trajetória do barco e perfil da região da travessia



Fonte: Próprio autor

Para averiguação da diferença entre as coordenadas do receptor GNSS RTK embarcado e o receptor GNSS Here 3 (que possui um u-blox M8P e é amplamente utilizado em conjunto com a Cube Orange - unidade controladora de navegação do Aero4River), foi comparado um trecho da navegação em que os dois receptores estavam embarcados e operando simultaneamente. A Figura 66 exibe a trajetória realizada pelo barco em um dos testes, descrita por cada um dos receptores.

Figura 66 – Trajetória do barco na represa



Fonte: Próprio autor

Para evidenciar a diferença entre as coordenadas de posição obtidas entre ambos os receptores, utilizou-se como referência os dados obtidos pelo receptor GNSS RTK, que foi testado e possui valores de acurácia conhecidos e determinados na Seção 4.2. Como o erro do sistema GNSS RTK proposto é conhecido, foi considerada a propagação da incerteza (utilizados os valores do teste da circunferência de 10 m) para evidenciar o erro do receptor GNSS utilizando posicionamento por ponto simples. A Tabela 21 exibe as análises² realizadas.

TABELA 21 – Acurácia do posicionamento por ponto simples

Teste	$REQM_e$	$REQM_n$	$REQM_H$
1	$3,763 \pm 0,095$ m	$4,670 \pm 0,123$ m	$5,997 \pm 0,156$ m
2	$2,347 \pm 0,095$ m	$1,878 \pm 0,123$ m	$3,006 \pm 0,156$ m
3	$3,593 \pm 0,095$ m	$3,186 \pm 0,123$ m	$4,802 \pm 0,156$ m

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 realizados na Seção 4.2, o que garante uma navegação mais fiel ao planejamento de rota realizado.

4.4 OUTRO EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Outras operações foram realizadas utilizando o sistema RTK analisado. Na Figura 67, é possível perceber o uso do equipamento (com link de rádio) em uma aplicação de demarcação de pontos para plantio. À direita, percebe-se a padronização dos locais de plantação, onde existem pequenas diferenças devido a imprecisão na execução da abertura das cavidades para depósito das sementes.

4.5 CONCLUSÕES

A partir das análises de acurácia, disponibilidade, continuidade e tempo para obtenção da primeira solução fixa, atesta-se que o sistema apresenta desempenho satisfatório e próximo aos demais encontrados nos trabalhos relacionados. Em cenários com obstruções, conclui-se que o sistema apresenta limitações de operação, como redução drástica da acurácia, da continuidade e disponibilidade, além de perdas de sinal entre base e rover quando utilizado o envio das correções do sistema RTK via rádio (Xbee). É válido ressaltar que existem equipamentos de rádio mais robustos e com preço acessível, como o RFD900x, que pode resolver esse último problema sem alterar as características do equipamento.

²<https://github.com/GuiABP/GNSS_RTK/tree/main/Analises>

Figura 67 – Equipamento utilizado em marcação de pontos para plantio



Fonte: Próprio autor

Durante os testes cinemáticos foi observado que o receptor não foi capaz de se manter a solução fixa, permanecendo 100% do tempo com a solução flutuante. Dessa forma, não foram incluídas as análises de continuidade para o cenário fixo, visto que a disponibilidade do equipamento é de 100% para a solução flutuante. Esse último resultado se assemelha ao descrito por Jackson et al. (2018) na utilização do Emlid Reach.

Foi possível observar a acurácia centimétrica nos cenários estático e cinemático, compatível ou até mesmo melhor que valores de equipamentos apresentados em outros trabalhos utilizados como referência. O RTKBox também apresentou demais métricas de desempenho com bons valores para aplicação no Aero4River e no ADCP, possuindo boa disponibilidade e continuidade durante a operação.

O RTKBox e o link de comunicação entre ADCP e operador também foram verificados atestando a correta integração e trazendo ganhos significativos de acurácia às medidas obtidas pelo ADCP quando comparado ao posicionamento tradicional utilizando o *bottom tracking*. Além disso, o link de dados sem fio se mostrou estável e operacional durante todos os testes, fornecendo dados em tempo real com baixo atraso e robustez.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou uma proposta de um sistema composto por dois receptores GNSS de baixo custo, denominado RTKBox devido ao formato do receptor base e às características modulares. O RTKBox empregou componentes disponíveis em território brasileiro, com custo baixo, aplicado à embarcação denominada Aero4River, porém com possibilidade de expansão para outros projetos.

