

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

Manuella Anaís Rodrigues Fagundes

PROJETO E VALIDAÇÃO DE SENSOR GPS/GNSS REFLETOMÉTRICO DE CÓDIGO
ABERTO E DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO DA ALTURA DA
SUPERFÍCIE DA ÁGUA

Porto Alegre

2020

Manuella Anaís Rodrigues Fagundes

PROJETO E VALIDAÇÃO DE SENSOR GPS/GNSS REFLETOMÉTRICO DE CÓDIGO
ABERTO E DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO DA ALTURA DA
SUPERFÍCIE DA ÁGUA

Dissertação de Mestrado apresentada junto ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como exigência para obtenção do grau de Mestre em Sensoriamento Remoto.

Orientador: Felipe Geremia Nievinski

Coorientadora: Andrea Lopes Iescheck

Porto Alegre

2020

CIP - Catalogação na Publicação

Fagundes, Manuella Anais Rodrigues
PROJETO E VALIDAÇÃO DE SENSOR GPS/GNSS
REFLETOMÉTRICO DE CÓDIGO ABERTO E DE BAIXO CUSTO PARA
MONITORAMENTO DA ALTURA DA SUPERFÍCIE DA ÁGUA /
Manuella Anais Rodrigues Fagundes. -- 2020.
104 f.
Orientador: Felipe Geremia-Nievinski.

Coorientadora: Andrea Lopes Iescheck.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em
Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de
Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre,
BR-RS, 2020.

1. Geodésia por Satélite. 2. Refletometria GNSS. 3.
Altimetria. 4. Baixo custo. 5. Código aberto. I.
Geremia-Nievinski, Felipe, orient. II. Iescheck,
Andrea Lopes, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

Manuella Anaís Rodrigues Fagundes

**PROJETO E VALIDAÇÃO DE SENSOR GPS/GNSS REFLETOMÉTRICO DE CÓDIGO
ABERTO E DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO DA ALTURA DA
SUPERFÍCIE DA ÁGUA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto para obtenção do Título de Mestre em Sensoriamento Remoto.

Linha de pesquisa: Geodésia por satélite

Aprovada em 12 de fevereiro de 2020

Prof. Eduardo Puhl

Prof. Elírio Ernestino Toldo Jr.

Prof. Dr. Tomio Matsuoka

Prof. Dr. Felipe Geremia Nievinski – UFRGS (Orientador)

Profa. Dra. Andrea Lopes Iescheck – UFRGS (Coorientadora)

AGRADECIMENTOS

Cursar uma pós-graduação, realizar uma pesquisa e produzir uma dissertação é, segundo o senso comum, uma tarefa árdua e solitária. Hoje, posso afirmar que estas palavras são, em grande parte, verdadeiras. Buscar aperfeiçoar-se tecnicamente traz satisfação, mas pode ser um fardo, caso não se tenha com quem dividir os momentos de alegria e os de exaustão. Afirmando que fui privilegiada, pois não me senti só, nem mesmo quando as experiências eram frustrantes, ou quando precisei estar ausente fisicamente para atender as demandas que me foram exigidas. Nesses momentos, pude contar com o apoio de pessoas ímpares, que me deram força e incentivo para concluir esta etapa. Meu sentimento, ao escrever, é de gratidão a todos que acreditaram e compartilharam este sonho comigo.

Ao meu orientador e mentor do projeto, professor Felipe Geremia Nievinski. Durante dois anos de trabalho diário pude contar incansavelmente com seu apoio. Só tenho a agradecer pelo conhecimento adquirido, conselhos, auxílio, paciência e amizade.

À coorientadora, professora Andrea Lopes Iescheck, que acompanhou minha caminhada na pesquisa desde a iniciação científica. Agradeço por sua amizade, ensinamentos e dedicação durante todo o período de trabalho em conjunto.

Aos Colegas de laboratório que contribuíram da montagem do sensor, a testagem, saídas de campo, aos processamentos. Sou muito grata, pois o compartilhamento de ideias tornou o processo mais leve.

À minha família que esteve ao meu lado desde que li as primeiras palavras. Sei o quanto torceram em cada etapa, e, com o mestrado, não foi diferente. Obrigada do fundo do coração!

Ao meu namorado, amigo e companheiro Rodrigo Machado. Tenho muita gratidão pelo apoio, cuidados e por se fazer presente desde o início desta jornada.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, instituição pública, gratuita e de excelência, que me proporcionou amadurecimento acadêmico e pessoal desde 2011.

A todos os docentes que compartilharam seus conhecimentos e demonstraram seu amor pela pesquisa, tornando-se minhas referências.

Aos amigos que apoiaram emocionalmente com palavras de incentivo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto.

À Capes, pela bolsa de estudos.

Por fim, agradeço a todos que lutam para que mais pessoas tenham acesso ao ensino superior e a pós-graduação.

RESUMO

Monitorar o nível do mar é fundamental devido à presença de mudanças climáticas que acentuam a ocorrência de eventos extremos. Estes, por sua vez, causam situações atípicas que podem ser ocasionalmente observadas, afetando a população que vive próximo à costa e provocando prejuízos econômicos e sociais. O monitoramento de nível do mar tornou-se uma atividade primordial que recebe atenção de órgãos das esferas federal, estadual e municipal. Reporta-se aqui o desenvolvimento de um sensor terrestre para altimetria a curta distância, baseado na técnica de Refletometria com Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS-R), como o Sistema de Posicionamento Global (GPS) americano e outros semelhantes. Trata-se de uma forma de sensoriamento remoto que explora reflexões fortuitas das ondas de rádio transmitidas por satélites GPS/GNSS que atingem a superfície do mar e são recebidas pela antena receptora. Almeja-se com isso, fornecer mais dados como subsídio para densificar a rede nacional de monitoramento maregráfica. Demonstrações realizadas mundialmente utilizaram equipamentos geodésicos, de alto custo, para medir o nível do mar. Desenvolveu-se um sensor GNSS-R de código aberto e de baixo custo. Na fabricação do protótipo incluímos dispositivos capazes de gravar os dados em cartão de memória, alimentar energeticamente através de painéis solares e suportar mecanicamente a antena. Reportamos aqui testes para validação do sensor, junto ao Rio Guaíba, em Porto Alegre, estado do RS. O sensor foi testado preliminarmente em janeiro de 2018 e instalado permanentemente desde outubro de 2018, operando de forma ininterrupta durante o período analisado (até março de 2019), resistindo às condições climáticas sem apresentar panes. A estação refletométrica experimental está localizada no Cais Mauá, a uma distância de aproximadamente dez metros de um linígrafo por radar (marca Campbell Scientific e modelo CS475A), operado pela Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA). O processamento dos dados coletados foi realizado no software Matlab, onde algoritmos de inversão foram utilizados para calcular automaticamente a altura da superfície da água. Após a aquisição da série temporal, realizaram-se análises estatísticas através da comparação entre as séries temporais do linígrafo por radar e do dispositivo experimental GNSS-R. As filtragens que foram aplicadas para suavizar as séries incluíram uma mediana móvel diária e um descarte de resíduos anômalos (com valores absolutos maiores do que três vezes o desvio padrão). Cabe ressaltar que a série temporal do linígrafo apresentou falhas no período, gerando lacunas temporais e degraus devido à sua recalibração. Quando se trabalhou com uma parte reduzida da série (sem falhas), período de aproximadamente 147 dias, a correlação encontrada foi de 0,989 e o erro médio quadrático de 2,9 cm. O sensor GNSS-R apresenta uma alternativa para o

monitoramento do nível da água visto que facilita a aquisição de dados ao longo da costa, e é capaz de diminuir lacunas observacionais. As estatísticas são promissoras e apontam uma nova perspectiva para a medição da altura da água com baixo custo. A precisão precisa ser aprimorada quando comparada ao medidor de radar, porém sua estabilidade temporal é melhor. Por fim, informa-se que o sensor é disponibilizado abertamente para que pesquisadores possam reproduzi-lo, diminuindo as barreiras para a refletometria GNSS.

ABSTRACT

Monitoring sea level is essential due to the presence of climate changes that accentuate the occurrence of extreme events. These, in turn, cause atypical situations that can occasionally be observed, affecting the population that lives close to the coast and causing economic and social losses. Sea level monitoring has become a major activity that receives attention from federal, state, and municipal bodies. Here we report the development of a terrestrial sensor for short-range altimetry, based on the Reflectometry technique with Global Satellite Navigation Systems (GNSS-R), such as the American Global Positioning System (GPS) and others similar. It is a form of remote sensing that explores random reflections of radio waves transmitted by GPS / GNSS satellites that reach the sea surface and are received by the receiving antenna. The aim is to provide more data as a subsidy to densify the national tide monitoring network. Demonstrations carried out worldwide used high-cost geodesic equipment to measure sea level. A low cost, open-source GNSS-R sensor was developed. In the manufacture of the prototype, we included devices capable of recording data on a memory card, energizing through solar panels, and mechanically supporting the antenna. We report here tests for sensor validation, along the Guaíba river, in Porto Alegre, state of RS. The sensor was preliminarily tested in January 2018 and permanently installed since October 2018, operating uninterruptedly during the analyzed period (until March 2019), withstanding weather conditions without breaking down. The experimental reflectometric station is located at Cais Mauá, at approximately ten meters from a radar gauge (Campbell Scientific brand and model CS475A), operated by the State Secretariat for the Environment (SEMA). The processing of the collected data was performed in the Matlab software, where inversion algorithms were used to automatically calculate the height of the water surface. After the acquisition of the time series, statistical analyzes were performed by comparing the time series of the radar gauge and the GNSS-R experimental device. The filtrations that were applied to smooth the series included a daily moving median and anomalous waste disposal (with absolute values greater than three times the standard deviation). It is noteworthy that the time series of the radar gauge showed flaws in the period, generating time gaps and steps due to its recalibration. When working with a reduced part of the series (without fail), a period of approximately 147 days, the correlation found was 0.989 and the mean square error was 2.9 cm. The GNSS-R sensor presents an alternative for monitoring the water level as it facilitates the acquisition of data along the coast and can reduce observational gaps. Statistics are promising and point to a new perspective for low-cost water height measurement. Accuracy needs to be improved when compared to the radar meter, but its

temporal stability is better. Finally, it is reported that the sensor is openly available for researchers to reproduce it, reducing the barriers to GNSS reflectometry.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Local de testagem do dispositivo experimental	19
1.2 Objetivos	20
1.2.1 Objetivos específicos	20
1.3 Hipóteses.....	20
2. ESTADO DA ARTE.....	22
2.1 Medição da altura da superfície da água.....	22
2.1.1 Realidade brasileira	24
2.2 GNSS: Sistemas Globais de Navegação por Satélite.....	25
2.3 GNSS-R: Refletrometria GNSS.....	27
2.4 GNSS-MR: Refletrometria de Multicaminho GNSS.....	28
2.4.1 Área de cobertura em GNSS-MR.....	30
2.4.2 Observáveis em GNSS-MR.....	34
2.4.3 Estimação altimétrica em GNSS-MR.....	36
2.4.3 Demonstrações anteriores.....	39
2.4.4 Hardware para GNSS-MR.....	40
3. METODOLOGIA.....	43
3.1 Dispositivo	43
3.1.1 Hardware	43
3.1.2 Software.....	47
3.2 Instalações.....	49
3.2.1 Testes em laboratório	50
3.2.2 Instalações temporárias	50
3.2.3 Instalação permanente	52
3.3 Métodos de análise.....	54
3.3.1 Aquisição de série temporal do GNSS-MR.....	54

3.3.2 Obtenção de série temporal do linígrafo	59
4. RESULTADOS	62
4.1 Dimensionamento do painel solar	62
4.2 Resultados das instalações temporárias	63
4.2.1 Campanha de Imbituba (SC)	63
4.2.2 Campanha de Tramandaí (RS)	65
4.2.3 Campanha de Porto Alegre (RS)	67
4.3 Resultados da instalação permanente	69
4.3.1 Análise da inversão SNR	69
4.3.2 Análise temporal completa	70
4.3.3 Análise temporal reduzida	79
5. CONCLUSÕES	82
REFERÊNCIAS	84
APÊNDICES	91
Apêndice A – Rotina de inversão	91
Apêndice B – Orçamento do hardware	94
Apêndice C – Sistema de energia	96
Apêndice D - Campanhas iniciadas	99
Apêndice E – Mapa de localização da instalação no Cais Mauá	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rede da RMPG Fonte: IBGE (2020).....	24
Figura 2 - Skyplot das constelações GNSS	26
Figura 3 - DDM (acima) e CW (abaixo)	28
Figura 4 - Princípio da técnica de GNSS-MR	29
Figura 5 - Interferência construtiva (acima) e destrutiva (abaixo)	30
Figura 6 - Reflexão difusa (superfície rugosa) e especular (superfície lisa)	30
Figura 7 - Pontos de reflexão de multicaminho	31
Figura 8 - Recepção dos sinais direto e refletido, sendo: a elevação do satélite e h a altura da antena.....	32
Figura 9 - Conceito de Zonas de Fresnel aplicado em refletometria	33
Figura 10 - Zonas de Fresnel de um satélite para diversos ângulos de elevação	34
Figura 11 - Representação do SNR em função da elevação. Em preto tem-se o dado bruto, e em vermelho a modelagem.	35
Figura 12 - Estação PBAY mais próxima (direita) e mais afastada da água (esquerda).....	37
Figura 13 - Estação de Friday Harbor.....	38
Figura 14 - Exemplo de representação das reflexões (esquerda) e representação do comportamento espectral do SNR (direita)	39
Figura 15 - Fluxograma das principais etapas da metodologia	43
Figura 16 - Feather Adalogger.....	44
Figura 17 - GPS FeatherWing	44
Figura 18 - Antena externa	45
Figura 19 - Painel solar	45
Figura 20 - Bateria	46
Figura 21 - Termostato	46
Figura 22 - Sistema de carregamento	46
Figura 23 - Ambiente de desenvolvimento.....	48
Figura 24 - Arquivo no formato NMEA.....	48
Figura 25 - Primeira campanha temporária em 26 de janeiro de 2018.....	51
Figura 26 - Registro de cada uma das campanhas: Porto Alegre (esquerda), Imbituba (centro-esquerda), Tramandaí (centro-direita) e novamente Tramandaí (direita).....	51
Figura 27- Instalação no Cais Mauá: Instalação da estação permanente (esquerda), interior (direita-acima) e parafusos de fixação (direita-abaixo)	52

Figura 28 - Zonas de Fresnel para a localização da instalação	53
Figura 29 - Localização do sensor próximo ao linígrafo. Estação refletométrica (direita-acima) e Linígrafo (direita-abixo).....	54
Figura 30 - Resultado de inversão	55
Figura 31 – Custo do sensor por radar.....	59
Figura 32 - Régua com sensor de pressão localizada no Cais Mauá	60
Figura 33 - Calibração do sensor por radar.	61
Figura 34 - Tensão ao longo do tempo com o painel médio	62
Figura 35 - Tensão ao longo do tempo para o painel menor	63
Figura 36 – Representação da linha de rastreo obtida a partir dos dados do sensor GNSS-R. Em azul os pontos medidos com espaçamento devido às falhas no rastreo.	64
Figura 37 - Dados do experimento realizado em Imbituba para o PRN 15. Comportamento do SNR em função do tempo.....	64
Figura 38 - Dados do experimento realizado em Tramandaí 1 para o PRN 15: trajetória do satélite	65
Figura 39 - Dados do experimento realizado em Tramandaí 1 para o PRN 15: azimute do satélite (esquerda) e gráfico de SNR x Elevação (direita). Em preto: dado bruto. Em vermelho: modelagem da inversão.	66
Figura 40 - Inversão realizada para os dados da segunda campanha de Tramandaí 2 - PRN06 Azimute 219. Em cinza: dado bruto. Em vermelho: resultado da inversão	67
Figura 41 - Lâmina d'água no Cais Mauá na campanha de 09/03/2018	68
Figura 42 - Resultado da inversão para o PRN 16: em cinza o dado medido, em vermelho o calculado.	68
Figura 43 - Inversões para estimativa do nível da água no Cais Mauá: em cinza o dado medido, em vermelho o calculado e em azul o resíduo.	70
Figura 44 - Série temporal bruta obtida com o sensor GNSS-R.....	71
Figura 45 - Série temporal do linígrafo	71
Figura 46 -Filtragem dos azimutes	72
Figura 47 - Dados de GNSS-MR sem suavização e dados do linígrafo sem suavização.	73
Figura 48 - Descarte de resíduos anômalos	74
Figura 49 - Série temporal do GNSS-R sem os resíduos anômalos e série temporal bruta do linígrafo.....	74

Figura 50 - Dados de GNSS-MR descartando os resíduos anômalos e dados do linígrafo com suavização.....	75
Figura 51 - Séries temporais sobrepostas. GNSS-MR em preto e linígrafo em vermelho.	76
Figura 52 – Séries temporais do erro de altura entre GNSS-R e linígrafo	76
Figura 53 - Dispersão dos dados do GNSS-MR versus dados do linígrafo.....	77
Figura 54 - Diferença entre os dados: GNSS-MR versus linígrafo.	78
Figura 55 – Resolução temporal média	78
Figura 56 - Série temporal do período reduzido.....	79
Figura 57 - Gráfico de dispersão para o período reduzido	80
Figura 58 - Diferença para o período reduzido.....	80
Figura 59- Localização da estação refletométrica experimental de Imbituba	100
Figura 60- Estação refletométrica experimental de Imbituba.....	101
Figura 61 - Localização das estações de Balneário Rincão	102
Figura 62 - Sensor GNSS-R fixo em Balneário Rincão	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Campanhas temporárias	50
Tabela 2. Comparação entre nivelamento geométrico e GNSS-R	69
Tabela 3. Análise estatística.	76
Tabela 4. Resolução temporal média, em termos de percentis do espaçamento temporal entre estimativas	79
Tabela 5. Estatística da série temporal reduzida.....	81

1. INTRODUÇÃO

Monitorar as zonas costeiras é um desafio tratado com atenção devido aos impactos que essas regiões têm sofrido ao longo dos anos. No Brasil, a lei federal nº 7.661 de 1988 instituiu o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), que forneceu as diretrizes para orientar o uso nacional das áreas localizadas entre o mar, a terra e o ar. Em 2018, após trinta anos da aprovação do PNGC, criou-se o Programa Nacional para Conservação da Linha de Costa que possui quatro projetos principais, sendo estes resultados da parceria entre colaboradores institucionais e a comunidade científica. Com o passar do tempo, aumenta-se a preocupação com as mudanças climáticas, fazendo com que alguns fenômenos recebam mais atenção devido aos possíveis impactos futuros. Um destes fenômenos é aumento o nível do mar, uma vez que o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas de 2019 aponta uma elevação mais rápida no século XXI do que no século XX (PÖRTNER *et al.*, 2019)

As alterações no nível do mar podem ser causadas por fenômenos de natureza oceanográfica ou terrestre (CAZENAVE, 2004). A oceanografia e a geodésia tornaram-se ferramentas de grande importância para auxiliar a prever cenários futuros (TAMISIEA *et al.*, 2014), assim como para auxiliar no planejamento de mitigação e adaptação (BOATENG, 2010; ELSHAROUNY, 2016; NICHOLLS, 2011). Um dos três pilares da geodésia trata da determinação e evolução da geometria da terra, incluindo o nível médio do mar (RUMMEL; ROTHACHER; BEUTLER, 2005). Este último ainda é um desafio devido às muitas variáveis envolvidas e à exigência de observações que abranjam uma longa duração e uma grande área, principalmente ao longo das regiões costeiras. Infelizmente, lacunas observacionais persistem tanto no tempo quanto no espaço (CAZENAVE, 2004).

Além do monitoramento do nível do mar, monitorar o nível dos rios é fundamental devido à presença de mudanças climáticas que acentuam a ocorrência de eventos hidrológicos considerados críticos, como inundações e secas. Estes, por sua vez, causam situações atípicas que podem ser frequentemente observadas, afetando tanto a população que vive próximo às margens quanto provocando prejuízos econômicos. O monitoramento do nível dos rios tornou-se uma atividade primordial que recebe atenção de órgãos das esferas federal, estadual e municipal.

A Agência Nacional das Águas (ANA) é responsável pela Política Nacional de Recursos Hídrico (BRASIL, 1997) e promove a coordenação das atividades desenvolvidas no âmbito da rede hidrometeorológica nacional, em parceria com órgãos e entidades públicas, privadas e

usuários. A determinação do nível de um rio pode ser realizada através de diferentes metodologias, onde cita-se de forma mais obsoleta o uso de seções de réguas e, mais recentemente, o uso de Plataforma de Coleta de Dados (PCD). A Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) atualmente monitora mais de quatro mil pontos dos quase treze mil rios cadastrados no sistema de informações hidrológicas da ANA. Do número total de estações, menos da metade é capaz de monitorar o nível, e as demais objetivam o monitoramento de chuvas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, [s. d.]).

Equipamentos com diferentes princípios são usados para medir o nível da água, como marégrafos e linígrafos (CIPOLLINI *et al.*, 2017). Próximo de quase dois séculos de experiência com medidores de maré automáticos (MATTHÄUS, 1972), ainda persistem problemas para garantir que não haja movimento vertical espúrio, resultando em interpretações errôneas de mudança no nível do mar. Tornou-se recomendação padrão que a instrumentação do sistema global de navegação por satélite (GNSS) de qualidade geodésica seja instalada o mais próximo possível dos medidores de marés para medir a deformação costeira, e padronizar os registros relativos do nível do mar a uma estrutura geocêntrica (LARSON *et al.*, 2013). Estima-se que futuramente apenas um sensor GPS, rastreando continuamente, deverá garantir tanto o controle do posicionamento quanto a medida precisa do nível do mar, sendo esta segunda obtida através do emprego da técnica de GNSS-R (LARSON *et al.*, 2013).