O Aero4River utilizou um sensor ADCP para levantamento das condições hídricas em reservatórios de geração hidrelétrica. Os dados obtidos foram utilizados para definição do despacho nas usinas do SIN, sendo de grande valia para tomada de decisão. O ADCP utilizado na dissertação foi um RiverSurveyor M9 em sua configuração mais básica. Esse sensor opera, originalmente, com um cabo de 10 m fixo a ele e ao operador, criando grandes limitações de operação. Além disso, o sensor possui compatibilidade somente com receptores que operam com a constelação GPS. Apesar de se beneficiar com a operação utilizando o sistema GPS RTK, o alto custo de aquisição desse equipamento foi limitante para sua aquisição.

Com isso, o presente trabalho teve como um de seus objetivos realizar um estudo sobre as vantagens de aplicação do sistema GNSS RTK, realizando estudos e testes para validação do desempenho do equipamento e da sua aplicabilidade ao projeto. Além disso, também foi analisado e implementado o sistema de comunicação e energia do Aero4River, denominado PCM, que resolveu os problemas impostos pela utilização do cabo na operação.

Para entendimento das vantagens de uso de receptores GNSS RTK, foi realizado um estudo de diversos conceitos envolvendo o sistema GNSS, os protocolos e dispositivos envolvidos na operação. Também foram estudadas as diferentes representações da superfície terrestre, as conversões entre elas e as métricas de desempenho mais utilizadas para avaliação do equipamento.

O presente trabalho também explorou as etapas de projeto, desenvolvimento, testes e avaliação dos dados do sistema proposto. A contribuição acadêmica se concentra, principalmente, no compilado de informações apresentadas, que possibilitam ao leitor entender os principais conceitos do sistema, reproduzir a montagem por meio dos circuitos disponibilizados e realizar os testes e análises por meio dos códigos¹ disponibilizados. Nos demais trabalhos encontrados na literatura essas etapas são exploradas individualmente, sendo apresentada aqui a metodologia de ponta a ponta com referências que auxiliam no entendimento.

Em relação aos materiais utilizados, o RTKBox conta com dispositivos facilmente encontrados em mercado brasileiro e a preço competitivo. Foram utilizados componentes

¹<https://github.com/GuiABP/GNSS_RTK/tree/main/Analises>

comuns como o Arduino e o XBee, amplamente utilizados em projetos eletrônicos acadêmicos. O módulo GNSS utilizado foi um Emlid Reach, que possui baixo custo e revenda em mercado brasileiro, se apresentando como uma excelente solução para desenvolvimento de projetos específicos. Com isso, chegou-se a um equipamento com custo inferior a R\$ 10.000,00, considerado baixo quando comparado a outras opções disponíveis no mercado.

Nos testes realizados, o RTKBox apresentou erro centimétrico, inferior a 0,15 m no cenário cinemático, valor baixo quando comparado aos 4,5 m de acurácia obtidos nos testes com o receptor operando com posicionamento por ponto simples. Comparado aos demais trabalhos, os valores de erro também se apresentaram baixos, mesmo quando comparados a receptores de maior custo e operação com múltiplas frequências. As métricas de desempenho como disponibilidade, continuidade e tempo para primeira solução fixa também apresentaram resultados coerentes, alinhados com os encontrados na literatura e satisfatórios para a operação em questão.

No cenário do barco, por exemplo, o valor de acurácia proporcionado pelo RTK garantiu navegação mais fiel às trajetórias planejadas. Além disso, o uso em conjunto com o sensor ADCP aumentou 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 nacional e o conjunto final apresentou custo inferior às soluções comerciais existentes, o que pode viabilizar seu uso em cenários com maiores limitações de verba. É válido ressaltar que os resultados foram avaliados dentro de um contexto de navegação e coleta de dados utilizando um sensor ADCP. Aplicações geodésicas que exigem uma maior exatidão do equipamento não foram contempladas nas análises.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros recomenda-se a utilização de um bastão profissional para realização dos testes e posicionamento do equipamento acima dos marcos de referência. Além disso, a realização do teste cinemático pode ser melhorada por meio de maior controle das variáveis como velocidade da movimentação, tracionamento da corda e mitigação das oscilações oriundas do movimento.

Para o equipamento, sugere-se a utilização de módulos mais recentes encontrados no mercado, como o u-blox F9P ou Emlid Reach M2, que operam com múltiplas frequências, com mais constelações de satélites e vasta documentação para desenvolvimento.

O sistema de comunicação de rádio, Xbee, também pode ser substituído por um mais robusto como, por exemplo, o RFD868. Essa alteração pode permitir a continuidade das correções enviadas da base para o rover em cenários mais desafiadores como o ponto P1.

Por fim, pode-se aproveitar a integração já realizada para dar um enfoque maior à aplicação do ADCP, realizando comparativos da coleta de dados utilizando o método de posicionamento *bottom tracking* comparado com os dados obtidos com o receptor GNSS RTK.

REFERÊNCIAS

- CARVALHO, A.; SILVA, J.; POZ, W. Análise estatística do posicionamento relativo a partir do auspos. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 21, p. 03–25, 03 2015. Citado na página 56.
- CRUZ, D. C.; SANTOS, H. d. A. *Análise de medições de velocidade realizadas com ADCP embarcado acoplado a um DGPS*. 2017. Disponível em: <<https://anais.abrhidro.org.br/works/2277>>. Acesso em: 23 fev. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- DIGI. *Digi XBee-PRO® XSC 900 MHz Long-Range RF Module - Datasheet*. 2020. Disponível em: <https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-LEA-M8T-FW3_DataSheet_%28UBX-15025193%29.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2021. Citado 3 vezes nas páginas 9, 70 e 72.
- DRAKE, S. Converting gps coordinates [ϕ , λ , h] to navigation coordinates (enu). *DSTO*, DSTO-TN, 04 2002. Citado na página 54.
- ESA. *GNSS Performances*. 2011. Disponível em: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Performances>. Acesso em: 01 fev. 2023. Citado na página 57.
- FERRER-GONZÁLEZ, E. et al. Uav photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. *Remote Sensing*, v. 12, p. 2447, 07 2020. Citado na página 56.
- GAMARO, P. E. M. *Medição de vazão pelo método acústico Doppler (Avançado)*. Agência nacional de águas, 2020. Acesso em: 23 abr. 2022. Disponível em: <<https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/2188>>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 60.
- HEXAGON, V. *Manual do Usuário Orion (Versão 2.0.2.74)*. 2017. Disponível em: <<https://hexagondownloads.blob.core.windows.net/public/Veripos/Manuals/AB-V-M-A-00617.pdf>>. Acesso em: 28 jan. 2023. Citado na página 44.
- IBGE. *Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro*. 2005. Acesso em: 23 abr. 2022. Disponível em: <https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rpr_01_25fev2005.pdf>. Citado na página 53.
- IBGE. *SIRGAS2000: O Referencial Geocêntrico do Brasil*. 2006. Disponível em: <https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outros_documento_tecnicos/pmrg/revista_ponto_de_referencia.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2023. Citado na página 53.
- IBGE. *IBGE-PPP - Serviço online para pós-processamento de dados GNSS*. 2023. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 23 jan. 2023. Citado na página 39.
- IBGE. *RBMC-IP - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS em tempo real*. 2023. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sob>>

re-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16332-rbmc-ip-red-e-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-em-tempo-real.html?=&t=sobre>. Acesso em: 24 jan. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.

INCRA. *Manual Técnico para o Georreferenciamento de Imóveis Rurais*. 2. ed. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://sigef.incra.gov.br/static/documentos/manual_geo_imoveis.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2023. Citado na página 55.

JACKSON, J. et al. *Evaluation of Low-Cost, Centimeter-Level Accuracy OEM GNSS Receivers*. 2018. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/11299/197453>>. Acesso em: 17 fev. 2023. Citado 11 vezes nas páginas 20, 21, 57, 58, 81, 89, 90, 91, 95, 96 e 100.

JANOS, K. Evaluation of low-cost gnss receiver under demanding conditions in rtk network mode. *Sensors*, v. 21, n. 16, 2021. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/16/5552>>. Citado na página 20.