Refletometria GNSS (GNSS-R) é uma técnica de sensoriamento remoto seguindo o princípio do radar bistático (ZAVOROTNY *et al.*, 2014), ou seja, em que o transmissor e o receptor encontram-se separados. O sensor terrestre é apenas um receptor do sinal emitido pelo satélite. O sistema pode ser configurado basicamente como um altímetro e permite estimar parâmetros geofísicos, como altura da superfície do mar; também pode ser configurado para aplicações não altimétricas, permitindo a estimação de parâmetros geofísicos (LARSON, 2016). Uma configuração específica do GNSS-R baseia-se na recepção simultânea de múltiplos caminhos - propagação direta e reflexão indireta - que são rastreados usando uma réplica de sinal único. Esse modo pode ser chamado de refletometria de multicaminho (GNSS-MR) e sua principal observável envolve a interferência construtiva e destrutiva entre os dois caminhos coerentes. O padrão de interferência é mais facilmente observado nas observações da relação sinal-ruído (SNR), caso em que a técnica também é conhecida como refletometria interferométrica GNSS (GNSS-IR). Vários estudos mostraram como o GNSS-R baseado em SNR pode ser usado para monitorar uma variedade de alvos da superfície terrestre (LARSON,

2016). Uma aplicação frutífera tem sido o sensoriamento proximal do nível do mar a partir de estações costeiras (LARSON; RAY; WILLIAMS, 2017).

Os estudos mais difundidos que usam a refletometria GNSS para medir o nível do mar usam receptores e antenas geodésicos. Em algumas localidades próximas ao mar já existem estações de referência de operação contínua. Essas estações, além de obter dados para o controle dos movimentos do solo ou instabilidade no monumento, permitem calcular a altura da superfície da água. No entanto, os receptores e antenas GNSS geodésicos são relativamente caros e podem ser alvos de roubo e vandalismo. Dispositivos de menor custo podem fornecer uma solução alternativa (BIAGI; GREC; NEGRETTI, 2016), especialmente atraente para instalações não assistidas. Eles também permitem uma grande densificação nas redes de sensores, pois o custo de estações individuais pode ser menor. Particularmente, a plataforma de baixo custo recebeu muita atenção em aplicações de detecção ambiental e prototipagem (CHEN; WON; AKOS, 2017a; RAINVILLE *et al.*, 2019; RODRIGUES; MORAES, 2019).

Nesta dissertação, relata-se o desenvolvimento de opções de código aberto e de baixo custo, para o GNSS-R baseado em SNR. Demonstra-se sua validação para a medição da superfície da água. O sensor foi primeiramente testado em laboratório, com a finalidade de confirmar seu funcionamento e sua estabilidade. Segundamente, foi avaliado em campanhas temporárias e, posteriormente, instalado permanentemente no Cais Mauá, para monitoramento do Rio Guaíba, em Porto Alegre.

1.1 Local de testagem do dispositivo experimental

O Rio Guaíba (ou Lago Guaíba, dependendo do autor) foi o local escolhido para teste e avaliação do sensor por mera conveniência logística, dada a proximidade à UFRGS bem como a existência de sensor convencional para comparação. Ainda assim, cabem alguns comentários acerca desse corpo hídrico, que tem elevada importância ambiental, econômica e histórico-cultural no estado do Rio Grande do Sul. O Guaíba recebe o escoamento de oito sub-bacias e possui uma área de 496 km² (NICOLODI; TOLDO JR; FARINA, 2013). Banha as cidades de Porto Alegre, Eldorado do Sul, Guaíba, Barra do Ribeiro e Viamão. Seu regime hidrológico é complexo, devido a fatores de influência como a vazão dos rios secundários, ventos e marés astronômicas (NICOLODI, 2007). Em períodos de normalidade, as alturas de onda variam entre 5 e 45 cm, relacionados diretamente com a velocidade do vento (NICOLODI; TOLDO JR; FARINA, 2013).

Em 1941 Porto Alegre presenciou a maior enchente registrada (RECKZIEGEL; WESCHENFELDER; BAZZAN, 2018), causada por um aumento do nível do Rio Guaíba, gerando um alerta para que planos de ação fossem implementados. Em 2015 o Centro Integrado de Comando, pertencente a Secretaria Estadual do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul, divulgou um boletim especial contendo dados e informações sobre a cheia que ocorreu naquele ano (CEIC, 2015). Em 2016 a cidade de Eldorado do Sul decretou situação de emergência devido à enchente que atingiu centenas de famílias (MUNHOZ, 2016).

1.2 Objetivos

O problema de pesquisa consiste em medir a altura da superfície da água via sensoriamento remoto proximal, através técnica de GNSS-R, utilizando um sensor de baixo custo. Obtendo sucesso, almeja-se densificar a rede de monitoramento do nível do mar, e fornecer dados como subsídio para a estratégia nacional de adaptação as mudanças climáticas.

O objetivo geral deste trabalho consiste em monitorar as variações do nível da água a partir de um sensor GNSS-R de baixo custo.

1.2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos consistem em compreender a técnica de GNSS-R, estudar as aplicações já existentes no Brasil e no mundo, conforme elencados na listagem abaixo:

- Montagem do sensor GNSS-R;
- Testagem do sensor;
- Escolha da área de estudo;
- Instalação do sensor;
- Monitoramento;
- Validação;
- Fornecimento de tutorial de montagem e instalação;

1.3 Hipóteses

Partindo-se do fato de que a técnica de GNSS-R tem apresentado resultados de qualidade decimétrica ou melhor com receptores geodésicos, levanta-se a hipótese do monitoramento instantâneo das variações da água com um sensor GNSS-R de baixo custo com qualidade comparável aos dos sensores de alto custo.

1.4 Planejamento

Desafios e dificuldades estão interligados a todo processo de desenvolvimento e evolução, portanto tem-se ciência das dificuldades. Considerando a logística no contexto do desenvolvimento, aborda-se:

- Funcionamento do sensor pelo maior tempo possível, avaliando seu desempenho quanto às adversidades do clima. No Rio Grande do Sul tem-se um clima temperado subtropical, com grande variação sazonal de temperatura, portanto, espera-se que o dispositivo resista às quatro estações do ano.
- Estudo da viabilidade da aplicação do sensor de baixo custo para medir a altura da água no Rio Guaíba. Para o ambiente controlado espera-se pouca influência da rugosidade, devido as ondas possuírem baixa amplitude, e pretende-se com isso validar o dispositivo refletométrico.
- Limitação da precisão devido a influência da troposfera. Sabe-se dos ruídos advindos da troposfera causam interferência no sinal e fazem com que a precisão seja degradada. Porém, mesmo que a precisão não atinja a magnitude milimétrica, seria viável investir no dispositivo para obter informações em locais de difícil instalação de dispositivos tradicionais ou até mesmo próximo a estes para complementar dados em caso de falhas. Espera-se precisão centimétrica.
- Via GNSS-R é possível medir o alvo de interesse a distância, descartando a necessidade de contato direto, ou de estrutura física sobre a água. A partir disto, vê-se uma nova possibilidade de monitoramento contínuo em locais inacessíveis ou de difícil instalação.
- Com o intuito de restringir as barreiras entre GNSS-R e as aplicações de altimetria no Brasil, fazendo uso da ciência aberta, espera-se produzir um tutorial de montagem do sensor, incentivando outros pesquisadores a desenvolverem seus próprios dispositivos.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Medição da altura da superfície da água

Monitorar o nível das águas é uma prática essencial devido aos impactos que alterações destes podem causar. O nível do mar, por exemplo, vem sendo estudado pelas mais diversas áreas do conhecimento, e abrange diversos profissionais. Devido a isto, confusões ocorrem quando se trata das terminologias utilizadas para se referir aos termos das ciências do mar. Com o objetivo de facilitar o entendimento e esclarecer termos ambíguos, Gregory *et al.* (2019) propuseram a padronização de expressões. Diferiu-se especificamente a altura da superfície do mar – *Sea Surface Height* (SSH) instantânea de um lado do nível médio do mar – *Mean Sea Level* (MSL) de outro, visto que o nível do mar envolve uma média temporal. Na prática referir-se apenas a "nível do mar" é, portanto, ambíguo. Refere-se nesta dissertação a altura da superfície da água, de forma a não se restringir apenas ao mar, mas também aos corpos hídricos continentais, de água doce. Com a técnica de GNSS-R obtém-se um valor de profundidade para a superfície da água, que é dado em relação à posição da antena. Não se objetiva desmembrar os fatores que influenciam a movimentação do corpo d'água, apenas registrar os dados e validar o dispositivo de baixo custo.

Andrade, Toldo e Nunes (2018) abordam uma tendência significativa de aumento do nível do mar e a intensificação de eventos extremos que são observados mundialmente em diversos locais, ao ponto que a costa do Rio Grande do Sul teria esses eventos mais pronunciados, devido às suas características morfodinâmicas. Devido a estes fatores, aborda-se a necessidade de um monitoramento contínuo e preciso do mar ao longo das áreas costeiras. Entretanto, sabe-se que em locais como o Brasil, há uma carência de dados oceanográficos de longo prazo na costa brasileira (ANDRADE; TOLDO; NUNES, 2018).

Quando se fala ou se trabalha com mar, é importante compreender que há fenômenos de diversos tipos causando diferenças de nível constantemente. Portanto, torna-se complexo quantificar o nível médio dos mares e todos seus fatores de influência. Andrade, Toldo e Nunes (2018) atentam para a necessidade de considerar as marés astronômicas na região sul do Brasil, visto que estas são muitas vezes ignoradas na literatura. Sabe-se que as variações são causadas por ondas, marés de superfície, variabilidade meteorológica sazonal, interanual e de longo prazo, erupções vulcânicas e tectônica de placas dentre outras (GREGORY *et al.*, 2019), porém é um desafio quantificar cada um destes fatores.

Penna *et al.* (2018) afirmam que, até o momento, a medida de nível do mar é obtida por meio de satélites altímetros, de GNSS presos a boias e de marégrafos. Porém, os satélites possuem limitação de resolução temporal e espacial, e apresentam precisão prejudicada nas regiões costeiras. Marégrafos fornecem alta resolução temporal, mas tem pouca resolução espacial. As boias GNSS, baseadas em posicionamento geodésico, podem apresentar alta resolução temporal, mas possuem desvantagem pelos dados obtidos serem pontuais. Houve tentativas de medir o nível do mar também com dispositivos Lidar, porém as medidas foram limitadas ao tempo de voo e às resoluções temporais e espaciais.

Equipamentos com diferentes princípios são hoje utilizados para medir o nível do mar, sendo os marégrafos um dos mais difundidos. O experimento realizado por Penna *et al.* (2018) objetivou medir a altura da superfície do mar por um período de treze dias no Mar do Norte. A metodologia consistiu em introduzir um sensor GNSS e uma antena a bordo de um veículo marítimo não tripulado e remotamente pilotado, denominado Wave Glider SV2. Os dados do GNSS necessitaram de pós-processamento através da técnica de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Os autores observaram a utilidade do equipamento em zonas costeiras, onde há carência de dados com precisão centimétrica.

Com o aprimoramento da tecnologia e dos modelos matemáticos envolvidos, a precisão dos sensores radar orbitais melhorou, para o nível dos oceanos em alto-mar. Entretanto, nas regiões costeiras esta precisão é prejudicada. Cipollini et al. (2017) descrevem o monitoramento do nível do mar na costa com satélites altímetros e concluem sobre a necessidade de aprimorar e sofisticar os modelos para medições em zonas costeiras.

A instalação de estações contínuas do *Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global (GPS) ou *Global Navigation Satellite System* - Sistema de navegação por satélite (GNSS) próximas a marégrafos é uma prática recomendada para obter controle posicional dos equipamentos (BEVIS; SCHERER; MERRIFIELD, 2002). Porém nem todas as instalações seguem um padrão correto de instrumentação, monumentação, procedimento operacional, análise dos dados e arquivamento, fatores estes que podem causar interferências na precisão e na interpretação dos resultados obtidos. Bevis, Scherer e Merrifield (2002) abordam a vantagem de instalar um GPS o mais próximo possível do marégrafo, onde o deslocamento vertical entre a antena e o sensor de medição pode ser conhecido através de um nivelamento de precisão, garantindo que não haverá movimento relativo entre eles. Neste caso novos nivelamentos devem ser realizados em determinados períodos para garantir o valor do offset correto. Porém, em termos práticos, é difícil garantir que todas as recomendações serão

implementadas, e que o monitoramento dos equipamentos ocorrerá com uma frequência específica.

2.1.1 Realidade brasileira

A nível federal, o órgão responsável pelo monitoramento do nível do mar é o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), cuja rede de mareógrafos constitui a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG). A RMPG é composta por estações que objetivam monitorar o datum vertical brasileiro, associado às estações de Imbituba (SC) e de Santana (AP), e os outros níveis de referência mareográficos. O órgão também visa contribuir nos estudos voltados a atualização das altitudes brasileiras e nível do mar. A Figura 1 mostra a localização das estações ao longo da costa brasileira, onde contabiliza-se seis ativas (em verde) e uma inativa (marrom). É possível observar que para uma extensão de mais de 8500 km, a atual dispersão geográfica de dispositivos capazes de medir o nível dos mares é insatisfatória, especialmente considerando que aproximadamente 26% da população brasileira vive nas áreas costeiras (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2018).



Figura 1 - Rede da RMPG Fonte: IBGE (2020)

Uma dificuldade encontrada quando se trata de monitoramento em regiões costeiras é a instalação e manutenção dos marégrafos. A instalação muitas vezes é complexa e fica suscetível a vandalismo e às condições climáticas. Os sensores necessitam estar em contato com a água, ou diretamente sobre ela, para efetuar as medições, o que muitas vezes torna difícil sua fixação. A exposição dos marégrafos aos eventos extremos, que geram ondas de grande amplitude, acabam por ocasionar perdas de equipamentos. A manutenção deve ser realizada por mão de obra especializada e com determinada frequência, o que encarece ainda mais o valor do próprio sensor e de sua estrutura mecânica.

Alguns estados e municípios possuem órgãos ambientais responsáveis por sensores próprios, porém estes dados muitas vezes são de restrito compartilhamento. Nestes casos não há integração entre os estudos desenvolvidos e, portanto, os planos de ação acabam sendo locais, quando existem.

2.2 GNSS: Sistemas Globais de Navegação por Satélite

Global Navigation Satellite System (GNSS) é traduzido como Sistema Global de Navegação por Satélite, que corresponde a cada um dos sistemas de posicionamento e navegação via satélite que são largamente utilizados por diversos usuários e para diversas aplicações. Desenvolvido a partir da década de 70, o GPS é o GNSS dos Estados Unidos. Possui disponibilidade contínua, cobertura global, e atualmente conta com 34 satélites (MONICO, 2007). Além do GPS há outros GNSS, entre eles o GLONASS, o Galileo e o BeiDou, sendo estes pertencentes a diferentes nações.

O GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) é o GNSS da Rússia. Alternativo ao GPS, é o único com cobertura global e disponibilidade contínua, e possui atualmente vinte e quatro satélites ((UNITED NATIONS; OFFICE FOR OUTER SPACE AFFAIRS, 2018). O Galileo é um GNSS europeu em desenvolvimento, que atualmente possui dezoito satélites. O BeiDou, também chamado de *COMPASS*, é o GNSS em desenvolvimento pela China, que possui satélites geoestacionários e também para cobertura global (UNITED NATIONS; OFFICE FOR OUTER SPACE AFFAIRS, 2018). Atualmente, o BeiDou conta com um total de trinta e seis satélites. A Figura 2 - Skyplot das constelações GNSS mostra a representação celeste (*Skyplot*) das órbitas de alguns satélites pertencentes às diferentes constelações. Há uma gama de equipamentos disponíveis receptores no mercado, com capacidade de rastrear sinais de diferentes constelações. Os sinais enviados continuamente pelos satélites são ondas eletromagnéticas do tipo de rádio, mais especificamente microondas

(TEUNISSEN; MONTENBRUCK, 2017). Quanto mais satélites consegue-se rastrear, melhor é a precisão adquirida no posicionamento.

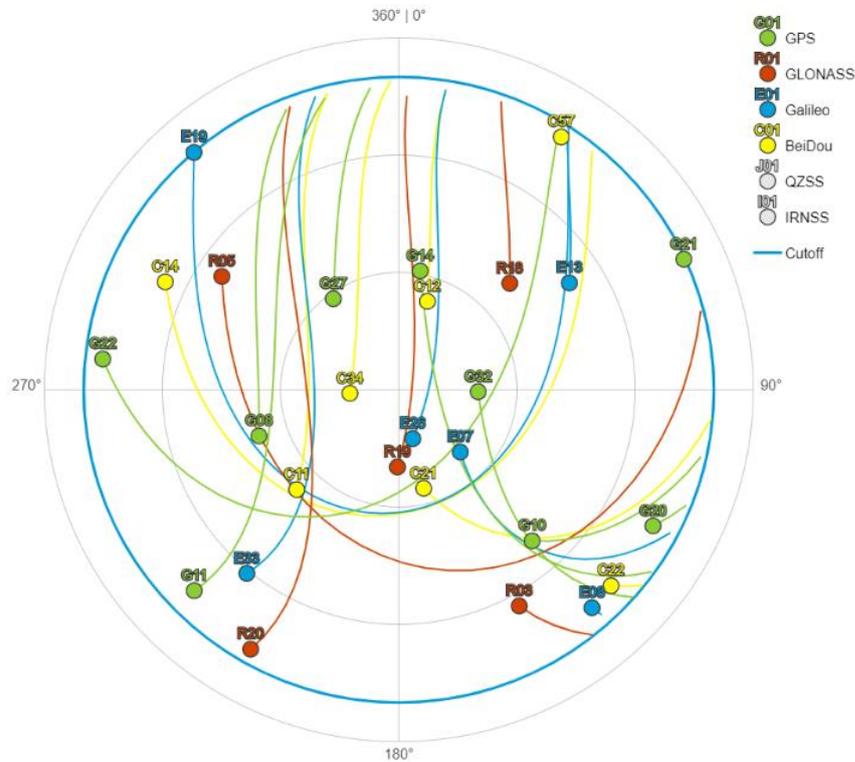


Figura 2 - Skyplot das constelações GNSS

Fonte: Trimble GNSS Planning Online

O GPS foi o primeiro GNSS totalmente operacional. A estrutura do sinal foi projetada para permitir múltiplos transmissores usando a mesma banda de frequência, possuindo certa tolerância a multicaminho e interferência (ZAVOROTNY *et al.*, 2014). Cada satélite GPS transmite duas ondas portadoras, L1 e L2, que são geradas a partir da frequência fundamental de 10,23 MHz. L1 é multiplicada pela constante 154 e L2 por 120, o que permite associar a comprimentos de onda de 19 cm e 24 cm, respectivamente (MONICO, 2007). Os blocos de satélites mais recentes transmitem na portadora L5, que possui frequência de 1176,45 MHz, com comprimento de onda de 25,5 cm. Os satélites do sistema GPS são identificados pelo seu código PRN através da técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*). Para posicionamento são utilizadas as observáveis de pseudodistância e da fase da portadora, enquanto para refletometria dá-se referência a observável da chamada relação sinal-ruído (SNR).

2.3 GNSS-R: Refletrometria GNSS

Refletometria GNSS (GNSS-R) é uma técnica de sensoriamento remoto que explora reflexões fortuitas de ondas de rádio transmitidas pelos satélites GNSS. É uma técnica que surgiu em 1988 com a proposta da técnica baseada na exploração multiestática do GNSS para sensoriamento remoto (HALL; CORDEY, 1988), onde multiestática refere-se à separação entre transmissores e receptores. Martín-Neira (1993) propôs o conceito de *Passive Reflectometry and Interferometry System* (PARIS) para realizar medidas altimétricas do mar utilizando as ondas eletromagnéticas transmitidas pelos satélites GNSS. A técnica de GNSS-R convencional consiste na correlação cruzada do sinal refletido recebido com uma réplica interna do receptor (KATZBERG; GARRISON, JR, 1996).

Em GNSS-R, a partir do contato das ondas eletromagnéticas com a superfície e posterior recebimento pela antena receptora, pode-se trabalhar com três tipos de observáveis. Denomina-se *Delay Doppler-Map* (DDM) como uma observável bidimensional, *Correlation Waveform* (CW) como uma observável unidimensional e o *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) como a observável em escalar ou pontual. Estes resultam da comparação do sinal medido com a réplica interna do receptor, sendo que o domínio ou espaço de busca para comparação envolve tempo (ou atraso de propagação) e frequência (Doppler). O ponto com correlação máxima corresponde ao SNR, o qual pode ainda evoluir no tempo. Segundo Roesler e Larson (2018), em algum nível, todos os estudos GNSS-R baseados na análise de padrões SNR são criados pela interferência de sinais GNSS diretos e refletidos (ou com vários caminhos). A Figura 3 mostra a representação das observáveis DDM e CW (ZAVOROTNY *et al.*, 2014). O pico do gráfico de potência de correlação versus tempo corresponde ao valor pontual do SNR, conforme Figura 3.

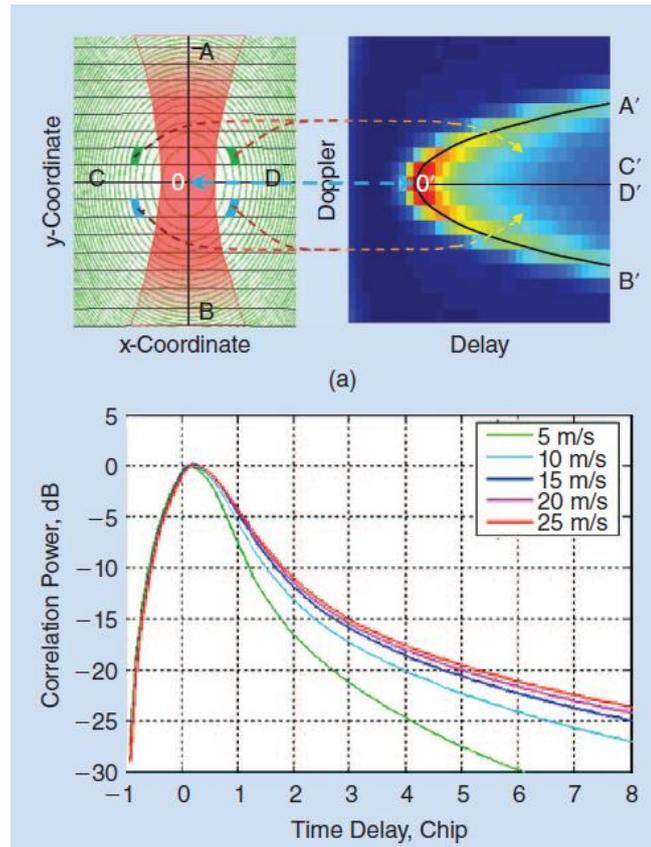


Figura 3 - DDM (acima) e CW (abaixo)

Fonte: (ZAVOROTNY *et al.*, 2014).