LENZ, E. Networked transport of rtkcm via internet protocol (ntrip) - application and benefit in modern surveying systems. In: . [S.l.: s.n.], 2004. Citado na página 42.

MADAWALAGAMA, S. et al. Assessment of uav based low cost photogrammetric system for aerial mapping. In: . [S.l.: s.n.], 2019. Citado 6 vezes nas páginas 20, 21, 81, 86, 87 e 90.

MIKHAIL, E.; ACKERMANN, F. *Observations and Least Squares*. University Press of America, 1976. (G - Reference, Information and Interdisciplinary Subjects Series). ISBN 9780819123978. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=qR3vAAAAMAAJ>>. Citado na página 56.

MONICO, G. et al. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada / accuracy and precision: Reviewing the concepts by means of an accurate procedure. *Boletim de Ciências Geodesicas*, v. 15, p. 469–483, 07 2009. Citado na página 56.

MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. Citado 7 vezes nas páginas 24, 26, 28, 29, 31, 32 e 37.

MOTTA, B. G. *Determinação do limite de aplicação entre os métodos dinâmico e estacionário em medições de vazão utilizando ADCP*. Dissertação (Dissertação) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/BUBD-AAFEBD>>. Acesso em: 04 mar. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 66.

MUSTE, M.; YU, K.; SPASOJEVIC, M. Practical aspects of adcp data use for quantification of mean river flow characteristics; part i: Moving-vessel measurements. *Flow Measurement and Instrumentation - FLOW MEAS INSTRUM*, v. 15, p. 1–16, 03 2004. Citado na página 58.

NEOENERGIA. *Publicação de Resultado do Programa de P&D das empresas Geradoras e Transmissoras da Neoenergia - 2021*. 2021. Disponível em: <[https://www.neoenergia.com/pt-br/sustentabilidade/pesquisa-e-desenvolvimento/Documents/nossos-projetos/Resultado_do_Programa_de_P%26D_2021_Neoenergia_\(G%26T\).pdf](https://www.neoenergia.com/pt-br/sustentabilidade/pesquisa-e-desenvolvimento/Documents/nossos-projetos/Resultado_do_Programa_de_P%26D_2021_Neoenergia_(G%26T).pdf)>. Acesso em: 23 fev. 2023. Citado na página 19.

NOVATEL. *An Introduction to GNSS: GPS, GLONASS, Galileo and Other Global Navigation Satellite Systems*. 2. ed. Alberta, Canada, 2015. Disponível em: <<https://novatel.com/support/knowledge-and-learning/gnss-book>>. Acesso em: 31 ago. 2021. Citado 11 vezes nas páginas 24, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35 e 46.

OGAJA, C. *Introduction to GNSS Geodesy: Foundations of Precise Positioning Using Global Navigation Satellite Systems*. Springer International Publishing, 2022. ISBN 9783030918217. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=q0hxEAAAQBAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 49 e 50.

ONS. *O Sistema Interligado Nacional em números*. 2023. Acesso em: 16 jan. 2023. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Citado na página 16.

PEREIRA, G. et al. *Aplicação de um sistema GNSS RTK de baixo custo a uma embarcação autônoma de superfície*. 2022. Disponível em: <https://www.sba.org.br/cba2022/wp-content/uploads/artigos_cba2022/paper_1078.pdf>. Citado na página 22.

RADOCAJ, D. et al. A low-cost global navigation satellite system positioning accuracy assessment method for agricultural machinery. *Applied Sciences*, v. 12, p. 693, 01 2022. Citado na página 20.

REGINA, B. A. et al. Hull and aerial holonomic propulsion system design for optimal underwater sensor positioning in autonomous surface vessels. *Sensors*, v. 21, n. 2, 2021. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/2/571>>. Citado na página 21.

REGINA, B. de A. *Dinâmica dos fluidos computacional para posicionamento de sensor e estimação paramétrica em embarcação*. Dissertação (Dissertação) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2021. Acesso em: 04 fev. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.

RFDESIGN. *RFD900ux/-SMT and RFD868ux/-SMT Radio Modem Datasheet*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://files.rfdesign.com.au/Files/documents/RFD900ux%20DataSheet%20v1.2.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2023. Citado na página 67.

RGCI. *Revista de gestão costeira integrada: Datum geodésico*. 2007. Disponível em: <<https://www.aprh.pt/rgci/glossario/datum-geodesico.html>>. Acesso em: 01 fev. 2023. Citado na página 52.

ROMERO, I. *RINEX - The Receiver Independent Exchange Format Version 4.00*. 2021. Disponível em: <https://files.igs.org/pub/data/format/rinex_4.00.pdf?_ga=2.205635924.696768127.1674515827-2026495244.1674515827&_gl=1*q55uc3*_ga*MjAyNjQ5NTI0NC4xNjc0NTE1ODI3*_ga_Z5RH7R682C*MTY3NDUxNTgyNy4xLjEuMTY3NDUxNjAxMy4xMC4wLjA>. Acesso em: 23 jan. 2023. Citado na página 40.

RTCM. *RTCM Special Committees and Standards*. 2022. Disponível em: <<https://www.rtc.org/committees>>. Acesso em: 24 jan. 2023. Citado na página 41.

SANNA, G.; PISANU, T.; GARAU, S. Behavior of low-cost receivers in base-rover configuration with geodetic-grade antennas. *Sensors*, v. 22, n. 7, 2022. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/7/2779>>. Citado 5 vezes nas páginas 20, 21, 81, 86 e 87.

SEEBER, G. *Satellite Geodesy*. Berlin, New York: De Gruyter, 2003. ISBN 9783110200089. Disponível em: <<https://doi.org/10.1515/9783110200089>>. Citado 7 vezes nas páginas 28, 31, 33, 35, 37, 53 e 84.

SILVA, M. da et al. Project and control allocation of a 3 dof autonomous surface vessel with aerial azimuth propulsion system. *IEEE Access*, PP, p. 1–1, 12 2020. Citado na página 21.

SILVA, M. F. *Projeto e alocação de controle de uma embarcação autônoma de superfície com 3 DoF e sistema de propulsão aéreo azimutal*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 58.

SIMPSON, M. *Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler*. 2001. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 59.

SIMÕES, D.; ALBARICI, F.; BORGES, P. Análise comparativa das coordenadas no sistema geodésico local e no sistema topográfico local. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 5, p. 62, 03 2017. Citado na página 49.

SIRF. *NMEA Reference Manual*. 2007. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/GPS/NMEA%20Reference%20Manual-Rev2.1-Dec07.pdf>>. Acesso em: 28 jan. 2023. Citado na página 44.

SONTEK. *RiverSurveyor - Discharge, bathymetry and current profiling*. 2015. Acesso em: 16 jan. 2023. Disponível em: <<https://www.ysi.com/File%20Library/Documents/Brochures%20and%20Catalogs/riversurveyor-m9-s5-brochure.pdf>>. Citado na página 17.

SONTEK. *RiverSurveyor - Quick Start Guide: Getting started with the RiverSurveyor System*. P/n 45-0040-07 rev d. [S.l.], 2018. Citado na página 63.

SONTEK. *RiverSurveyor S5/M9 System Manual*. v4.1. [S.l.], 2018. Citado 3 vezes nas páginas 66, 67 e 75.

TAKASU, T.; YASUDA, A. Development of the low-cost rtk-gps receiver with an open source program package rtklib. *International Symposium on GPS/GNSS*, 01 2009. Citado na página 39.

TALLYSMAN. *TW4721/TW4722 Wideband Dual Feed GPS/GLONASS/BeiDou/Galileo Antenna*. [S.l.], 2015. Disponível em: <https://www.tallysman.com/app/uploads/2018/08/TW4721_TW4722_Datasheet_Rev1_9.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2021. Citado na página 69.

TRIMBLE. *NMEA-0183 message: GNS*. 2007. Disponível em: <https://receiverhelp.trimble.com/alloy-gnss/en-us/NMEA-0183messages_GNS.html>. Acesso em: 28 jan. 2023. Citado na página 44.

UBLOX. *GPS: Essentials of Satellite Navigation - GPS-X-02007-D*. 2009. Disponível em: <https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GPS-Compendium_Book_%28GPS-X-02007%29.pdf>. Acesso em: 01 set. 2021. Citado 13 vezes nas páginas 23, 24, 25, 26, 27, 29, 31, 33, 40, 50, 51, 52 e 75.