2.4 GNSS-MR: Refletometria de Multicaminho GNSS

Para GNSS-R em geral o rastreamento ocorre separadamente para as ondas eletromagnéticas propagadas por via direta do satélite e por via indireta (reflexão). Já a técnica de refletometria por multicaminho GNSS (GNSS-MR) é baseada no rastreamento conjunto das ondas direta e refletida. Conforme Garrison *et al.* (2019) as denominações da técnica de padrão de interferência GNSS (GNSS-IPT) e a refletometria interferométrica GNSS (GNSS-IR) são sinônimos de GNSS-R.

A aplicação da técnica utilizando diferentes plataformas (espaciais, aéreas, terrestres), para obter informações de vários tipos de superfície (terra, água e gelo), foi demonstrada em vários trabalhos (ALONSO ARROYO *et al.*, 2014; GUTMANN *et al.*, 2012; LARSON, 2016; MÉSZÁROS, 2012). A Figura 4 mostra o princípio do GNSS-MR, que possui aplicações nas mais diversas áreas, onde observa-se os satélites emitindo sinais que chegam no receptor de forma direta e refletida.

Foram realizadas demonstrações sobre a profundidade da neve, biomassa da vegetação, umidade do solo e nível do mar (LARSON, 2016). Além disso, também é possível obter outras

variáveis climáticas importantes em hidrologia e oceanografia, que, quando comparadas aos sensores convencionais, podem ser validadas com sucesso (MOTTE *et al.*, 2016) e (SEMMLING *et al.*, 2011).

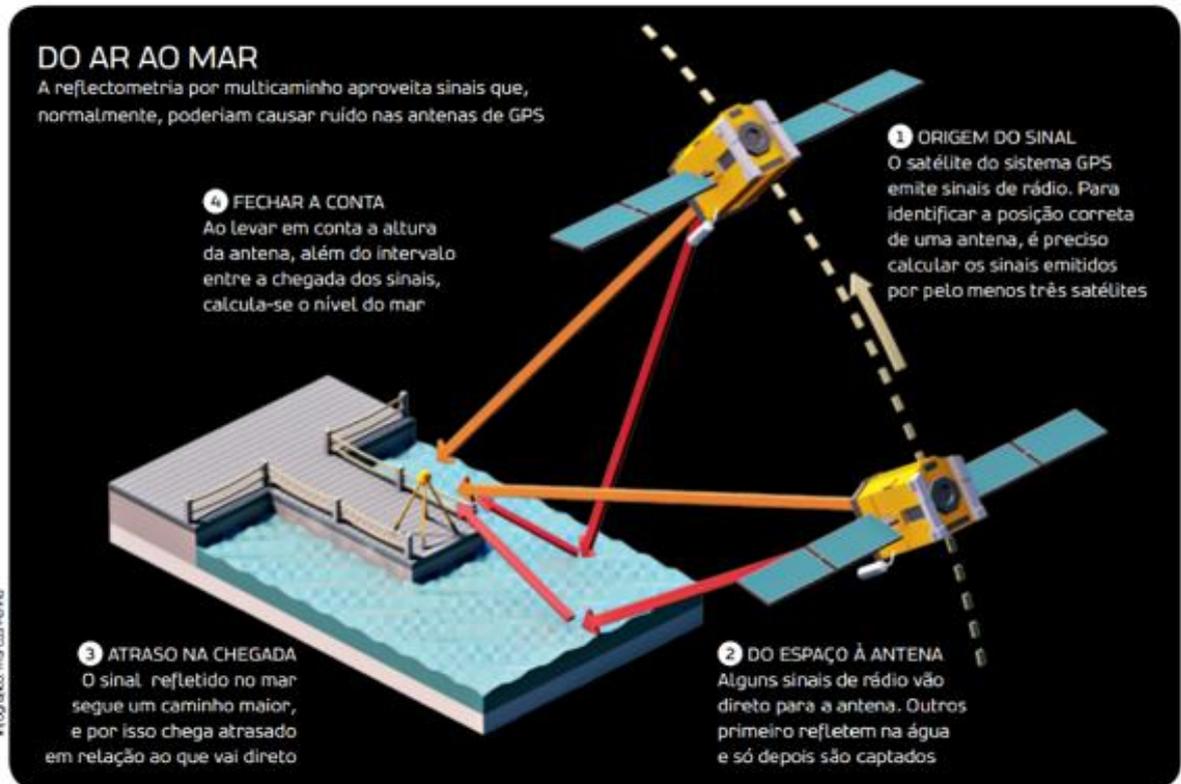


Figura 4 - Princípio da técnica de GNSS-MR

Fonte: Silveira (2014).

Para medições do nível do mar, a técnica GNSS-MR pode ser complementar em relação aos altímetros convencionais, considerando que ambos operam em distintas localidades. Os satélites altímetros possuem faixas de varredura em cobertura global, porém sua precisão é degradada nas regiões costeiras. Já as antenas GNSS instaladas na costa podem cobrir o nível do mar até poucos quilômetros da faixa de areia.

Para o GNSS-MR, utiliza-se os padrões de interferência das ondas, através do SNR, para obter a altura da superfície do mar (LARSON; LÖFGREN; HAAS, 2013). O princípio de funcionamento é a superposição coerente das ondas refletidas e diretas que exibem interferências construtivas e destrutivas. A Figura 5 ilustra o efeito da interferência construtiva e destrutiva nas ondas de rádio. Conceitualmente, é possível separar o processo de reflexão em duas contribuições: o termo especular (coerente) e o componente difuso (não coerente), como mostra a Figura 6. O modo de reflectometria de caminhos múltiplos se baseia na coerência das reflexões (NIEVINSKI, 2013).

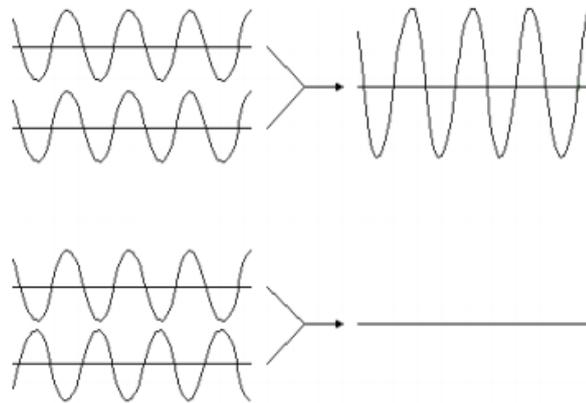


Figura 5 - Interferência construtiva (acima) e destrutiva (abaixo)

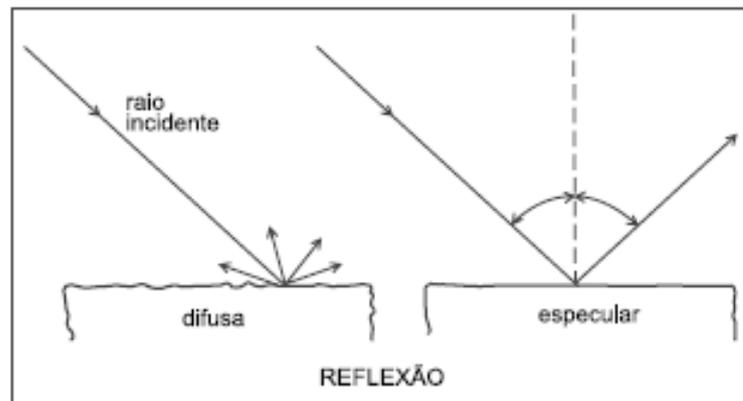


Figura 6 - Reflexão difusa (superfície rugosa) e especular (superfície lisa)

Nievinski e Larson (2014b) descrevem um simulador de código aberto para obtenção de relação sinal-ruído, da fase da onda portadora e de observáveis de pseudodistância a partir das frequências L1 e L2 e nas modulações C/A, P e L2C. Para interpretar o sinal recebido pela antena, de forma a convertê-lo em informações sobre variáveis ambientais, necessita-se correlacionar as observáveis com as características do ambiente de reflexão, assim como da antena e do receptor GNSS (NIEVINSKI; LARSON, 2014b).

2.4.1 Área de cobertura em GNSS-MR

A Figura 7 mostra a representação dos pontos de reflexão, em cada faixa de satélite rastreada, para um receptor localizado no hemisfério norte. Larson e Nievinski (2013) distinguiram os satélites por cores, e os números centrais representam a elevação dos satélites. Ou seja, quanto menor for a elevação do satélite, mais distante da antena estará o ponto de reflexão.

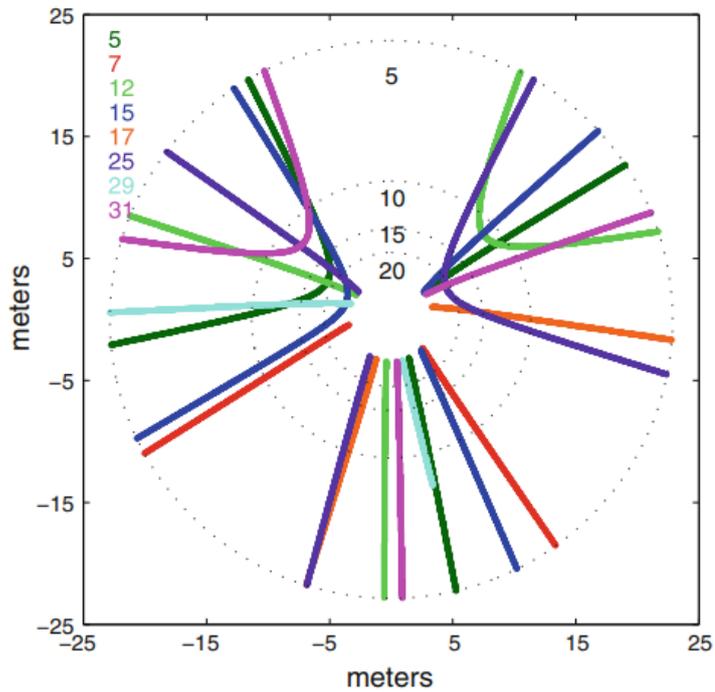


Figura 7 - Pontos de reflexão de multicaminho

Fonte: (LARSON; NIEVINSKI, 2013).

Para fins de planejamento, é possível prever em GNSS-MR a distância horizontal da antena ao ponto de reflexão, considerando a reflexão especular, ou seja, apenas parte coerente. Com base em elementos geométricos, usa-se um valor de altura entre a superfície e a antena (H), que pode ser arbitrário ou suposto com base nas possibilidades de instalação da estação, juntamente com a elevação do satélite (e) em determinada posição (Figura 8), conforme resume a equação (1).

$$D = \frac{H}{\tan(e)} \quad (1)$$

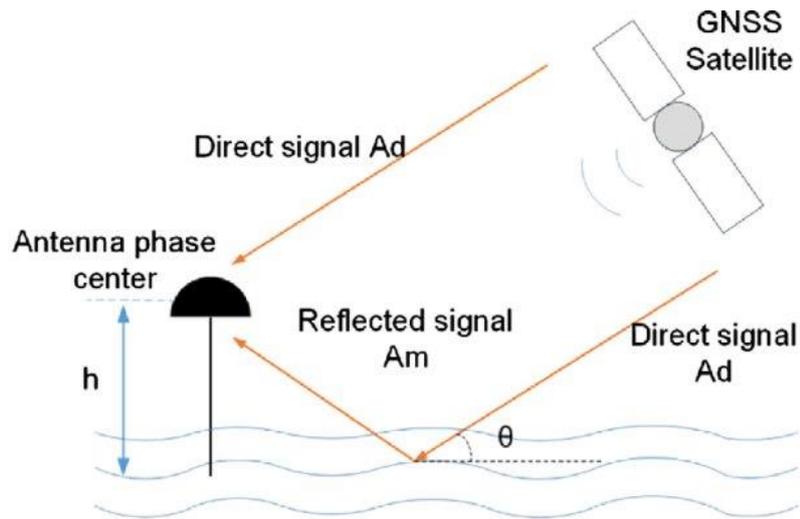


Figura 8 - Recepção dos sinais direto e refletido, sendo: a elevação do satélite e h a altura da antena.

Na reflexão especular, existem áreas na superfície do refletor que contribuem mais para o sinal refletido. As regiões de espalhamento ativas ficam no entorno do ponto de reflexão especular e são chamadas de zonas de Fresnel (ZIMMERMANN *et al.*, 2018). Estes locais nada mais são do que a interseção dos elipsoides de Fresnel, definidos no entorno do raio ótico, com a superfície do refletor. O conceito está descrito na Figura 9, onde sabe-se que o elipsóide de Fresnel de primeira ordem define a região onde a maior parte da energia é transmitida. No caso de um refletor horizontal, o tamanho e a forma dependem do ângulo de elevação do satélite, do comprimento de onda da onda eletromagnética portadora e da distância vertical h entre a antena e o refletor.

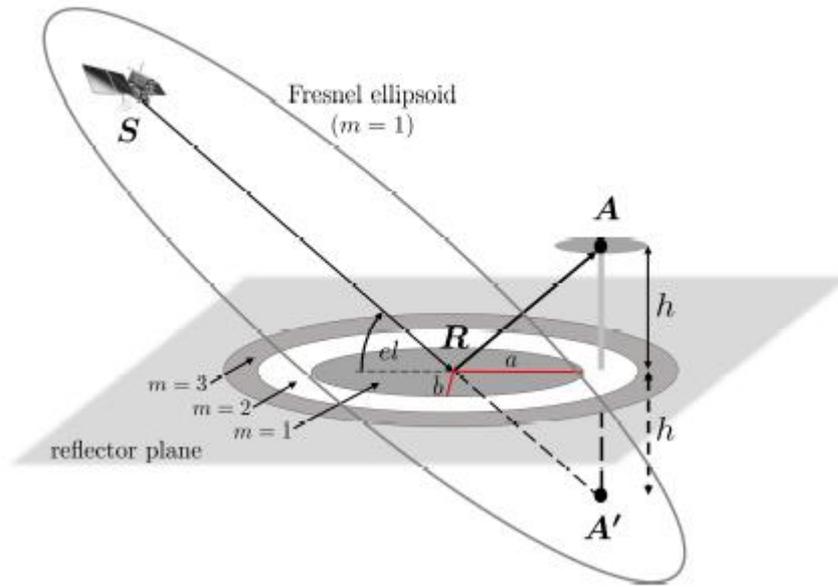


Figura 9 - Conceito de Zonas de Fresnel aplicado em refletometria

Fonte: (ZIMMERMANN *et al.*, 2018)

A representação da Primeira Zona de Fresnel, para um receptor terrestre, pode ser calculada a partir de $n = 1$ indicando a primeira zona de Fresnel (FFZ), λ para comprimento de onda, h para altura da antena, e para o ângulo de elevação de satélite e a para azimute. Assim, percebe-se comparando as eq.(1) e (3) que o ponto de reflexão correspondente à zona de Fresnel de ordem zero, $n = 0$. As dimensões da FFZ são demonstradas nas equações de (2) a (9) (LARSON; NIEVINSKI, 2013):

$$d = \frac{n\lambda}{2} \quad (2)$$

$$R = \frac{h}{\tan(e)} + \frac{\left(\frac{d}{\sin(e)}\right)}{\tan(e)} \quad (3)$$

$$B = \left(\frac{2dh}{\sin(e)} + \left(\frac{d}{\sin(e)}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$A = \frac{B}{\sin(e)} \quad (5)$$

O perímetro da zona pode ser discretizado em função do ângulo interno $\theta \in [0, 2\pi]$

$$x' = A \cos(\theta) + R \quad (6)$$

$$y' = B \sin(\theta) \quad (7)$$

Por fim, o semi-eixo maior é alinhado com o azimute do satélite:

$$x = \sin(a) x' - \cos(a) y'$$

(15)

$$y = \sin(a) y' + \cos(a) x' \quad (8)$$

Assim, a zona de cobertura alcançada em GNSS-MR pode ser planejada em termos de pontos espaciais e das primeiras zonas de Fresnel, embora a área detectada não esteja exatamente confinada a esses pontos e áreas (GEREMIA-NIEVINSKI *et al.*, 2016). Na Figura 10 têm-se ângulos de elevação entre 7 e 25 graus, que possuem um alcance de até 40 metros.

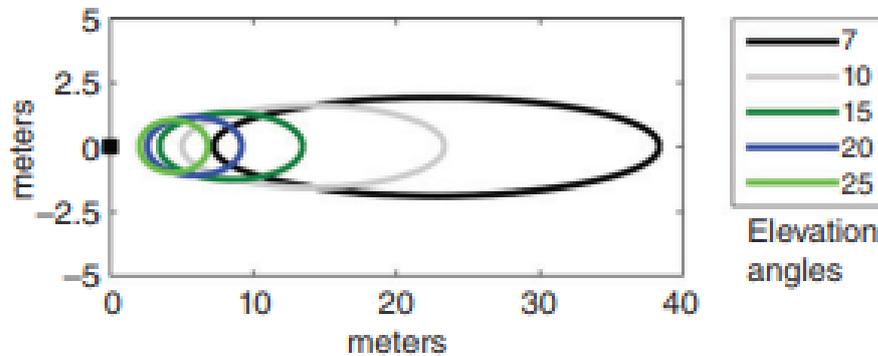


Figura 10 - Zonas de Fresnel de um satélite para diversos ângulos de elevação

Fonte: Larson (2016)

2.4.2 Observáveis em GNSS-MR

As ondas de rádio emitidas pelos satélites, de forma direta ou refletida, são recebidas simultaneamente pelo receptor. A sobreposição destas ondas causa interferências, ora destrutivas ora construtivas, devido à diferença de fase entre elas, e estas formam franjas de oscilação que podem ser descritas em função da observável relação sinal/ruído (SNR). A tendência de SNR decorre do ganho, enquanto as franjas resultam da interferência entre sinais diretos e coerentemente refletidos (NIEVINSKI, 2013).

A observável SNR, que possui um comportamento característico, pode ser considerada para entender como os sinais diretos e refletidos entram e saem de fase. Quando os valores pontuais de SNR são considerados ao longo de um intervalo maior de tempo, é possível obter um padrão de interferência oscilatório de acordo com a elevação do satélite, como o mostrado na Figura 11. A potência relaciona-se diretamente com o SNR, visto que o modelo teórico é expresso na equação (9), conforme Nievinski e Larson (2014c):

$$\text{SNR} = \frac{P_s}{P_n} \quad (9)$$

O numerador corresponde à potência do sinal composto, conforme será apresentado na equação 11. Já o denominador é tido como a potência do ruído e atribuído a uma constante. O valor está diretamente associado a valores nominais para a densidade espectral de potência do ruído e a largura da banda do ruído (NIEVINSKI; LARSON, 2014d).

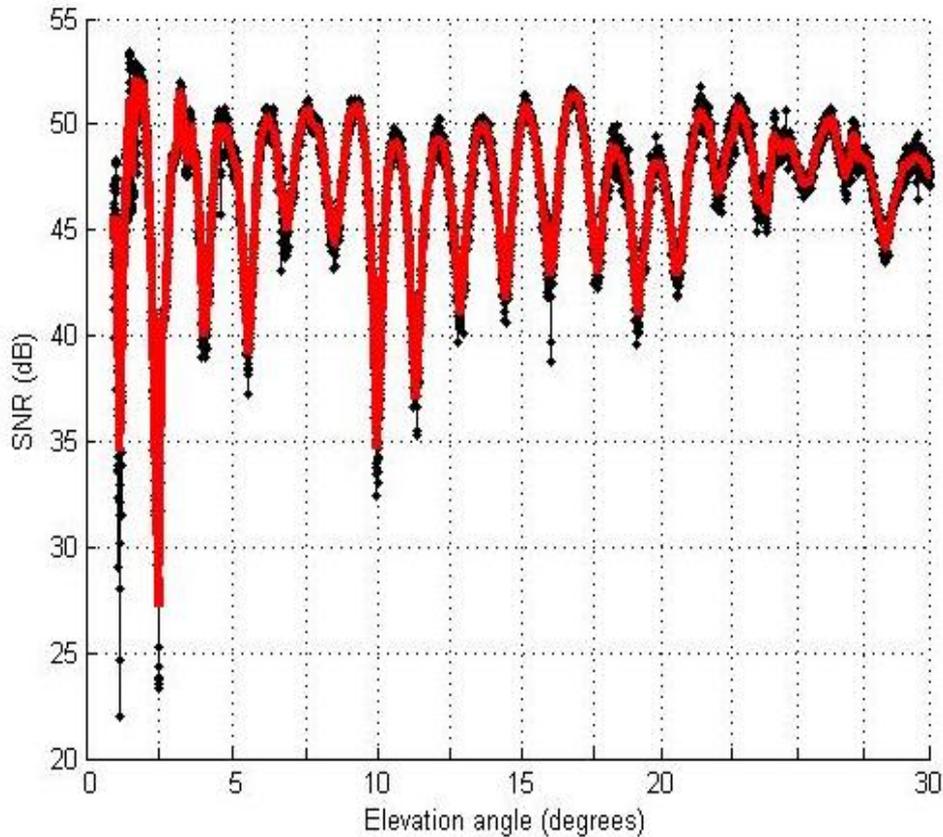


Figura 11 - Representação do SNR em função da elevação. Em preto tem-se o dado bruto, e em vermelho a modelagem.

No modelo teórico, a parcela P_s corresponde à relação da potência (P) dos sinais direto (P_d) e refletido (P_r) com a diferença de fase entre os sinais refletido e direto (ϕ_i).

$$P_s = P_d + P_r + 2\sqrt{P_d}\sqrt{P_r} \cos\phi_i \quad (10)$$

$$\phi_i = \phi_r - \phi_d \quad (11)$$

Os dados de SNR são dominados por variações de longo prazo devido à distância receptor - satélite e o padrão de ganho da antena (LARSON *et al.*, 2013). Através deste padrão calcula-se a altura da superfície do mar em GNSS-MR, que é a proposta utilizada na metodologia deste

trabalho. A amplitude de oscilação $2\sqrt{P_d}\sqrt{P_r}$ é amortecida, variável e dependente da elevação. A amplitude da modulação diminui conforme o satélite sobe e seu ângulo de elevação aumenta. Isto se deve, principalmente, ao padrão de ganho da antena que suprime multicaminhos em ângulos de elevação mais altos (LARSON; NIEVINSKI, 2013).

Em função das características da onda, o valor pontual da fase interferométrica pode ser expresso conforme a equação (12):

$$\phi_i \approx k d \quad (12)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (13)$$

$$d = 2H\text{sen}(e) \quad (14)$$

onde H é a altura da antena acima da superfície refletora e e é o ângulo de elevação do satélite com respeito ao horizonte. A constante k , chamada de número-de-onda, por sua vez depende do comprimento de onda λ (13) (NIEVINSKI; LARSON, 2014a). Para uma superfície plana e horizontal, o modelo de multicaminho de GNSS é simples. O efeito do multicaminho é impulsionado pelo atraso de propagação instantânea d de uma reflexão em relação ao caminho direto (NIEVINSKI; LARSON, 2014a). Mais detalhes são apresentados na seção 3.3.1.1.

2.4.3 Estimação altimétrica em GNSS-MR

Como o multicaminho envolve a distância entre a antena e a superfície refletora, os níveis mais altos de água produzem as menores alturas do refletor e as menores frequências de modulação (LARSON *et al.*, 2013). A Figura 12 corresponde à estação de Kachemak Bay. A imagem central representa graficamente a resposta do SNR em função do ângulo de elevação, para três diferentes alturas entre a água e o equipamento.

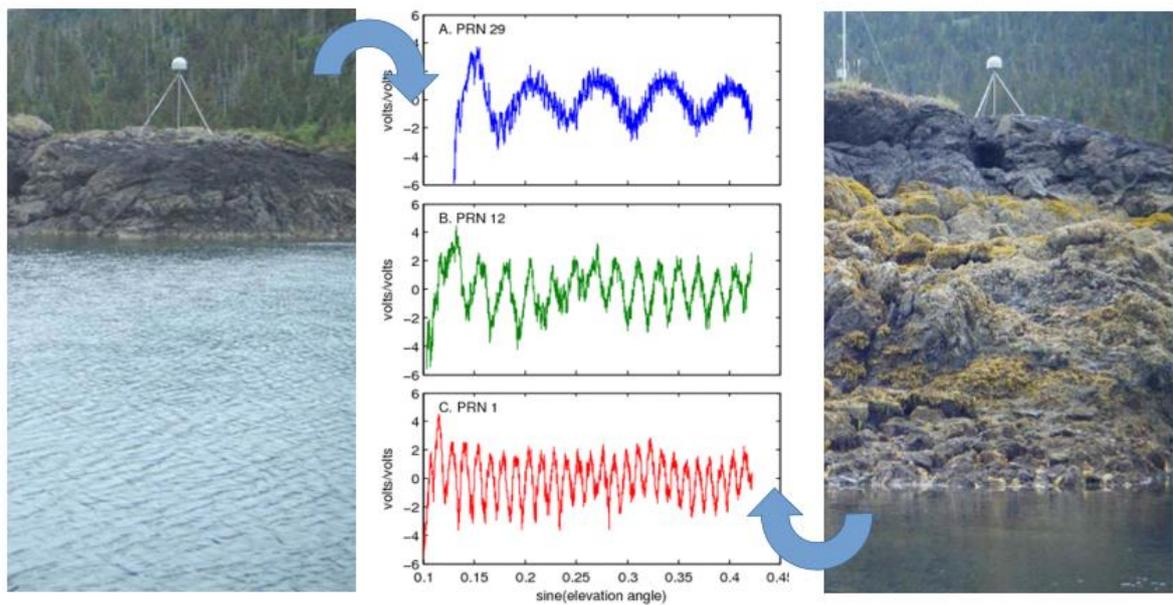


Figura 12 - Estação PBAY mais próxima (direita) e mais afastada da água (esquerda)

Fonte: (LARSON *et al.*, 2013).

Diferentes países possuem estações de monitoramento da crosta que vêm sendo utilizadas para refletometria. A estação de Kachemak Bay, por exemplo, foi instalada com o intuito de monitorar deformações da crosta (LARSON *et al.*, 2013), entretanto passou-se a avaliar a possibilidade de monitoramento do nível do mar utilizando refletometria GNSS. A partir de resultados promissores passou-se a considerar o uso deste receptor geodésico para uma segunda aplicabilidade. Dentre outras estações citam-se as de Onsala (Suécia) e Friday Harbor (EUA) (LARSON; RAY; WILLIAMS, 2017). A Figura 13 mostra a estação localizada em Friday Harbor.



Figura 13 - Estação de Friday Harbor

Fonte: (LARSON; RAY; WILLIAMS, 2017).

De forma manual, pode-se obter a estimacão da altura visualmente, a partir da diferença de fase, do seno da elevacão e do comprimento da onda portadora, conforme mostrado em (15).

$$H = \frac{\Delta\phi}{2\pi} * \frac{\lambda}{\Delta \text{sen}(e)} = \frac{\lambda}{2} * \frac{\text{numero de ciclos}}{\Delta \text{sen}(e)} \quad (15)$$

Por exemplo, para a Figura 11, há 8,5 ciclos entre elevaces 15 e 25 graus. Portanto, resultando em uma altura de 3,75 m. Este consiste em um cálculo aproximado, visto que a contagem dos ciclos de forma manual  inviável.

$$H = \frac{8,5}{\text{sen}(15) - \text{sen}(25)} * \left(\frac{0,19}{2}\right) = 3,75 \text{ m}$$

A frequência, a fase e a amplitude das modulaes de multicaminho são causadas por uma variedade de fatores, incluindo a composio, a geometria e a rugosidade da superfície de reflexão. Há duas formas de automatizar as análises de SNR, sendo estas através do uso de inversão, como em Nievinski e Larson (2014c, 2014d), ou por análise espectral. A inversão foi utilizada nas análises dos dados deste trabalho e será mostrada nos resultados. Já a análise espectral é usualmente realizada em softwares interativos, através de funes que envolvem cálculos de transformadas de Fourier. O periodograma de *Lomb-Scargle*  uma ferramenta estatística comumente usada para detectar sinais periódicos em observaes com espaçamento desigual. A Figura 14 ilustra as reflexões e a representao do comportamento espectral do

SNR por análise espectral. É possível notar à esquerda diferentes curvas senoidais amortecidas, cuja frequência diminui da curva vermelha para a preta e a azul. Já no gráfico da direita, observa-se que a altura do refletor é determinada através do pico do espectro. Quanto maior for a altura do refletor, maior será a frequência do comportamento senoidal.

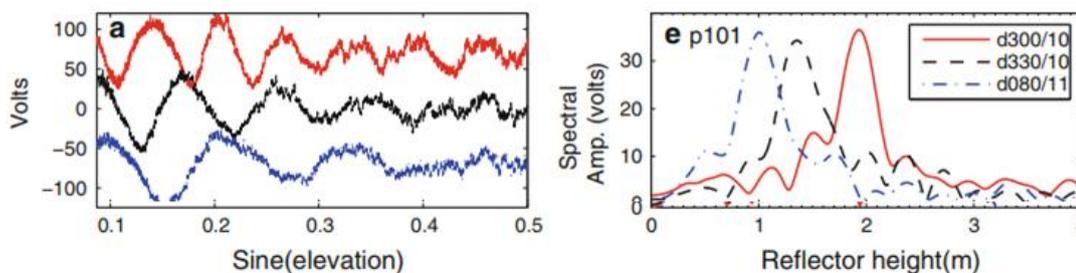


Figura 14 - Exemplo de representação das reflexões (esquerda) e representação do comportamento espectral do SNR (direita)

Fonte: (LARSON; NIEVINSKI, 2013).

Há algumas ferramentas voltadas a trabalhar com GNSS-MR, onde é possível compreender visualmente a reflexão do sinal em termos de SNR (ROESLER; LARSON, 2018a). Nievinski e Larson (2014c, 2014d) apresentaram os modelos matemáticos envolvidos na estimativa altimétrica da neve utilizando GNSS-MR. Uma modelagem inversa de refletometria por multicaminho com GPS foi apresentada e resultados de simulações foram inseridos. Utilizou-se a informação do comportamento característico do SNR, para entender como os sinais diretos e refletidos entram e saem de fase. A partir do padrão gerado pelas franjas de interferência, foi possível recuperar as características da superfície de alcance (NIEVINSKI; LARSON, 2014d, 2014e).

O conjunto de códigos executa automaticamente a inversão a partir de parâmetros de entrada como características do equipamento GNSS e coordenadas aproximadas da localização da antena (NIEVINSKI e LARSON (2014c, 2014d)). Estima-se também um valor inicial para altura da antena, que é diretamente proporcional ao valor resultante da inversão. Os resultados observados pelos autores para superfícies de alpinas, pastagens e florestais foram muito promissores, apresentando erros em entre 6 e 8cm.

2.4.3 Demonstrações anteriores

Larson *et al.*, (2013) apresenta resultados de observações para medição do nível do mar de um ano obtidas na Estação Peterson Bay (PBAY), localizada em uma pequena ilha no Alasca. Os resultados mostraram que é possível medir com precisão o nível usando receptores

geodésicos. No entanto, esses equipamentos são caros e requerem uma estrutura específica para sua fixação. Outro artigo analisa dados da Friday Harbor Station, denominada SC02. O intervalo de dados de dez anos é comparado aos dados da maré do Aquatrek, próximos à localização da estação GPS (LARSON; RAY; WILLIAMS, 2017). O estudo de Larson *et al.* (2013) aborda medições com equipamento geodésico durante o período de um ano. Os resultados foram comparados às observações de um marégrafo, localizado a 30 km de distância, e resultaram em valores discrepantes em menos de 2%. Parte da diferença pode ser explicada pelas variações que o mar sofre neste distanciamento, o que permite considerar o resultado da técnica promissor para a aplicação. Os autores reforçam em suas conclusões que, ao aplicar essa técnica, a árdua tarefa de vincular as medidas do mar a um referencial terrestre bem definido torna-se instantânea. Mas ainda precisa de aprimoramentos para obter a precisão de um medidor convencional.

2.4.4 Hardware para GNSS-MR

Os estudos mais difundidos em GNSS-R para medir o nível do mar utilizaram receptores geodésicos (LARSON *et al.*, 2013; LARSON, 2016; LARSON; LÖFGREN; HAAS, 2013; LARSON; RAY; WILLIAMS, 2017; LÖFGREN *et al.*, 2011; LÖFGREN; HAAS; SCHERNECK, 2014; SANTAMARÍA-GÓMEZ *et al.*, 2015). Infelizmente, esses dispositivos possuem alto custo, o que limita o uso mais amplo do GNSS-R para monitoramento ambiental. Aqui, revisamos os hardwares e o softwares desenvolvidos para o GNSS-R baseado em SNR, com foco em alternativas de código aberto e de baixo custo. Os sensores GNSS de baixo custo são vantajosos quando comparados aos instrumentos GNSS geodésicos, pois possuem antenas com menos capacidade para suprimir multicaminho. No entanto, os componentes eletrônicos dos receptores geodésicos GNSS são resistentes e duradouros (ROVER; VITTI, 2019)), algo pouco avaliado por campanhas de curto prazo em sensores experimentais.

Uma das alternativas pioneiras de hardware para o GNSS-R baseado em SNR foi desenvolvido por (RODRIGUEZ-ALVAREZ *et al.*, 2011), que chamaram seu dispositivo de “Observações do IPT da umidade do solo na banda L” (SMIGOL). Embora desenvolvido originalmente para monitorar a umidade do solo e outras variáveis terrestres, o SMIGOL também foi demonstrado para a detecção do nível da água em um reservatório (Rodriguez-Alvarez *et al.* 2011b) e posteriormente para o nível do mar (ALONSO-ARROYO *et al.*, 2015). Embora o SMIGOL tenha tido grande sucesso no uso pretendido e seus componentes tenham

baixo custo, sua fabricação personalizada parece trabalhosa e o código incorporado não está disponível ao público, o que infelizmente dificulta sua reprodução por outros pesquisadores.

Outra alternativa de hardware de baixo custo para o GNSS-R baseado em SNR foi denominada "Receptor Autônomo de Profundidade de Neve" (FROS-D), desenvolvido por Adams *et al.* (2013) com base em protótipos de, e para uso por, Chen; Won; Akos (2017b). A aplicação pretendida era a medição da profundidade da neve, que é um tipo de altimetria, de modo que o dispositivo provavelmente seria igualmente aplicável à medição do nível do mar. O custo do sistema, incluindo fonte de alimentação autônoma e estrutura de suporte, foi de US \$ 1200, que é mais baixo do que os dispositivos comerciais comparáveis. Infelizmente, o FROS-D teve o mesmo destino que o SMIGOL: uso bem-sucedido pelos desenvolvedores, mas pouca reprodutibilidade por pesquisadores externos.

Deve-se observar que a antena projetada e fabricada por Chen (2016) também foi usada com um receptor definido por software (SDR) personalizado para aplicativos GNSS-R (CHEN; WON; AKOS, 2014). Outros SDR de código aberto foram usados para GNSS-R por Lestarquit *et al.* (2016) e por Hobiger; Haas; Lofgren (2016), deve-se mencionar que essas aplicações não são instâncias do GNSS-IR / IPT, nem mesmo do GNSS-MR mais geral, devido à maneira como as reflexões são rastreadas. O SDR é altamente versátil, portanto, especialmente útil para prototipagem, mas ainda não é muito prático para aplicações em campo; isso ocorre porque é necessário armazenar conjuntos de dados extremamente grandes para pós-processamento ou exigir maior consumo de energia no processamento em tempo real.

Outros esforços relacionados são os de Rodrigues e Kasser (2014), que usavam equipamentos de baixo custo (receptor u-blox LEA-6T e antena Tallysman TW3430) para rastrear o sinal GPS L1 C / A. Embora seja uma instância do GNSS-R para a altimetria do nível da água, não é uma instância do GNSS-IR / IPT, pois eles se basearam em observáveis da fase portadora em vez de SNR. As principais desvantagens são a necessidade de um segundo receptor que sirva de estação base (no caso de Rodrigues e Kasser (2014), foi utilizado um receptor comercial a 3 km de distância) e a vulnerabilidade à incoerência das reflexões devido à rugosidade da superfície.

Agora, voltando-se para o software, as opções de código aberto incluem o WAVPY (FABRA *et al.*, 2017), uma biblioteca orientada a objetos desenvolvida na linguagem Python para simulações no GNSS-R. Embora vise observáveis mais avançados (como Delay-Doppler-Map), presumivelmente poderia ser usado para simular SNR também. Nievinski e Larson (2014c) desenvolveram um simulador GNSS-R de código aberto no Matlab / Octave capaz de

fornecer SNR, fase portadora e pseudodistância sob condições de recepção de multicaminho. A ferramenta permite investigar o comportamento das observações em um cenário especificado pelo usuário, útil para planejamento. Um pacote de software de código aberto desenvolvido em Matlab para o processamento de medições de SNR foi descrito por Roesler e Larson (2018b), incluindo a tradução de arquivos RINEX, mapeamento de zonas de reflexão e estimativa de altura do refletor. Ele permite que pesquisadores interessados em conhecer o GNSS-R baseado em SNR iniciem sem implementar códigos do zero.

Rover e Vitti (2019) realizaram três campanhas curtas, aproximadamente 90min, para medir a altura da neve. O objetivo foi testar a funcionalidade de um sensor experimental composto por um receptor u-blox NEO-M8T e dois tipos de antenas, u-blox ANN-MS e Tallysman TW4721. Eles também reforçam a vantagem de usar sensores de baixo custo para monitorar fenômenos com maior distribuição espacial. Trabalhos como o desenvolvido por Rover e Vitti (2019) incentivam o desenvolvimento de instrumentos de baixo custo para aplicações GNSS-R. Estimulados por investigações semelhantes, buscamos desenvolver um sensor capaz de monitorar continuamente, cujos resultados podem descartar a perda de precisão devido à limitação de tempo de aquisição.

Recentemente, a pesquisa de Strandberg e Haas (2020) focou em avaliar a viabilidade de medir o nível da água com um dispositivo móvel, o Samsung Galaxy Tab A (2019) 10.1 4G, envolvendo o uso de sinais rastreados na frequência L1 do GPS. Esses dispositivos não foram desenvolvidos para uso exclusivo como sensor de recepção e gravação de sinais provenientes de satélites GNSS, mas possuem antenas conectadas que permitem o rastreamento de ondas de rádio emitidas por determinados sistemas. O baixo custo envolvido, tanto o valor do dispositivo quanto a disponibilidade do software de aquisição, tornaram a iniciativa propícia aos aplicativos de altimetria GNSS-R. No entanto, na prática, os autores relataram que o período de medição do sistema foi de 36 h devido a limitações do sistema operacional.

3. METODOLOGIA

As principais etapas da metodologia são apresentadas no fluxograma da Figura 15 e envolvem a montagem preliminar do sensor GNSS-R, os testes com hardware e software, campanhas temporárias, validação preliminar, instalação da estação refletométrica experimental de baixo custo, aquisição da série temporal através da técnica de GNSS-R, Obtenção da série temporal do linígrafo, análise dos dados e validação.

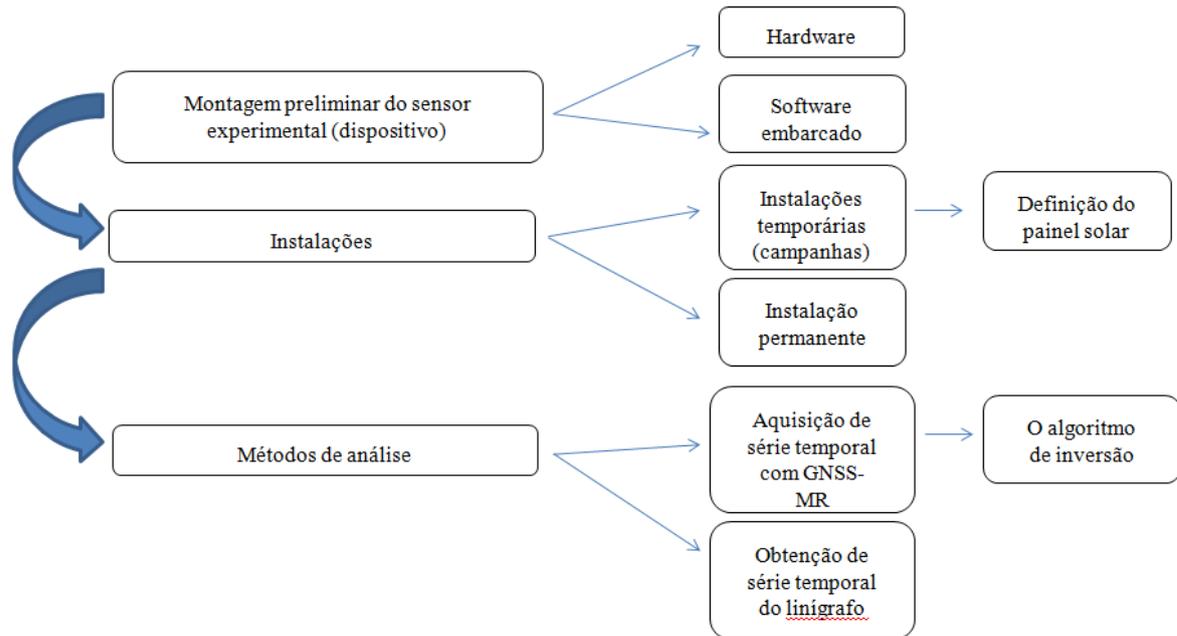


Figura 15 - Fluxograma das principais etapas da metodologia

3.1 Dispositivo

Como não há necessidade de medições em fase de portadora nem em pseudodistância, é possível alavancar receptores GNSS mais simples, que produzem apenas SNR. Este fato contrasta com o equipamento profissional, geodésico, capaz de gerar o formato RINEX de dados brutos. Já para o propósito em questão, o formato NMEA é suficiente. Outro aspecto facilitador é o fato de que o atraso de propagação, entre reflexão e ondas diretas, não é afetado pelo padrão de ganho da antena. Abaixo, descreve-se primeiro os componentes; posteriormente, na segunda parte da metodologia, falar-se-á a respeito do software.

3.1.1 Hardware

Os principais componentes eletrônicos utilizados foram baseados na plataforma Arduino fabricada pela empresa Adafruit e são Feather Adalogger, GPS FeatherWing e antena externa. Todos estão representados respectivamente nas figuras Figura 16, Figura 17 e Figura 18. O

Adafruit Feather Adalogger contém núcleos microcontroladores portáteis, um USB embutido e carregamento de bateria, além de suporte para micro cartão SD. O GPS FeatherWing contém o módulo GPS que se conecta diretamente à placa Feather e contém um sistema de posicionamento sensível e de baixo consumo. A antena externa receberá a onda de rádio dos satélites e, portanto, deve ficar o mais livre possível de obstruções. Esta se conecta ao FeatherWing, que a identifica automaticamente utilizando-a para rastreamento.