UBLOX. *NEO-M8P series: u-blox M8 high precision GNSS modules*. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://content.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8P_ProductSummary_%28UBX-15015836%29.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2023. Citado na página 18.

UBLOX. *NEO/LEA-M8T - u-blox M8 concurrent GNSS timing modules - UBX-15025193 - R05 - Datasheet*. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/NEO-LEA-M8T-FW3_DataSheet_UBX-15025193.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 69.

VILANOVA, M. R. N.; BALESTIERI, J. A. P. Qualidade de dados fluviométricos obtidos através de perfilamento acústico. *Revista Árvore*, v. 37, 2013. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rarv/a/tctvrNYNtk4yCNRGGfX3qyf/?lang=pt#>>. Citado na página 16.

Wikipedia. *Local tangent plane coordinates* — *Wikipedia, A enciclopédia livre*. 2021. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Local_tangent_plane_coordinates&oldid=1033508684>. Acesso em: 19 out. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 54.

APÊNDICE A – CONFIGURAÇÃO DO EMLID REACH

Para que a comunicação entre base e rover ocorra da forma correta, são necessárias algumas configurações no aplicativo *Reach View*. O Emlid Reach cria uma rede Wi-Fi que pode ser acessada da seguinte forma:

- Conectar-se à rede **reach:xx:xx** (ex.: reach:66:ac);
- Realizar o login utilizando a senha **emlidreach**;
- No navegador, acessar o endereço *http://reach.local* ou *http://192.168.42.1*:
 - É necessário que o Reach esteja em modo hotspot¹;
 - Ao invés do endereço, o acesso também pode ser feito utilizando o aplicativo ReachView instalado em um smartphone com Android;
 - Se o Reach não estiver em modo Hotspot e estiver conectado em uma rede, o endereço de acesso será outro.

A.1 – CONFIGURAÇÕES DA BASE

- Positioning mode: Static - pois a base permanece fixa;
- Demais parâmetros podem ser configurados de acordo com a necessidade²;
- Correction input³: Desligado - Deve permanecer desligado pois a base envia (e não recebe) correções;
- Position output: Desligado - Pois a base envia somente correções e permanece em local fixo e de coordenadas conhecidas;
- Base mode⁴:
 - Device: USB OTG - Pois Xbee é ligado ao Emlid Reach utilizando a porta USB;
 - Baud rate: 57600 (ou outro valor previamente configurado no Xbee);
 - Demais parâmetros devem ser configurados de acordo com a necessidade.

¹Mais informações em: <<https://doc.emlid.com.br/reach/common/reachview/wifi/>>

²Veja mais detalhes de configuração em: <<https://doc.emlid.com.br/reach/common/reachview/rtk-settings/>>

³Mais informações em: <https://doc.emlid.com.br/reach/common/reachview/correction-input/>

⁴Mais informações em: <https://doc.emlid.com.br/reach/common/reachview/base-mode/>

A.2 – CONFIGURAÇÕES DO ROVER

- Positioning mode: Kinematic - pois o rover se movimenta;
- Correction input: USB OTG - Pois Xbee é ligado ao Emlid Reach utilizando a porta USB;
- Baud rate: 57600 (mesmo valor configurado na base);
- Position output: UART, 38400, NMEA - Para possibilitar comunicação com o ADCP;
- Base mode: Desligado.

Essas configurações permitem que a integração entre receptor GNSS RTK e ADCP ocorra sem problemas. Mais detalhes sobre configurações específicas podem ser obtidas na página oficial⁵ do fabricante.

⁵Mais informações de configuração do Emlid Reach: <<https://doc.emlid.com.br/reach/>>

ANEXO A – ESTRUTURA DAS SENTENÇAS NMEA GGA E VTG

A.1 – Estrutura da sentença GGA

A sentença GGA fornece informações sobre a posição geográfica atual do receptor GNSS, como latitude, longitude, altitude e hora. Além disso, contém também informações de qualidade de operação do sistema e número de satélites utilizados, por exemplo. É uma das sentenças mais comuns enviadas por um receptor GNSS.