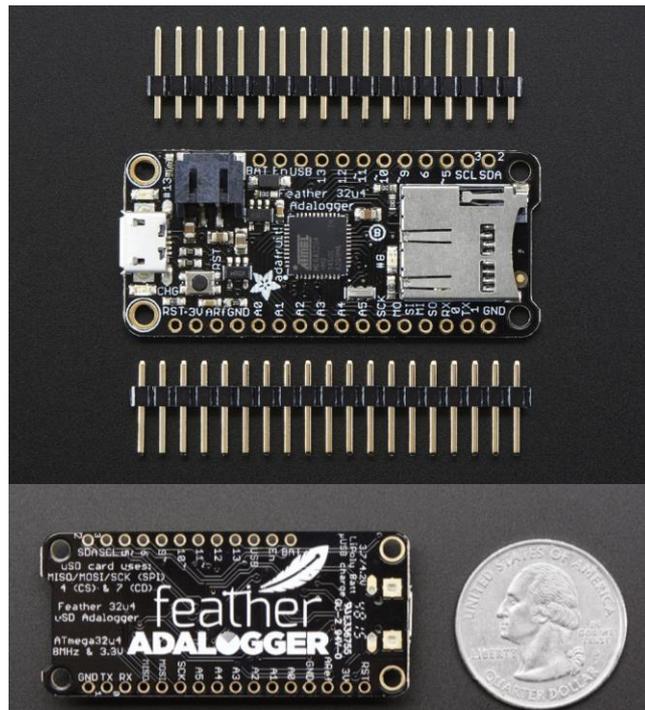


Figura 16 - Feather Adalogger

Fonte: Adafruit

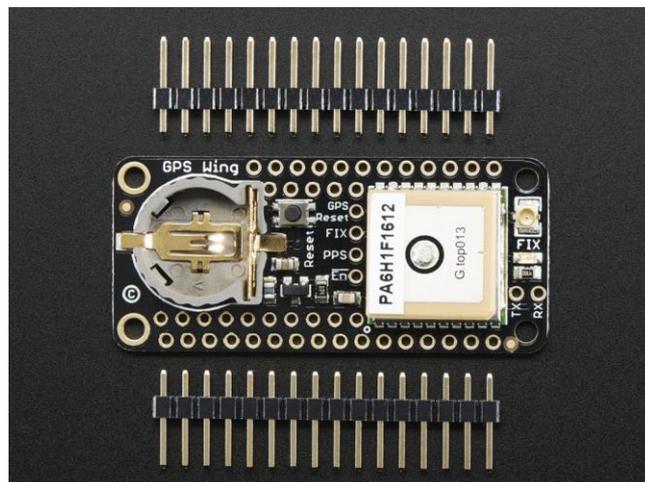


Figura 17 - GPS FeatherWing

Fonte: Adafruit



Figura 18 - Antena externa

Fonte: Adafruit

Os componentes do sistema de alimentação solar consistem no painel solar, sistema de carregamento, bateria e termostato, conforme mostram as figuras Figura 19, Figura 20, Figura 21, e Figura 22. Existem painéis solares de diversos tamanhos; na seção Resultados, será apresentado, dentre os três tamanhos testados, qual apresentou o resultado mais satisfatório. O painel deve ser posicionado para a direção norte com a inclinação igual ao valor de latitude. Para Porto Alegre, na região sul do Brasil, cuja latitude é aproximadamente trinta graus negativos, o painel foi orientado para norte com -30° de inclinação.



Figura 19 - Painel solar

Fonte: Adafruit



Figura 20 - Bateria

Fonte: Adafruit

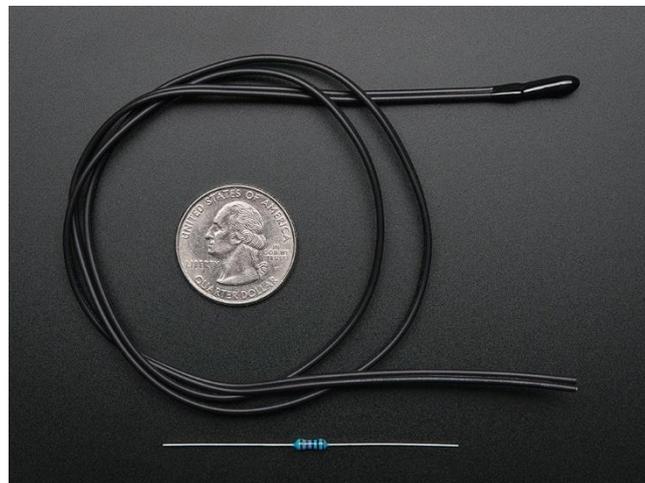


Figura 21 - Termostato

Fonte: Adafruit

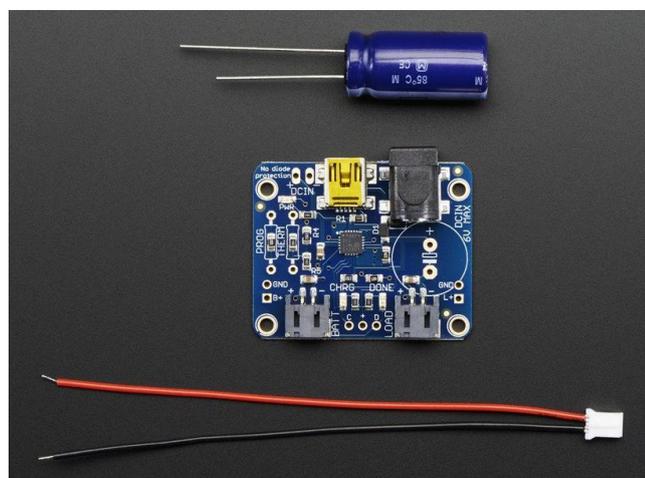


Figura 22 - Sistema de carregamento

Fonte: Adafruit

A estrutura mecânica contou com uma base de aço galvanizado, que foi encontrada em uma loja de antenas externas. Esta pareceu adequada por ser de fácil transporte e fixação, possibilitando uma prática instalação do experimento. A estrutura mecânica conta com a base, optando-se por incluir um mastro de madeira fixado com parafusos. Embora a madeira pareça menos resistente que um mastro de alumínio, a mesma é suficiente para uma instalação em um local não muito ventoso, e resulta em menor opacidade eletromagnética no sinal recebido.

O suporte do painel solar foi montado a partir de uma chapa de metal lisa. A elaboração foi simples, utilizando furadeira para gerar as aberturas na superfície e encaixar o painel solar. Utilizou-se a dobradeira da oficina da universidade para deixar a chapa no ângulo de interesse. Utilizou-se para guardar os componentes uma caixa hermética de metal. A mesma precisou ser furada para a passagem dos fios e adaptada internamente para garantir que os componentes do dispositivo não se encostassem às paredes.

O custo do equipamento consiste no valor do hardware e seus componentes, acrescido do valor do suporte, mastro e outros acessórios necessários para a instalação. No Apêndice B – Orçamento do hardware - pode-se verificar todos os itens e seus valores. O custo médio para elaboração do dispositivo foi de US\$ 215.85. O valor médio de gastos do suporte, mastro e acessórios, ficou em torno de US\$ 34.50.

3.1.2 Software

Esta etapa representa um trabalho de equipe do grupo de pesquisa em GNSS-R. O firmware é o conjunto de instruções operacionais que são programadas diretamente no hardware. O ambiente de desenvolvimento integrado é executado em um computador cuja programação, conhecida como *sketch*, é transferida para a placa de prototipagem através do *upload*. O *sketch* desenvolvido informa à placa o que deve ser executado durante o seu funcionamento. Para o dispositivo desenvolvido utilizou-se um *sketch* para comunicar a placa acessória GPS FeatherWing com a placa principal Feather Adalogger. A Figura 23 mostra parte dos códigos no ambiente de desenvolvimento. Os códigos estão disponíveis para download na página do projeto.

```

Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda
v2.2.7_sketch_20181107
309     return measuredvbat;
310 }
311
312
313 // called in between loops, every time a new character appears at GPSSerial
314 void GPSSerialEvent()
315 {
316     char c = GPSSerial.read();
317
318     // store the character in the buffer
319     GPSSBuffer += c;
320
321     // restart the idle timer count
322     bufferTime = millis();
323 }
324
325
326 // configure the GPS settings
327 void configGPS(void)
328 {
329     //GPSSerial.begin(GPS_BAUD_RATE);
330     configGPSBaudRate();
331
332     switch (GPS_UPDATE_INTERVAL)
333     {
334         case 100:
335             //PMWX_SET_NMEA_UPDATE_10HZ
336             GPSSerial.println(F("GPMWX220,100*2\r\n"));
337             break;

```

Figura 23 - Ambiente de desenvolvimento

Em sua configuração atual, o dispositivo gera arquivos no formato NMEA. Estes são compostos por blocos de dados, cada um correspondente a um grupo de observação que é registrada no intervalo de tempo de 1 s. Os arquivos são salvos por dia, cujo nome é ordenado sequencialmente pelos dois últimos dígitos do ano, seguidos do número correspondente ao mês e, por último, o dia. A Figura 24 apresenta em parte um arquivo no formato NMEA.

Hora - UTC

HH:MM:SS:sss

```

$GPGGA,175430.594,3001.9912,S,05113.3898,W,1,6,1.43,44.6,M,4.5,M,,*55
$GPGSV,4,1,13,13,74,275,,17,65,056,35.9,19,57,026,37.6,28,44,147,50.3*6A
$GPGSV,4,2,13,15,37,237,40.5,30,32,087,45.0,24,09,236,30.6,05,08,321,*68
$GPGSV,4,3,13,12,07,293,,11,05,136,,07,04,072,35.1,06,04,026,*68
$GPGSV,4,4,13,01,03,122,*48
$GPRMC,175430.594,A,3001.9912,S,05113.3898,W,0.01,0.00,220819,,A*61

```



Figura 24 - Arquivo no formato NMEA

Os códigos informam a posição, HDOP, DOPs, informações referentes aos satélites, posição, velocidade e tempo. Estes dados são divididos sequencialmente em linhas, onde cada uma contém um código inicial (\$GPGGA, \$GPGSV e \$GPRMC). O *sketch* consiste na verificação da validade da sentença NMEA. Caso seja válida, obtém-se a data e hora para criar e salvar no arquivo. Caso não seja, os dados ficam salvos opcionalmente em um arquivo *default*.

Funções foram desenvolvidas para armazenar os dados e gravar no cartão de memória. O código fica em um laço infinito em uma função chamada "loop()". O dado NMEA em si é recebido caractere por caractere, cujo recebimento é feito pela função "GPSSerialEvent", que roda automaticamente por interrupção. Após o recebimento, esta os armazena no buffer. Completa-se então o ciclo até obter-se a sentença inteira.

Logo no início da função *loop* este código verifica se o tempo da última leitura GPS feita foi a mais de 10 milissegundos, indicando que o GPS finalizou a transmissão dos dados para o módulo principal. Verifica-se se o número de caracteres armazenados no buffer, local onde ficam pré-armazenados os dados do NMEA, é maior que três. Se qualquer uma das condições for verdadeira, haverá mais um avanço no código.

Somente haverá continuidade nas etapas quando são extraídas do sinal NMEA as informações de data e hora, o que é feito com o uso da função "getDateTime". Ou seja, só é possível quando a sentença está completa.. O próximo passo consiste na extração do nome de arquivo a ser criado, que é feito na função "getBasename". Lá a data e hora obtidas anteriormente na função "getDateTime" são organizadas de forma a ser criado o nome do arquivo em que vai ser salvo.

Depois de obtido o nome, é utilizada a função "datalog". Esta se incumbem de salvar o dado NMEA obtido no arquivo correspondente em cartão de memória SD. Após, são feitas algumas rotinas para monitoramento do circuito: obter tensão da bateria, função "vbatlog", número de blocos por arquivo e tempo demandado para a escrita no cartão de memória.

Por fim, há outro software, executado fora do sensor, que faz a leitura e decodificação dos dados NMEA para processamento em Matlab.

3.2 Instalações

Diversas instalações foram necessárias para validação do equipamento experimental. Inicialmente realizaram-se instalações temporárias com o objetivo de avaliar o desempenho do dispositivo, a gravação dos dados em cartão de memória e o comportamento do SNR. Após a

validação preliminar partiu-se para uma instalação permanente, onde se objetivou monitorar o objeto de estudo pelo maior tempo possível e obter a série temporal.

3.2.1 Testes em laboratório

O sensor foi primeiramente testado no terraço do laboratório em que foi desenvolvido, para ter respostas quanto ao funcionamento do painel solar e também das vedações. Da posse de painéis solares de três tamanhos distintos (de 3,5 W, 6 W e 9 W), realizamos tentativas para verificar qual seria mais adequado, mantendo o GPS ligado com o menor consumo. Para tanto, o dispositivo foi programado para salvar arquivos no formato .BAT que mostram o consumo da energia ao longo do dia. Para detalhes do sistema de alimentação verificar o Apêndice C – Sistema de energia.

3.2.2 Instalações temporárias

A versão preliminar do protótipo foi testada em quatro campanhas ao longo do ano de 2018, sendo elas em Porto Alegre, Imbituba (SC) e Tramandaí (RS). O objetivo de escolher estas três cidades foi devido à presença de marégrafos ou linígrafos, para futura comparação de resultados. Conforme discutido anteriormente, em Porto Alegre há linígrafo da SEMA e em Imbituba há marégrafo do IBGE; já na plataforma de Tramandaí há um marégrafo instalado pela Furg, compondo o Sistema de Monitoramento da Costa (SIMCosta).

Primeiramente, no dia 9 do mês de março, foi realizado o rastreamento com o sensor GNSS-R próximo ao Cais Mauá, em Porto Alegre. O intuito foi medir o nível da água em um turno, e comparar os dados com um nivelamento geométrico realizado no mesmo local e na mesma data. Segundamente em Imbituba nos dias 8 e 9 de maio, onde fez-se a medição próxima ao marégrafo do IBGE, por aproximadamente 24 h. Em seguida, em Tramandaí (RS) nos dias 22 e 23 de maio, rastreou-se na plataforma de pesca, durante aproximadamente 24 h. Em um retorno à Tramandaí no dia 22 de junho, obtivemos mais dados e o dispositivo mostrou-se eficiente da mesma forma, porém medindo durante apenas 4h. A Tabela 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** resume as informações das campanhas realizadas.

Tabela 1. Campanhas temporárias

Data	Local	Receptor	Tempo aprox. de rastreamento	Instalação
26 de janeiro de 2018	Tramandaí 0	Adafruit Feather	2h	Temporária
09 de março de 2018	Cais Mauá	Adafruit Feather	2h	Temporária
08 de maio de 2018	Imbituba	Adafruit Feather	5h	Temporária

09 de maio de 2018	Imbituba	Adafruit Feather	15h	Temporária
22 de maio de 2018	Tramandaí 1	Adafruit Feather	5h	Temporária
23 de maio de 2018	Tramandaí 1	Adafruit Feather	12h	Temporária
22 de maio de 2018	Tramandaí 2	Adafruit Feather	3h	Temporária

Ainda sem uso de energia solar, porém de forma autônoma e conectada em baterias, a resposta foi positiva, encorajando uma futura instalação fixa para medição da altura da superfície da água. O rastreo foi efetuado durante o tempo previsto para todas as campanhas e o cartão de memória manteve salvos todos os registros. As Figura 26 e Figura 25 ilustram os rastreios realizados nas três localidades.

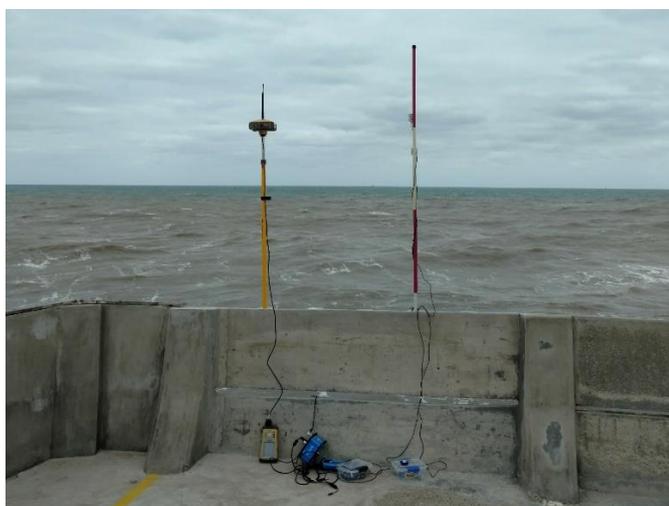


Figura 25 - Primeira campanha temporária em 26 de janeiro de 2018

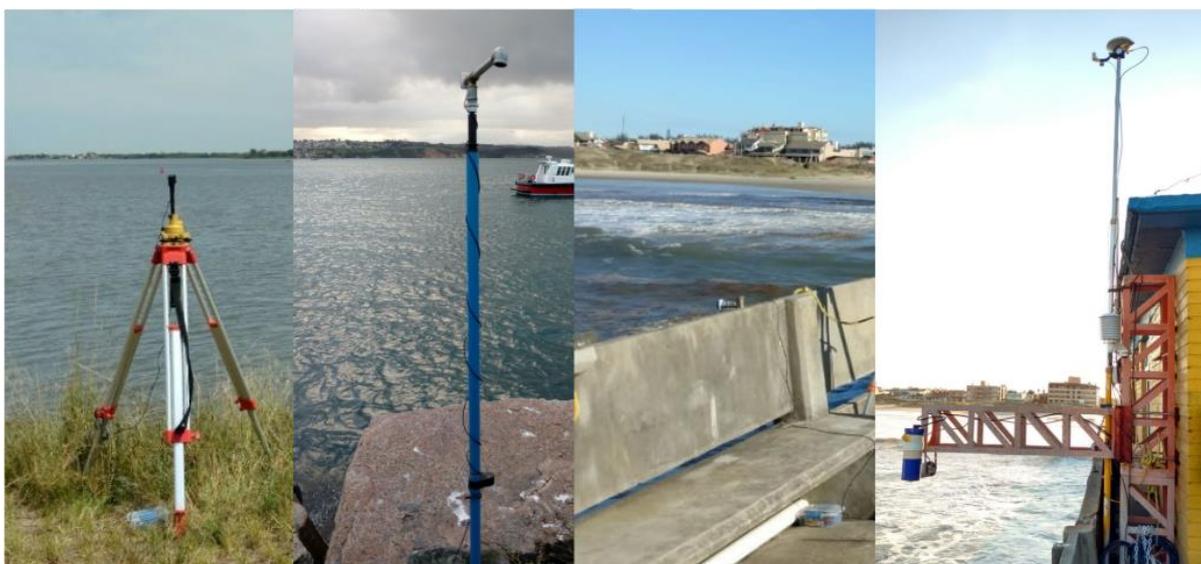


Figura 26 - Registro de cada uma das campanhas: Porto Alegre (esquerda), Imbituba (centro-esquerda), Tramandaí (centro-direita) e novamente Tramandaí (direita)

3.2.3 Instalação permanente

Instalou-se no Cais Mauá no dia 26 de outubro de 2018 a primeira estação refletométrica experimental de baixo custo, com o intuito de verificar os dados recebidos e iniciar as avaliações preliminares da estimativa da altura da superfície da água em séries temporais mais longas. Optou-se por deixá-lo com o componente de alimentação solar de médio porte, e com uma caixa hermética metálica, conforme a Figura 27.



Figura 27- Instalação no Cais Mauá: Instalação da estação permanente (esquerda), interior (direita-acima) e parafusos de fixação (direita-abixo)

O Rio Guaíba foi vantajoso pelo fato de ser um ambiente com ondas de pequena magnitude. Tornou-se viável para validação do dispositivo pela praticidade da instalação e por estar protegido de vandalismos. Por motivos de logística, uma campanha próxima à sede da UFRGS tornou-se a opção mais econômica em face de manutenções, descarregamento dos dados e controle da estrutura mecânica.

Para atestar o funcionamento do dispositivo de código-aberto e validar a aplicação da técnica de GNSS-R utilizando o mesmo, a instalação no Rio Guaíba foi considerada. Possui um linígrafo por radar, com dados disponíveis publicamente. Além disso, a praticidade uniu-se a possibilidade de descarregar os dados mais vezes do que se a campanha fosse realizada no mar, o que fez com que trabalhos pudessem ser publicados em eventos com base em análises preliminares.

O Apêndice E – Mapa de localização da instalação no Cais Mauá ilustra a localização aproximada do experimento, onde é possível observar que os azimutes na direção norte e nordeste, além de alguns a sudoeste, poderão ser considerados válidos para calcular a altura da superfície da água. Foram plotadas as Zonas de Fresnel, Figura 28, considerando um certo intervalo para os ângulos de elevação do satélite e a posição da antena. Não há satélites visíveis na direção sul para a latitude de Porto Alegre e, portanto, há uma lacuna a sul onde não é possível plotar as elipses devido às órbitas dos satélites. A Figura 29 é uma fotografia panorâmica da estação experimental, onde pode-se observar a presença do linígrafo (marca Campbell Scientific e modelo CS475A), pertencente à Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Rio Grande do Sul (SEMA), localizado há uma distância de aproximadamente 10 m do sensor GNSS-R. O croqui com a localização da instalação pode ser verificado no Apêndice E – Mapa de localização da instalação no Cais Mauá.

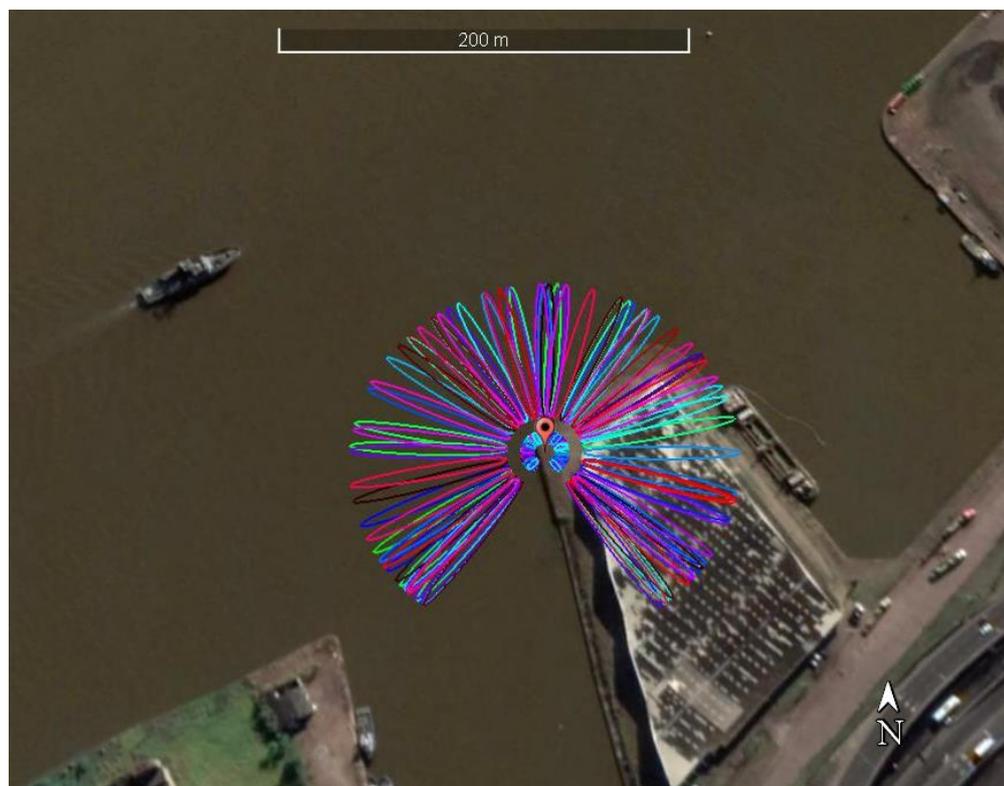


Figura 28 - Zonas de Fresnel para a localização da instalação



Figura 29 - Localização do sensor próximo ao linígrafo. Estação refletométrica (direita-acima) e Linígrafo (direita-abixo)

3.3 Métodos de análise

A análise dos dados e validação tem etapas envolvidas que incluíram a aquisição da série temporal do sensor GNSS-R e a obtenção da série temporal do linígrafo por radar pertencente à Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA).

3.3.1 Aquisição de série temporal do GNSS-MR

Conforme descrito anteriormente, a estação refletométrica experimental permanente foi instalada em outubro de 2018. Mensalmente visitava-se o local para verificação e descarregamento dos dados salvos no cartão de memória. Conforme a série temporal aumentava, os processamentos iam sendo refeitos e um período mais longo de dados era obtido. O intervalo temporal processado para elaboração deste trabalho foi de aproximadamente 11 meses, com início em 2018 e final em setembro de 2019. Neste período o equipamento mostrou um excelente desempenho em termos eletrônicos e mecânicos. O software e o hardware não apresentaram problemas, permitindo a coleta de uma série contínua. A estrutura mecânica apresentou boa resistência às condições existentes nas quatro estações do ano.

3.3.1.1 Modelagem direta e inversa de SNR

A modelagem direta e inversa das observações de SNR se refere, respectivamente, à simulação das observações com base na configuração esperada em campo e na estimação de correções para essa expectativa a partir das observações realmente medidas em campo (NIEVINSKI,

2013). Por exemplo, pode-se supor inicialmente que a altura da antena seja três metros, porém com maré faz a altura mudar para 3,25 m; nesse caso, será estimada uma correção de 0,25 m.

Para realizar o pós-processamento da série de dados advindos do sensor GNSS-R há um recurso de inversão cuja formulação matemática foi descrita em Nievinski e Larson (2014c) e Nievinski e Larson (2014d). As rotinas foram executadas no software MATLAB para estimar a altura da superfície da água. O resultado gera um valor estimado da altura entre o centro de fase da antena e a uma altura inicialmente suposta. A Figura 30 mostra a inversão, cuja linha cinza representa o SNR medido em campo em função da elevação, e a curva vermelha consiste no SNR ajustado por aproximação matemática calculada pela inversão.

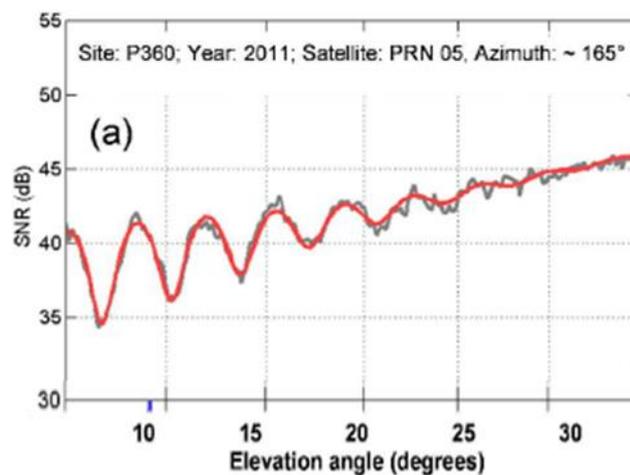


Figura 30 - Resultado de inversão

Fonte: (NIEVINSKI; LARSON, 2014d)

Conforme dito anteriormente, o algoritmo de inversão fornece subsídios para que seja possível calcular o a altura da superfície da água automaticamente. A partir de informações cruciais, pode-se obter um valor de altura associado, bem como sua precisão. Porém, além do algoritmo inicial proposto, há uma biblioteca de funções em MATLAB que podem ser executadas e auxiliam no refinamento da modelagem, fazendo com que a curva obtida automaticamente seja a mais semelhante possível aos dados medidos em campo.

O modelo direto foi apresentado de forma genérica na seção 2.4.2 Observáveis em GNSS-MR). Aqui detalhamos a utilização informações previamente conhecidas sobre a resposta da antena e da física da dispersão da superfície, para simular SNR com base nas frequências das ondas portadoras (NIEVINSKI; LARSON, 2014b).

O modelo A potência direta pode ser escrita conforme a eq. (17), onde P_d^R corresponde ao componente de potência polarizado circularmente a direita (RHCP) e G_d^R refere-se ao ganho da antenna na mesma polarização:

$$P_d = P_d^R G_d^R \quad (17)$$

A potência do sinal refletido está demonstrada na eq. (18):

$$P_r = P_d^R |X|^2 S^2 \quad (18)$$

O fator S^2 consiste na atenuação de potência coerente causado pela rugosidade superfície, conforme eq. (19):

$$S^2 = \exp(-k^2 s^2 \cos^2 \theta) \quad (19)$$

onde θ é o ângulo de incidência com respeito à direção normal da superfície, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, denomina-se número de onda, λ é o comprimento de onda, e s é o desvio padrão da altura da superfície em relação. No centro da P_r , acoplam-se coeficientes de reflexão da superfície/antena, eq. (20):

$$X = X^R + X^L \quad (20)$$

$$X^R = R^S \sqrt{G_r^R} \exp(\sqrt{-1} \Phi_r^R) \quad (21)$$

$$X^L = R^X \sqrt{G_r^L} \exp(\sqrt{-1} \Phi_r^L) \quad (22)$$

Produzindo respectivamente os campos RHCP e LHCP. A variável G é o ganho de potência, e Φ corresponde a variação do centro de fase da antenna, que dependem da direção da reflexão e de cada polarização. A resposta da superfície é representada pelos coeficientes de reflexão de Fresnel, R , que são valores complexos (com parte real e imaginária) que dependem da permissividade elétrica da superfície. A fase interferométrica completa é dada por:

$$\phi_i = \phi_X + \phi_l - \Phi_d^R \quad (23)$$

onde $\phi_X = \arg X$ depende de propriedades da superfície e da antenna e Φ_d^R é a contribuição da fase direta (variação do centro de fase da antenna RHCP avaliada na direção do satélite). A maioria dos componentes presentes na fase RHCP direta (como estado do receptor e do relógio do satélite, maior parte dos atrasos na propagação atmosférica e etc.), estão presentes na fase de reflexão e, portanto, se cancelam na diferença. Em ϕ_i tem-se também a componente geométrica $\phi_l = kd$, onde d é o atraso de propagação interferométrico. Conforme eq.(14), assumindo uma superfície horizontal, o atraso é dado por:

$$\tau_i = 2H_A \quad (24)$$

onde H_A corresponde a altura da antena e e é a elevação do satélite. Na eq.(24) utilizamos H_A para enfatizar que se trata apenas do valor esperado *a priori* para a altura da antena. A altura total do refletor H é igual ao valor *a priori* H_A menos um viés desconhecido (H_B). O total pode ser interpretada como um valor efetivo que melhor se adapta às medições:

$$H = H_A - H_B \quad (36)$$

O viés de altura H_B e outros parâmetros incógnitos são estimados através do modelo inverso de SNR conforme segue.

Devido as dependências lineares entre os parâmetros físicos, mantém-se esses parâmetros fixados em valores *a priori* e estima-se seus vieses. Por exemplo, P_n é a potência do ruído original e K_{dB} é o viés correspondente, em decibéis. Este viés pode ser expresso como um polinômio em termos do seno do ângulo de elevação:

$$P_n \leftarrow P_n / K \quad (25)$$

$$K_{dB} = \sum_{j=0,1,\dots} K_{dB}^{(j)} (\sin e)^j \quad (26)$$

De forma análoga, introduz-se uma função de viés dependente do ângulo de elevação como uma correção para imperfeições no modelo de reflexão:

$$B = |B| \exp(\sqrt{-1} \phi_B) \quad (27)$$

A potência de reflexão é atualizada como

$$P_r \leftarrow \frac{P_r}{|B|^2} \quad (28)$$

E a fase interferométrica como:

$$\phi_i \leftarrow \phi_i - \phi_B.$$

O viés de reflexão B é um valor complexo que compensará os erros de comissão e de omissão (como rugosidade da superfície que, embora representada, pode ser sub- ou superestimada). Similar ao viés de potência do ruído, o viés de potência da reflexão B_{dB} é expresso em forma polinomial,

$$B_{dB} = \sum_{j=0,1,\dots} B_{dB}^{(j)} (\sin e)^j \quad (29)$$

O viés da fase de reflexão (ϕ_B) é formulado através da eq. (30):

$$\phi_B = \sum_{j=0,1,\dots} \phi_B^{(j)} (\sin e)^j \quad (30)$$

$\phi_B^{(0)} = \phi_B$ é constante, e consiste em uma mudança de fase que contabiliza erros no padrão de fase da antena. O coeficiente de fase linear é reformulado como uma altura equivalente do refletor de superfície horizontal (H_B) que é responsável por erros no valor *a priori* da altura do

refletor, incluindo alguma espessura desconhecida sobre o chão ou uma inclinação no solo. A função de polarização da fase completa é ϕ_B .

$$H_B = (4\pi)^{-1} \lambda \phi_B^{(1)} \quad (31)$$

$$\phi_B = \varphi_B + (4\pi\lambda)^{-1} H_B \sin(e) + \sum_{j=2,3,\dots} \phi_B^{(j)} (\sin e)^j \quad (32)$$

O modelo direto, incluindo vieses, pode ser reescrito como:

$$SNR = (1 + P_i + 2\sqrt{P_i} \cos \phi_i) P_d P_n^{-1} \quad (33)$$

onde a potência interferométrica corrigida é P_i :

$$P_i = \frac{\left| \frac{XS}{B} \right|^2}{G_d^R} \quad (34)$$

A fase interferométrica corrigida é ϕ_i :

$$\phi_i = \varphi_x + (4\pi\lambda)^{-1} H \sin(e) - \varphi_B - \sum_{j=2,3,\dots} \phi_B^{(j)} (\sin e)^j - \Phi_d^R \quad (35)$$

No final, o processo de inversão estima os seguintes parâmetros desconhecidos:

$$X = [H_B, \varphi_B, B_{dB}^{(0)}, B_{dB}^{(1)}, B_{dB}^{(2)}, K_{dB}^{(0)}, K_{dB}^{(1)}, K_{dB}^{(2)}]^T \quad (37)$$

Com base nos valores preliminares para o vetor de parâmetros desconhecidos e outros valores conhecidos (ou assumidos) executa-se o modelo direto para obter observações simuladas $f(x)$. Ao comparar $f(x)$ com medições SNR em um vetor Y , forma-se resíduos pré-ajustados (y) os quais, por sua vez, servem para estimar correções de parâmetros (\hat{x}):

$$y = Y - f(x) \quad (43)$$

$$\hat{x} = C_{\hat{x}} J^T y \quad (44)$$

A estimação é tal que a soma quadrática $\hat{y}^T \hat{y}$ de resíduos pós-ajuste $\hat{y} = Y - f(x - \hat{x})$ é minimizada. O modelo funcional da inversão conta com a matriz jacobiana, J , que representa a sensibilidade das observações à mudança em cada parâmetro,

$$J(i, j) = \frac{\partial Y_i}{\partial X_j} \quad (45)$$

Ao invés de derivar expressões analíticas, estas são avaliadas numericamente via diferenças finitas.

Na quantificação da incerteza, a matriz de covariância posterior dos parâmetros é $C_{\hat{x}}$, e depende apenas da especificação prévia dos modelos funcionais e estocásticos, independente das medições em si.

$$C_{\hat{x}} \approx (J^T J)^{-1} \quad (53)$$

O vetor de precisão posterior dos parâmetros \hat{x} é:

$$\Sigma_{\hat{x}} = \sqrt{\text{diag}(C_{\hat{x}})} \quad (54)$$

$$\Sigma_{\hat{x}} = \left[\sigma_{H_B}, \sigma_{\varphi_B}, \sigma_{\beta_{dB}^{(0)}}, \sigma_{\beta_{dB}^{(1)}}, \sigma_{k_{dB}^{(0)}}, \sigma_{k_{dB}^{(1)}} \right]^T \quad (55)$$

Como foi possível observar no resumo acima, a formulação matemática da inversão é não é trivial e depende de diversos fatores. De modo geral, esta realiza uma análise espectral do sinal, cuja frequência dominante é determinada. Posteriormente, o refinamento do valor de altura é calculado através do método dos mínimos quadrados, por ser um problema não linear, onde consegue-se estimar a precisão da modelagem em relação aos dados de campo.

O comportamento dos dados brutos depende de diversas variáveis, sendo elas rugosidade da superfície de reflexão, intervalo de elevação e azimute selecionados, velocidade do vento, salinidade, altura da antena etc. Estes fatores quando inseridos dentre os parâmetros, tornam possível uma melhor coincidência entre os dados de campo e a modelagem. Em um treinamento inicial tinha-se como dados de entrada os arquivos brutos em formato devidamente reconhecido, o período de trabalho e o tipo de fase da onda portadora. Posteriormente, foram inseridas configurações de pré-filtragem das observações, onde se pôde selecionar um espaçamento para a observação filtrada, uma média móvel e filtros passa alta ou passa baixa. Conforme a realização de testes para melhora da modelagem, o algoritmo ficou escrito conforme descrição apresentada no Apêndice A – Rotina de inversão.

3.3.2 Obtenção de série temporal do linígrafo

O linígrafo por radar utilizado como dado de referência, possui precisão de aproximadamente 2 mm (CAMPBELL, 2020). A Figura 31 mostra parte de um documento de proposta financeira, fornecido pela empresa vencedora Água e Solo, no pregão eletrônico da SEMA. O custo de R\$58.817,51 por estação é considerado alto e reforça a hipótese deste trabalho, de que um sensor de baixo custo, com fácil instalação e medição a distância, poderia aumentar a densidade espacial e garantir o monitoramento das águas com maior cobertura.

QUADRO RESUMO DO CONTRATO			
Serviço	Valor por Unidade de Serviço (R\$)	Quantidade de Unidade de Serviços	Valor total da unidade de serviço (R\$)
Fornecimento, instalação e comissionamento de estações fluviométricas telemetrizadas de acordo com o Termo de Referência e seus Anexos	58.817,51	60	3.529.050,60
Valor total do Contrato			R\$ 6.714.999,60

Figura 31 – Custo do sensor por radar

A série temporal do linígrafo foi obtida a partir do portal da sala de situação da SEMA, através do endereço <http://saladesituacao.rs.gov.br/api/station/ana/sheet/87450004>. Os dados podem ser acessados online e baixados em formato de planilha. A partir do download constatou-se uma coluna referente à data e a hora de medição e outra relativa ao nível d'água correspondente. A resolução temporal é de 15 minutos, com o nível informado com resolução numérica centimétrica. Conforme comunicação pessoal com a SEMA, o sensor radar tem como referência uma régua com sensor de pressão instalada no Cais Mauá, que possui uma série temporal histórica. A Figura 32 mostra a régua com sensor de pressão, distante aproximadamente 1 km do linígrafo por radar.



Figura 32 - Régua com sensor de pressão localizada no Cais Mauá

A calibração do sensor radar é realizada tendo como base a régua mostrada na Figura 32. No processo de calibração, há uma verificação técnica dos dados do linígrafo através de medições. Com isto, sabendo-se o valor da régua, o linígrafo é eventualmente ajustado a partir de um offset para que as medições de ambos coincidam. O processo de calibração está exemplificado na Figura 33, onde é possível notar as constantes envolvidas no momento da manutenção/instalação.

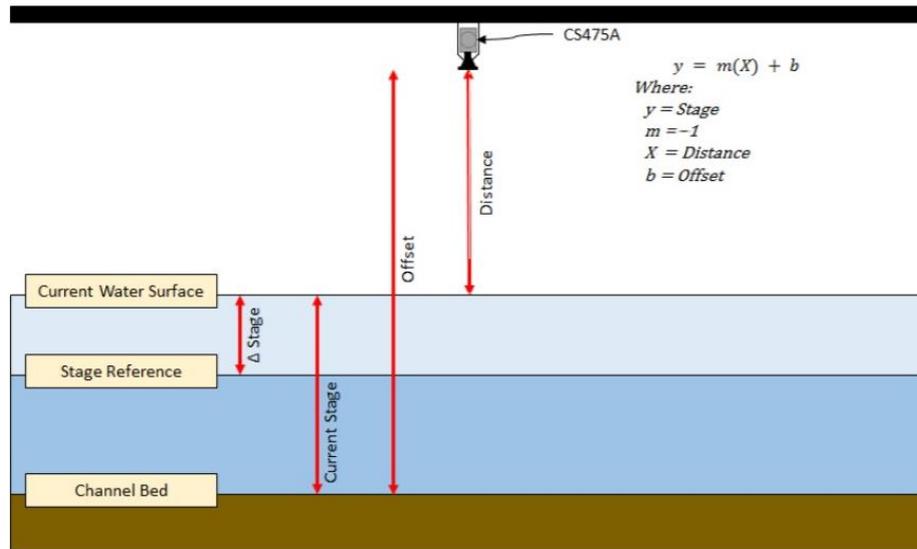


Figura 33 - Calibração do sensor por radar.

Fonte: Figura 5-1 de (CAMPBELL, 2020)

4. RESULTADOS

4.1 Dimensionamento do painel solar

O primeiro teste realizado no terraço do laboratório, com o dispositivo experimental completo, foi executado com o maior painel solar (9 W). Houve superdimensionamento ao utilizá-lo e, portanto, optou-se por testar com um painel de tamanho médio (6 W). Neste segundo caso os resultados pareceram promissores, conforme a Figura 34, considerando que o equipamento funcionou ininterruptamente por quatorze dias, com uma tensão mínima de 4,02 V. Para manter-se em funcionamento o dispositivo necessita de aproximadamente 3,2 V. A tensão mínima para recarregamento da bateria é de 4,5 V. Durante o dia a insolação solar faz a tensão chegar a mais de 6,5 V. Já durante a noite a tensão diminui gradualmente conforme a energia da bateria é consumida. Nota-se próximo do dia 10 que o tempo provavelmente estava nublado, pois a duração do período de recarga foi mais curto.

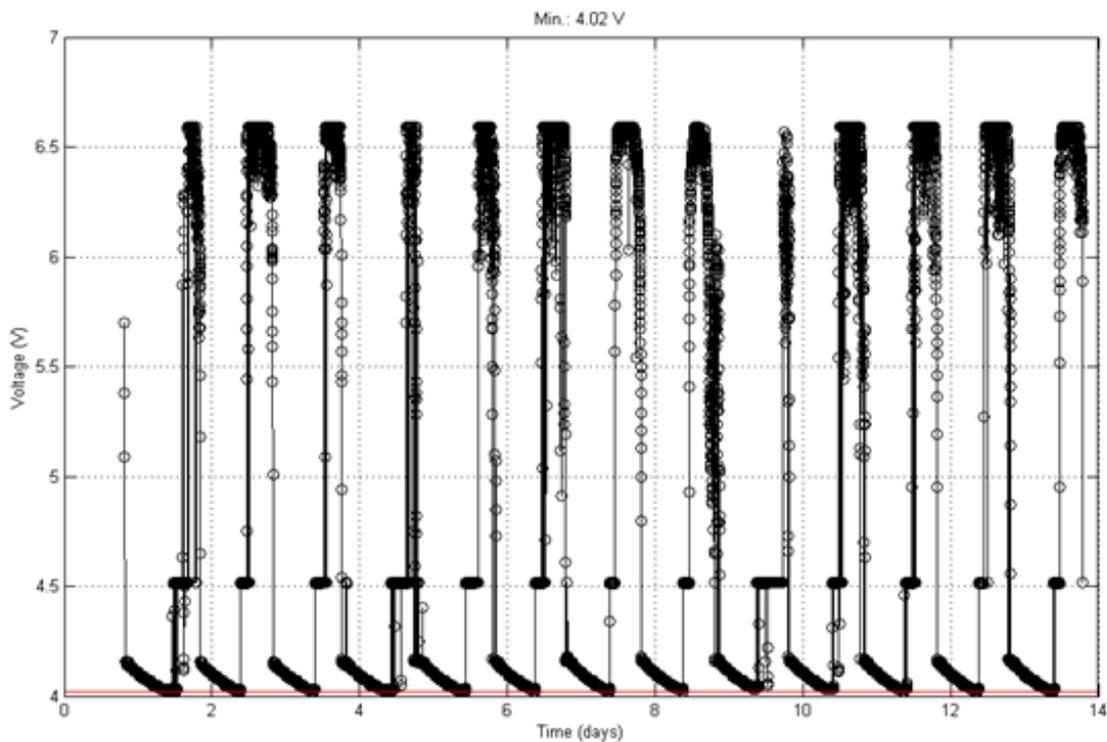


Figura 34 - Tensão ao longo do tempo com o painel médio

A alimentação solar de pequena (3.5 W) estrutura apresentou resultados insatisfatórios para operar o sensor GNSS-R, como apresentado a Figura 35. Em determinados períodos do dia faltou energia para o dispositivo operar, tornando-o inviável para a aplicação; estes períodos estão indicados por um segmento de reta diagonal sem pontos.