Um exemplo de sentença GGA é dado por:

```
$GPGGA,130305.0,4717.115,N,00833.912,E,1,08,0.94,00499,M,047,M,,*58<CR><LF>
```

A Tabela 22 demonstra as funções de cada campo na sentença GGA.

TABELA 22 – Descrição dos campos da sentença GGA

Sentença	Descrição
\$	Início da sentença
GP	Constelação utilizada: GPS
GGA	Tipo da sentença: GGA
130305.0	Hora no formato hora-minuto-segundo: 13h 03 min 05.0 seg.
4717.115	Latitude: 47° 17,115 min
N	Indicador de latitude (N ou S, para norte ou sul).
00833.912	Latitude: 8° 33,912 min
E	Indicador de longitude (E ou W, para leste ou oeste)
1	Indicador de qualidade da posição 0 = não disponível 1 = GPS 2 = DGPS 3 = Não aplicável 4 = RTK Fixed 5 = RTK Float 6 = estimada
08	Número de satélites utilizados no cálculo.
0.94	Diluição de posição horizontal (HDOP)
00499	Altitude acima do nível do mar (m)
M	Indicador de unidade da altitude (M para metros).
047	Altitude do geoide acima do nível do mar (m)
M	Indicador de unidade de altitude do geoide (M para metros).
,	Idade dos dados diferenciais (usando DGPS ou RTK).
0000	Indicação da base de referência.
*	Separador do <i>checksum</i> .
58	<i>Checksum</i> calculado para sentença.
<CR><LF>	Fim da sentença.

A.2 – Estrutura da sentença VTG

A sentença VTG fornece informações sobre a velocidade do veículo e a direção em que ele está se movendo.

Um exemplo de sentença VTG é dado por:

```
$GPVTG,014.2,T,015.4,M,000.03,N,000.05,K*4F<CR><LF>
```

A Tabela 23 demonstra as funções de cada campo na sentença GGA.

TABELA 23 – Descrição dos campos da sentença VTG

Sentença	Descrição
\$	Início da sentença
GP	Constelação utilizada: GPS
VTG	Tipo da sentença: VTG
014.2	Curso de 14,2°(T) em relação ao plano horizontal.
T	Direção em relação ao mapa.
015.4	Curso de 15,4° (M) em relação ao plano horizontal
M	Direção em relação ao norte magnético
000.03	Velocidade horizontal (N)
N	Indica que a velocidade é fornecida em nós
000.05	Velocidade horizontal (km/h).
K	Indica que a velocidade em relação ao solo é fornecida em km/h.
*	Separador do <i>checksum</i> .
4F	<i>Checksum</i> calculado para sentença.
<CR><LF>	Fim da sentença.

ANEXO B – Exemplo de cálculo do *checksum* de uma sentença NMEA

Considerando a sentença: $\$GPRT E, 1, 1, c, 0 * 07$, onde **07** é o *checksum* correto.

1. Apenas os caracteres entre \$ e são analisados, ou seja: $GPRT E, 1, 1, c, 0$;
2. Os caracteres são convertidos em valores de 8 bits, conforme a Tabela 24.
3. O resultado é dividido em duas parcelas de 4 bits (*nibbles*);
4. O valor hexadecimal para cada um dos *nibbles* é determinado;
5. Ambos os valores são transmitidos como caracteres ASCII na forma do *checksum*.

TABELA 24 – Determinação do *checksum* em uma sentença NMEA

Caractere	ASCII (8 bits)								
G	0	1	0	0	0	1	1	1	
P	0	1	0	1	0	0	0	0	
R	0	1	0	1	0	0	1	0	
T	0	1	0	1	0	1	0	0	
E	0	1	0	0	0	1	0	'	
,	0	0	1	0	1	1	0	0	
1	0	0	1	1	0	0	0	1	
,	0	0	1	0	1	1	0	0	
1	0	0	1	1	0	0	0	1	
,	0	0	1	0	1	1	0	0	
C	0	1	1	0	0	0	1	1	
,	0	0	1	0	1	1	0	0	
0	0	0	1	1	0	0	0	0	
Resultado EXOR	0	0	0	0	0	1	1	1	
Nibble				0000				0111	
Hexadecimal				0				7	
Caractere ASCII				0				7	