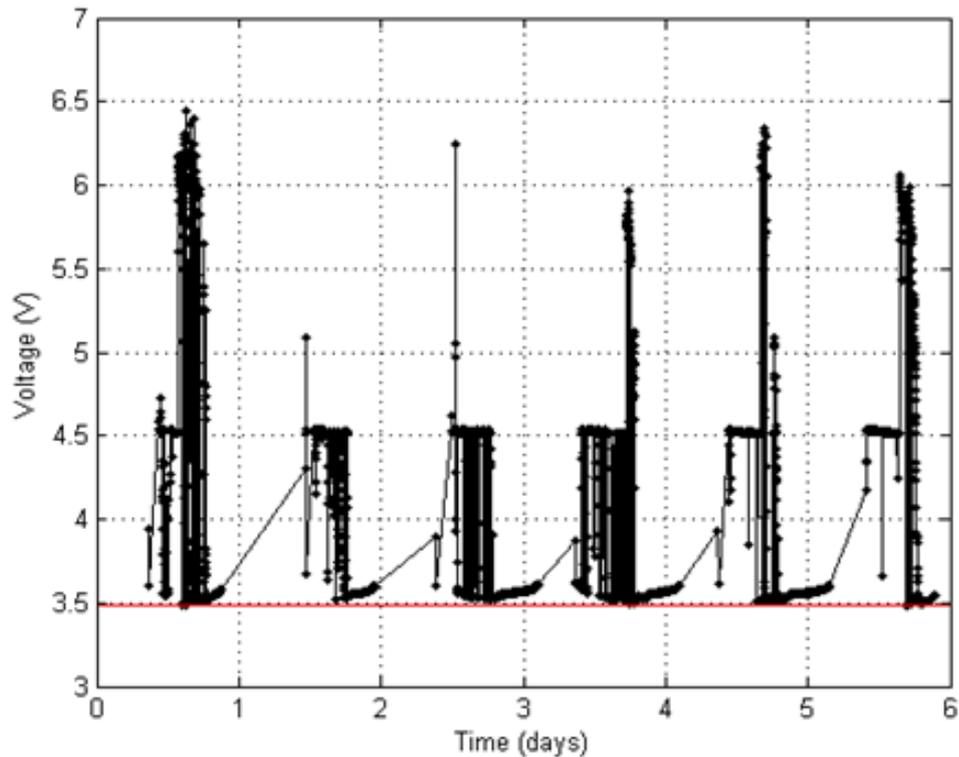


Figura 35 - Tensão ao longo do tempo para o painel menor

4.2 Resultados das instalações temporárias

Na sequência, apresentar-se-á alguns resultados preliminares provenientes das campanhas de Imbituba (Figura 36 e Figura 37), Tramandaí 1 (Figura 38 e Figura 39) e Tramandaí 2 (Figura 40), respectivamente. Os dados da primeira campanha, realizada em Tramandaí dia 26 de janeiro de 2018, sofreram com falta de energia e interferência da agitação das ondas. A campanha de Porto Alegre será mostrada na próxima subseção. Para esta foi realizada uma análise mais detalhada, com a finalidade de validar a aplicação de GNSS-MR utilizando o sensor GNSS-R em um ambiente mais controlado, cuja água apresenta pequenas ondulações e presença de menos vento quando comparado às aplicações em regiões costeiras.

4.2.1 Campanha de Imbituba (SC)

Os gráficos referentes ao experimento de Imbituba (SC) apresentaram inúmeras falhas, conforme pode ser visto nas figuras Figura 36 e Figura 37. A maioria delas foi decorrente de problemas de alimentação elétrica. Também se supõe que falta de estrutura mecânica contribuiu negativamente para os resultados. Não havia um suporte fixo, o que fez com que o cabo balançasse muito e o sinal sofresse interrupções devido à delicada conexão.

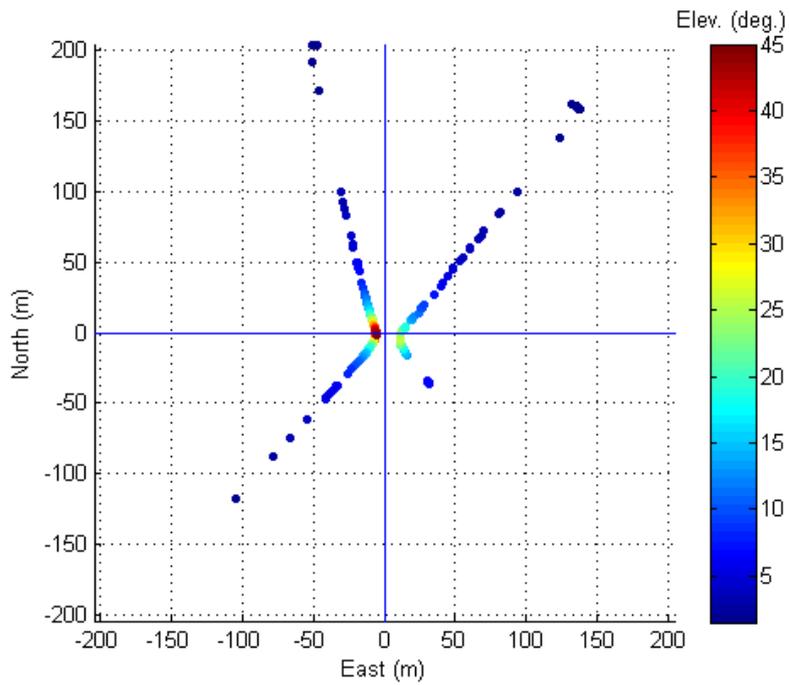


Figura 36 – Representação da linha de rastreio obtida a partir dos dados do sensor GNSS-R.
Em azul os pontos medidos com espaçamento devido às falhas no rastreio.

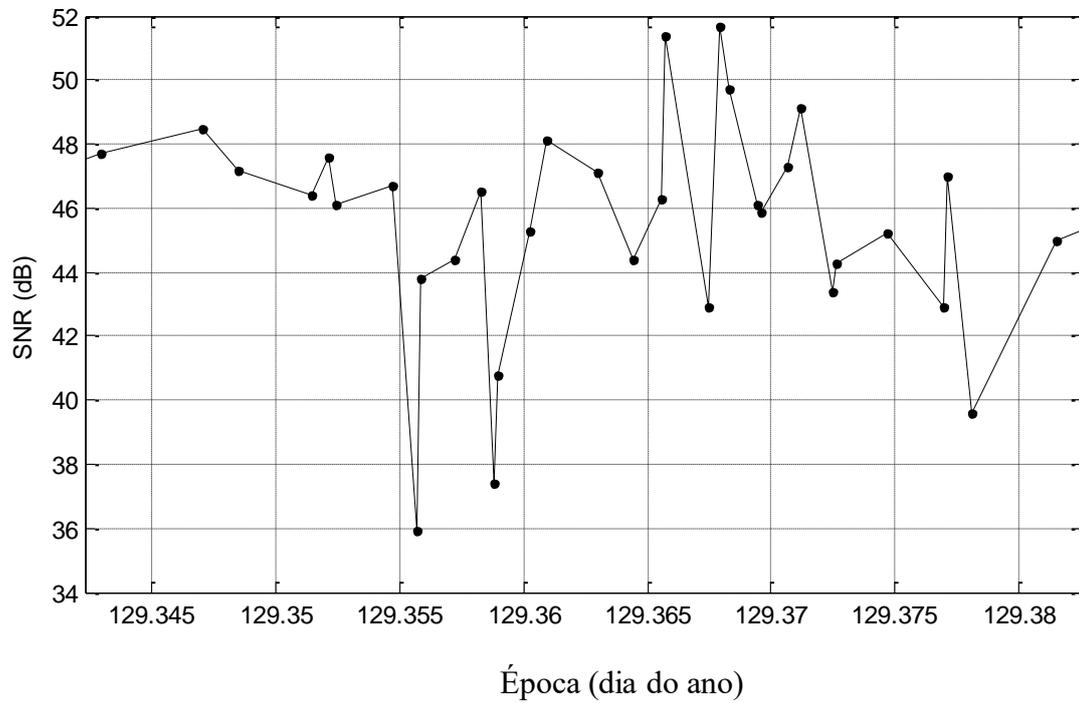


Figura 37 - Dados do experimento realizado em Imbituba para o PRN 15. Comportamento do SNR em função do tempo

4.2.2 Campanha de Tramandaí (RS)

Os dados da campanha de Tramandaí 1 apresentaram muitos ruídos e contaram com imprevistos. Na data do teste o mar estava agitado e com muitas ondas, devido a uma tempestade, o que dificultou a identificação dos ciclos, e, por consequência, o cálculo visual da altura entre a antena e a água. Conforme é possível observar na Figura 38, em que houve um filtro de azimute a sudoeste, a medição obtida foi contínua. Porém na Figura 39, nota-se que devido aos ruídos, tornou-se complexo extrair os ciclos do comportamento. Isto provavelmente ocorreu devido à presença da tempestade, que fez com que o mar ficasse agitado, cheio de espuma e a velocidade do vento muito elevada na data de obtenção dos dados apresentados.

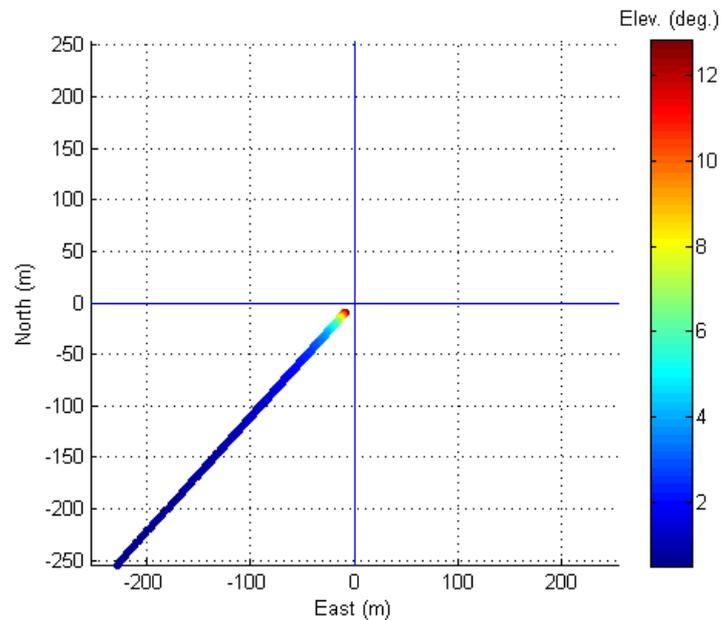


Figura 38 - Dados do experimento realizado em Tramandaí 1 para o PRN 15: trajetória do satélite

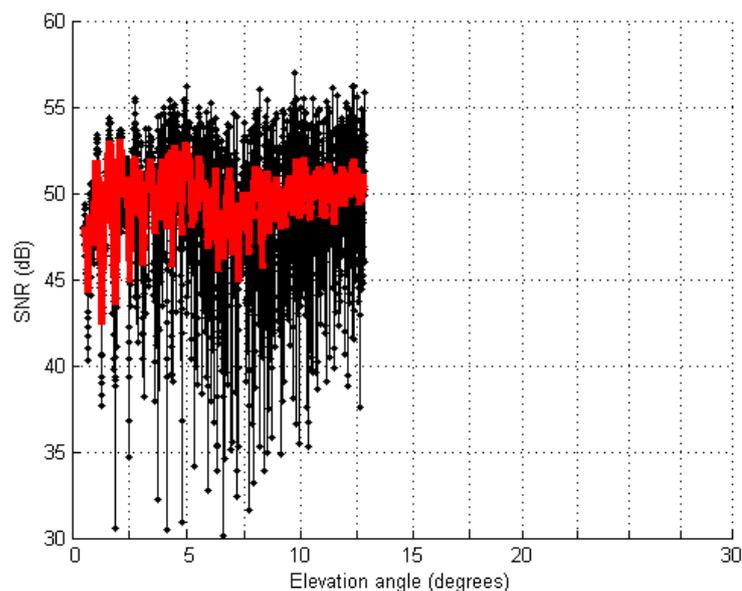


Figura 39 - Dados do experimento realizado em Tramandaí 1 para o PRN 15: azimute do satélite (esquerda) e gráfico de SNR x Elevação (direita). Em preto: dado bruto. Em vermelho: modelagem da inversão.

O segundo experimento realizado em Tramandaí, Tramandaí 2, possibilitou estimar de melhor forma a altura da superfície da água. De posse de uma análise preliminar dos dados, fez-se a inversão dos mesmos, conforme a Figura 40, para cálculo automatizado. A altura inicial estimada foi de 5,5 m, resultando uma distância média entre a água e o receptor de 6,706 m e desvio padrão de 7,7 cm. Infelizmente os dados do marégrafo localizado em Tramandaí não foram disponibilizados pelo SimCosta, o que inviabilizou qualquer comparação preliminar.

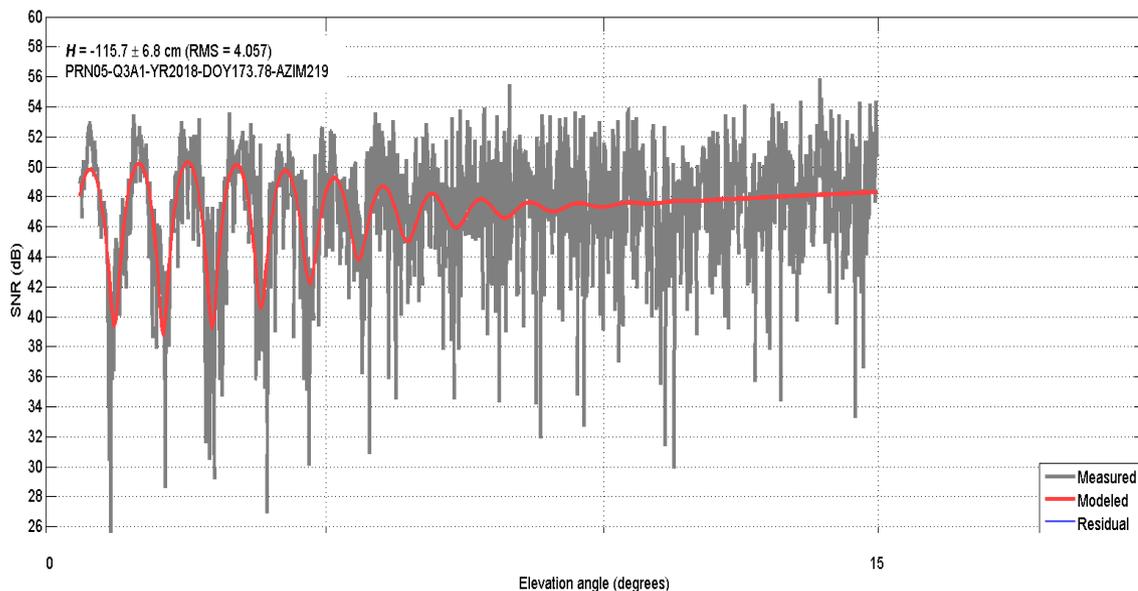


Figura 40 - Inversão realizada para os dados da segunda campanha de Tramandaí 2 - PRN06 Azimute 219. Em cinza: dado bruto. Em vermelho: resultado da inversão

4.2.3 Campanha de Porto Alegre (RS)

Para a primeira campanha em Porto Alegre, realizou-se simultaneamente ao rastreamento um nivelamento topográfico geométrico (ou seja, utilizando como instrumento nível ótico) entre a altura da antena e a superfície da água. Com relação à técnica de nivelamento geométrico, sabe-se de sua consolidação na utilização em levantamentos geodésicos de alta precisão (IBGE, 1983). Quando aplicada corretamente, gera resultados com erros inferiores a $0,5\text{mm}\cdot\sqrt{D}$, onde D é a distância em km. Foram tomados os cuidados usuais para evitar a ocorrência e propagação de erros sistemáticos (IBGE, 1983). Os materiais utilizados foram um nível eletrônico DL-202 e régua com código de barras. Leu-se a régua na altura do centro físico da antena, por desconhecer-se o centro de fase, e na altura da superfície da água. A parte inferior da régua foi colocada em contato direto com a lâmina d'água, a qual estava calma, como pode ser observada na Figura 41. A agitação das ondas foi inferior a 5 cm, sendo essa a principal fonte de incerteza da medição (IBGE, 1983).



Figura 41 - Lâmina d'água no Cais Mauá na campanha de 09/03/2018

Os resultados foram obtidos no software Matlab, utilizando um pacote de códigos que calculam automaticamente a distância entre a antena e a água. A figura Figura 42 apresenta o gráfico de SNR (dB) em função da elevação. Observa-se a representação em vermelho para a inversão gerada e em cinza para os dados medidos. Acima do gráfico há um valor de altura, o desvio padrão associado e o EMQ. Na segunda linha de informações têm-se os dados de PRN, dia do ano e azimute médio.

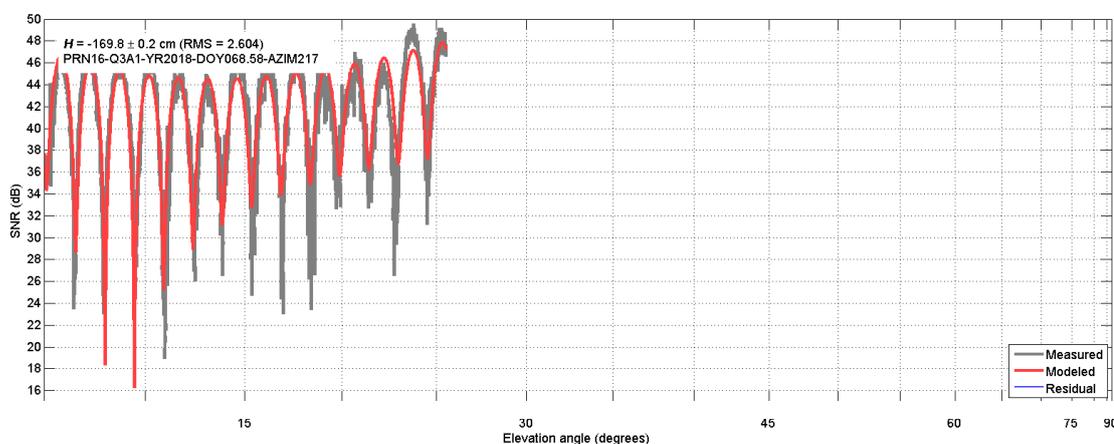


Figura 42 - Resultado da inversão para o PRN 16: em cinza o dado medido, em vermelho o calculado.

Para gerar a inversão, estima-se a altura da antena. A altura real em relação à água pressupõe a seguinte equação:

$$H = H_A - H_B \quad (55)$$

onde a altura inicial (H_A), neste caso, é igual a 2 m, e H_B consiste na correção obtida na inversão e a altura final (H) é obtida através da combinação entre ambas. A altura final significa a

distância vertical do centro de fase da antena até o ponto de reflexão. O resultado da inversão apresentou uma média de 3,695 m de altura com desvio padrão de 4,5 cm. Através do emprego da técnica de nivelamento geométrico obteve-se uma altura entre o centro da antena do GPS e a água de 3,819 m, com precisão de 0,31mm.

A diferença observada entre os dois métodos de medição é de 12,4 cm, ou 3,4% da altura total. Considerando que há um erro gerado pela perturbação das ondas (cerca de 5 cm), que pode ser atenuado em testes futuros, a técnica de refletometria para medição do nível do lago apresenta resultados ainda mais promissores. Para uma comparação preliminar, envolvendo poucos satélites e pouco tempo de observação, pode-se afirmar que o objetivo do experimento foi alcançado.

Tabela 2. Comparação entre nivelamento geométrico e GNSS-R

	Nivelamento	GNSS-R
Altura média (m)	3,819	3,695
Desvio padrão (cm)	0,03	4,5

4.3 Resultados da instalação permanente

Reporta-se nesta seção a série com duração de quase um ano. Após três dias da instalação inicial, retornou-se ao local para inspeção da estação refletométrica. Nosso resultado foi positivo, visto que o equipamento operou ininterruptamente e não apresentou problemas derivados do clima. Após o primeiro teste, passou-se a visitar periodicamente o dispositivo com o intuito de avaliar os componentes de hardware e estrutura mecânica, assim como descarregar os dados do cartão de memória.

4.3.1 Análise da inversão SNR

Considerar-se-á satélites com trajetórias em azimutes médios entre 190° e 360° e 0 e 10°, assim como intervalos de elevação entre 15° e 35°. Os azimutes foram selecionados com base na plotagem das zonas de Fresnel (Figura 28) e uma máscara de elevação foi utilizada para descartar sinais refletidos de prédios e árvores presentes no entorno. Aplicou-se o algoritmo de inversão de Nievinski e Larson (2014c) e Nievinski e Larson (2014d) para calcular

automaticamente a altura da superfície da água, verificar se os dados obtidos estavam coerentes e se o dispositivo não apresentou falhas. Conforme é possível observar na Figura 43 a inversão apresentou um bom desempenho, considerando que a inserção de alguns parâmetros que foram ajustados corretamente, dentre eles o valor inicial estimado para a altura da antena.

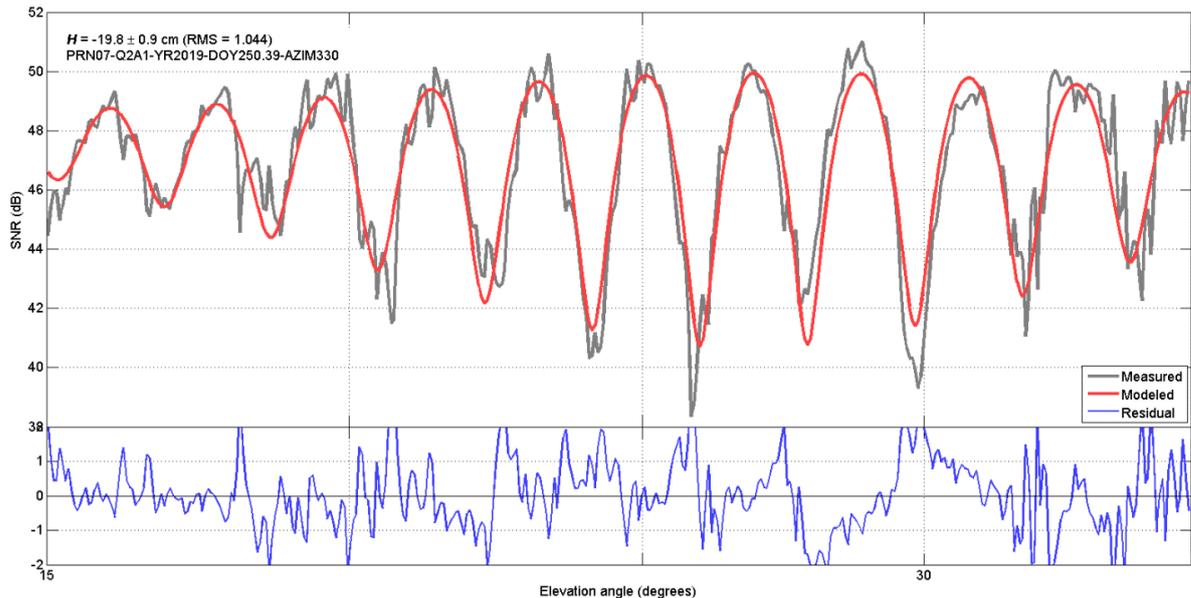


Figura 43 - Inversões para estimativa do nível da água no Cais Mauá: em cinza o dado medido, em vermelho o calculado e em azul o resíduo.

4.3.2 Análise temporal completa

O passo seguinte conterà a comparação com os dados do linígrafo disponibilizados pela SEMA. Porém estes não possuem um referencial preciso, exigindo que futuramente calculemos um offset para comparar e embasar a análise estatística (análise absoluta). Enquanto não encontramos um valor a contento, baseamo-nos na diferença entre as médias das séries temporais e utilizamos este valor como offset (análise relativa). A Figura 44 apresenta a série temporal bruta obtida com sensor GNSS-R. É possível notar um dado contínuo e com alguns valores espúrios.

A Figura 45 mostra a série temporal obtida com linígrafo para o mesmo período de medição da estação experimental. Ao observar as lacunas observacionais, entrou-se em contato com a SEMA para compreender o que poderia ter ocorrido com o equipamento. O órgão informou que algumas manutenções foram realizadas ao longo do ano, e que o sensor por radar ficou fora de funcionamento em determinados períodos. Esclareceu ainda que quando há falhas

no linógrafo, o procedimento adotado é o de repetir a calibração no mesmo, tendo como base a régua de pressão, conforme descrito na seção de Metodologia.

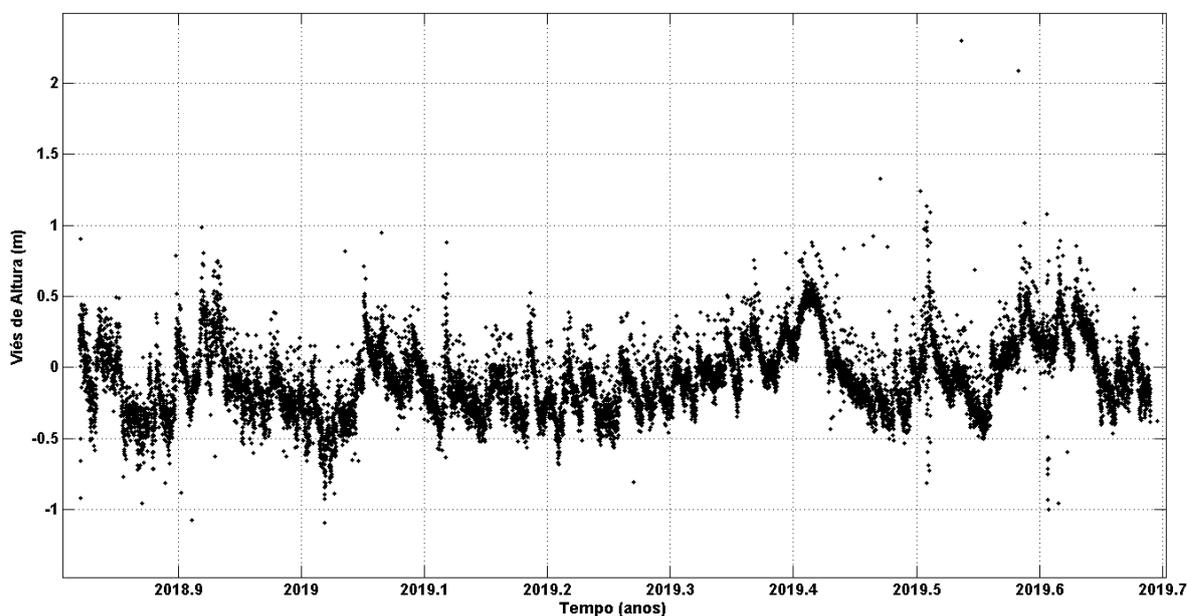


Figura 44 - Série temporal bruta obtida com o sensor GNSS-R.

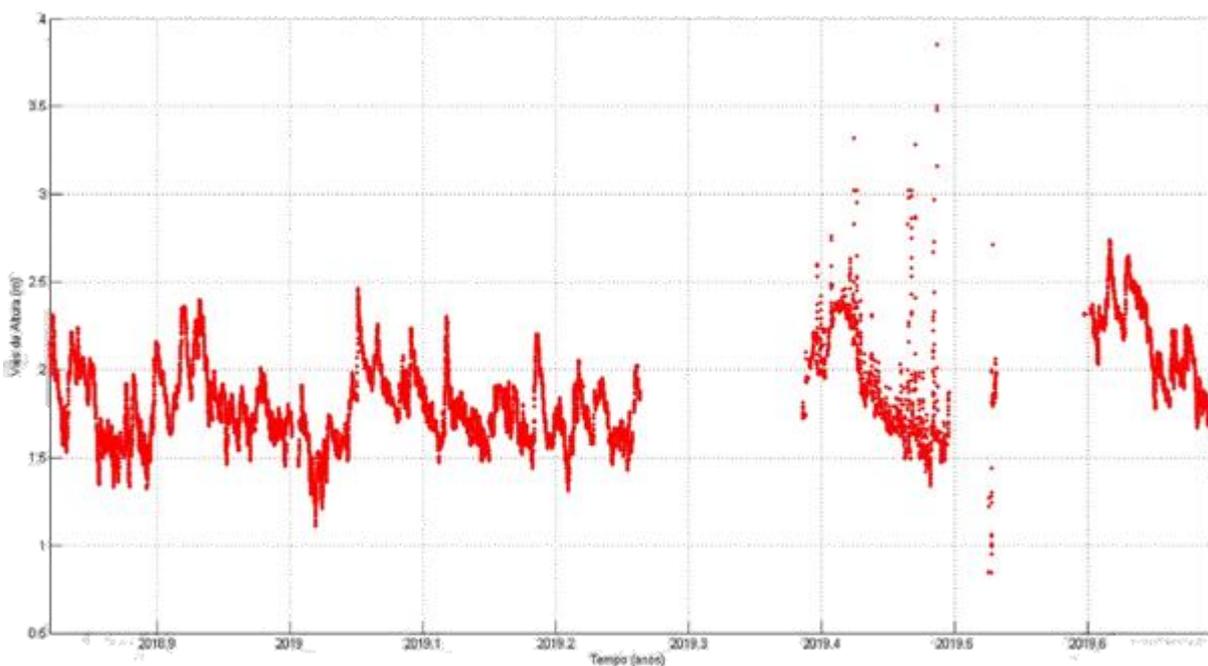


Figura 45 - Série temporal do linógrafo

Conforme foi possível observar nas figuras Figura 44 e Figura 45 as séries temporais necessitam de um tratamento matemático para descartar valores espúrios e filtrar os dados conforme interesse. Por exemplo, nota-se que o linógrafo entre as épocas 2019,4 e 2019,5

apresentou nível de ruído excessivo, já a série do sensor GNSS-R tem um nível de ruído uniforme ao longo de série. As comparações foram realizadas considerando dados brutos do GPS e linígrafo, sendo os do sensor GNSS-R gerados na inversão.

Primeiramente trabalhou-se com os dados do linígrafo, onde converteu-se as datas para o tempo em UTC com o intuito de comparar com os dados advindos do GPS. Esta correção considera uma diferença temporal de 3h em relação ao horário fornecido pelo sensor GNSS-R. Realizou-se ainda uma suavização dos dados a partir da aplicação de uma mediana diária. Para os dados do GPS verificou-se os azimutes filtrados na inversão e certificou-se que as reflexões eram correspondentes à água. A Figura 46 mostra a representação dos dados contidos nos azimutes médios, ou seja, cada círculo em azul significa um valor de altura calculado a partir de um satélite de azimute entre 0° e 360° . O norte corresponde ao ângulo zero, e os valores internos (entre 2 e -3 metros) representam o intervalo de valores de viés de altura obtidos.

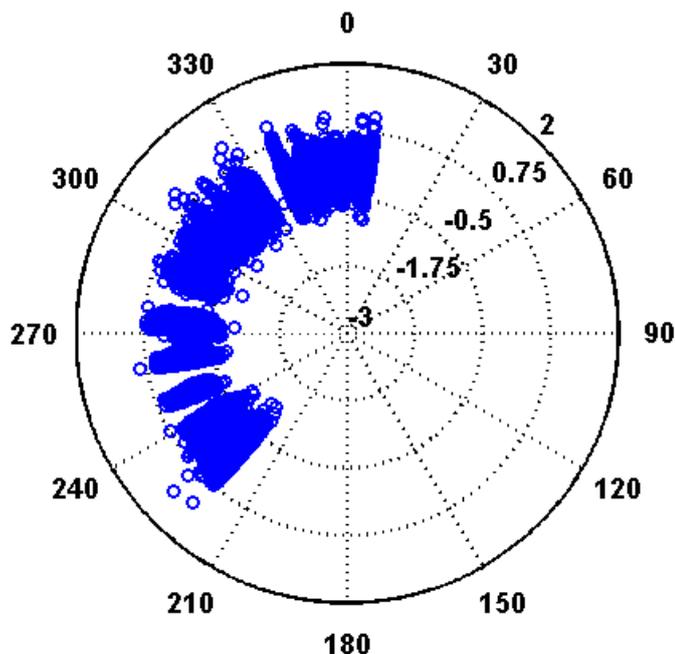


Figura 46 -Filtragem dos azimutes

Para a filtragem de azimute, considerou-se intervalo com valor central de 280° e variações positivas e negativas de 90° . Há a opção de restringir o intervalo de elevação na inversão, cujo objetivo é aplicar máscaras e descartar sinais que possam sofrer obstruções indesejáveis. Além disto, selecionar o intervalo de elevação pode facilitar a modelagem do SNR visto que para altas elevações do satélite há um grande amortecimento da amplitude quando a antena está apontada para zênite. Ainda pode ocorrer uma aceleração da fase dependendo da altura da

antena em relação à água, que a inversão pode não conseguir modelar. Pensando-se nestes fatores escolheu-se o intervalo entre 15 e 35 graus para as elevações dos satélites.

Na Figura 47 observa-se a sobreposição das duas séries temporais brutas. Percebe-se boa correlação entre elas, porém a presença de alguns dados dispersos tende a comprometer a estatística. Após perceber os ruídos, optou-se por filtrar a série temporal do GNSS-MR e retirar os resíduos anômalos. A Figura 50 apresenta o resultado obtido após a exclusão de resíduos nos dados do GNSS-R. A filtragem destes resíduos resultou no cálculo do desvio padrão e descartou-se todos os valores de resíduo de altura acima de 3 vezes o valor do desvio padrão, implicando em um intervalo de 99% de confiança. A Figura 48 mostra em preto os dados da série temporal e, em vermelho, os resíduos anômalos descartados. É possível notar que houve um descarte considerável de valores espúrios, porém ainda há bastante ruído na série. A Figura 49 destaca que a série temporal do GNSS-R mesmo sem resíduos anômalos ainda apresenta ruídos que são discrepantes da série do linígrafo.

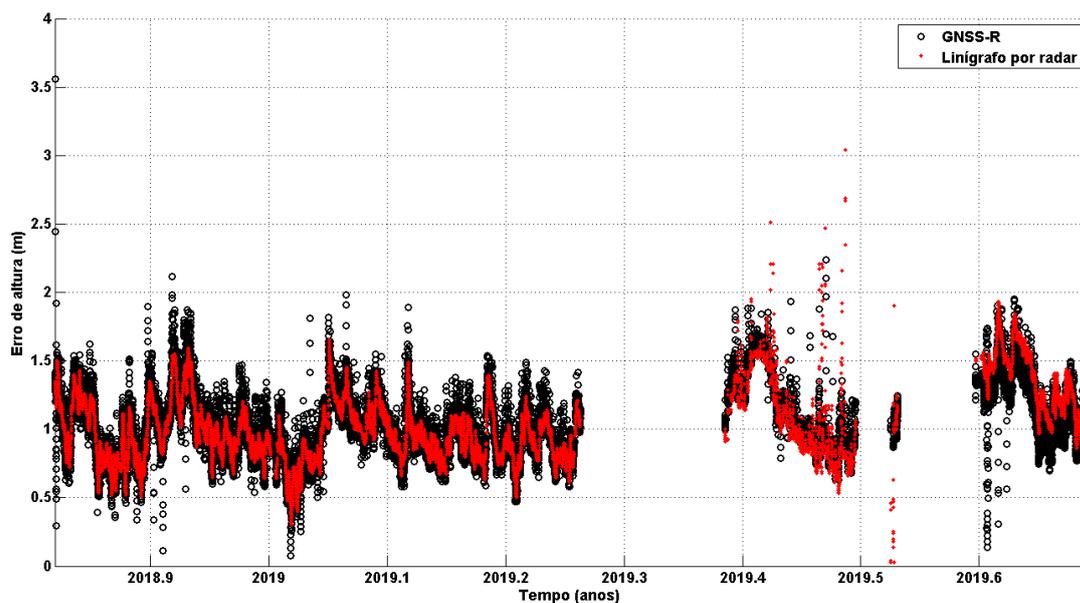


Figura 47 - Dados de GNSS-MR sem suavização e dados do linígrafo sem suavização.

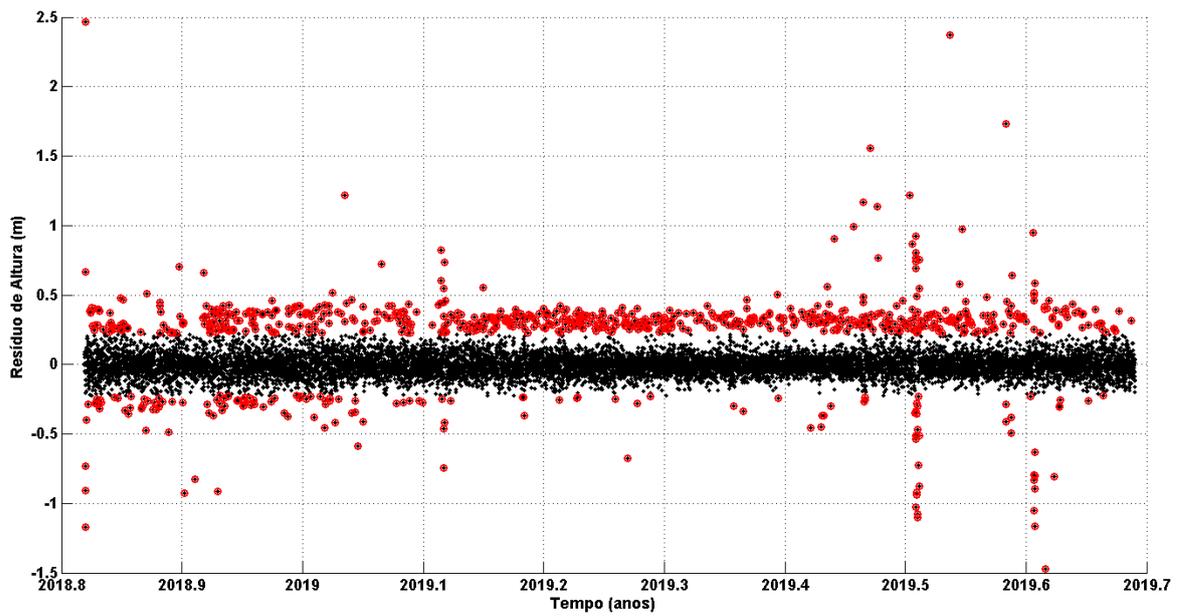


Figura 48 - Descarte de resíduos anômalos

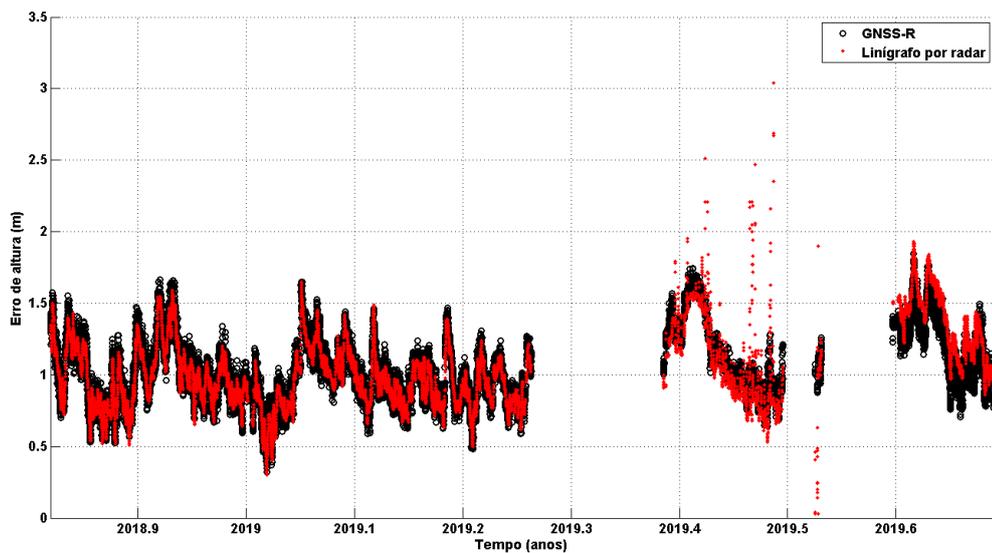


Figura 49 - Série temporal do GNSS-R sem os resíduos anômalos e série temporal bruta do linígrafo

O passo seguinte consistiu na filtragem dos resultados no tempo, implicando na suavização dos dados. Para tanto aplicou-se uma mediana móvel diária nos dados do linígrafo. A Figura 50 mostra a série temporal do linígrafo após a aplicação da mediana móvel, e a série temporal do GNSS-R com descarte dos resíduos anômalos. Percebase que a diferença entre o dado do GNSS-R e o dado do linígrafo se acentua ainda mais quando comparada a Figura 49.

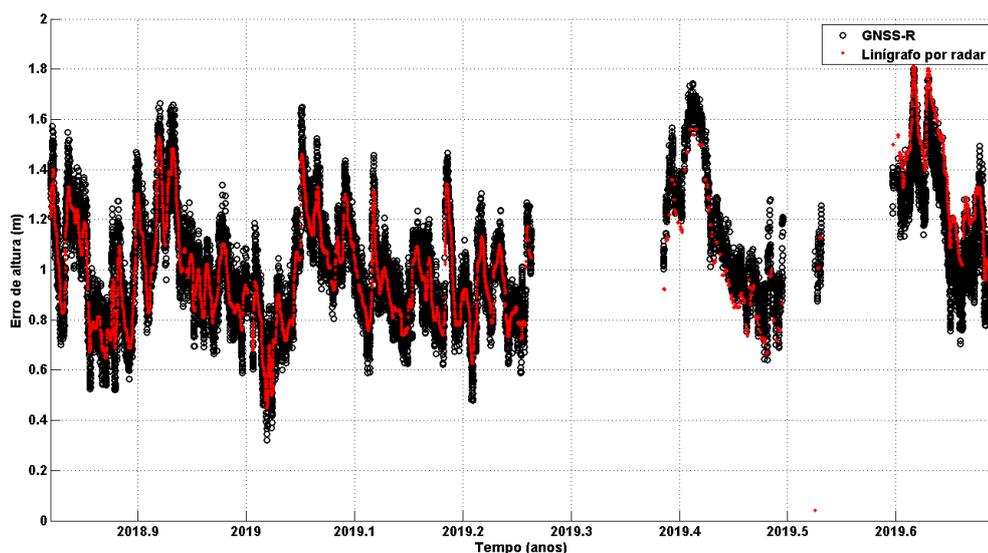


Figura 50 - Dados de GNSS-MR descartando os resíduos anômalos e dados do linígrafo com suavização.

A etapa de suavização primária para comparação apresentou resultados mais favoráveis do que a comparação bruta, porém ainda se notou excesso de dados na série que não correspondiam com a tendência. Neste caso optou-se por filtrar também a série do GNSS-R através da aplicação de uma mediana móvel diária. Esta possui um espaçamento irregular devido a resolução temporal do dado. A Figura 51 mostra as séries temporais suavizadas, onde é possível interpretar que há uma melhor correlação entre elas. Os vazios nas séries temporais são devido a uma falha que ocorreu no linígrafo durante a coleta de dados. Sem dados do linígrafo, a estatística de comparação apresentou dados sem valor, e estes foram descartados.

Conforme a Figura 51, pode-se notar que o dispositivo experimental manteve-se operando de forma ininterrupta durante todo o período e que falha foi decorrente apenas do sensor por radar. Para obter pontos igualmente espaçados e poder-se comparar o erro entre as séries, recorreu-se a de interpolação linear no MATLAB. Com ela o intervalo entre os dados do GNSS-R coincide com intervalo de resolução temporal do linígrafo.

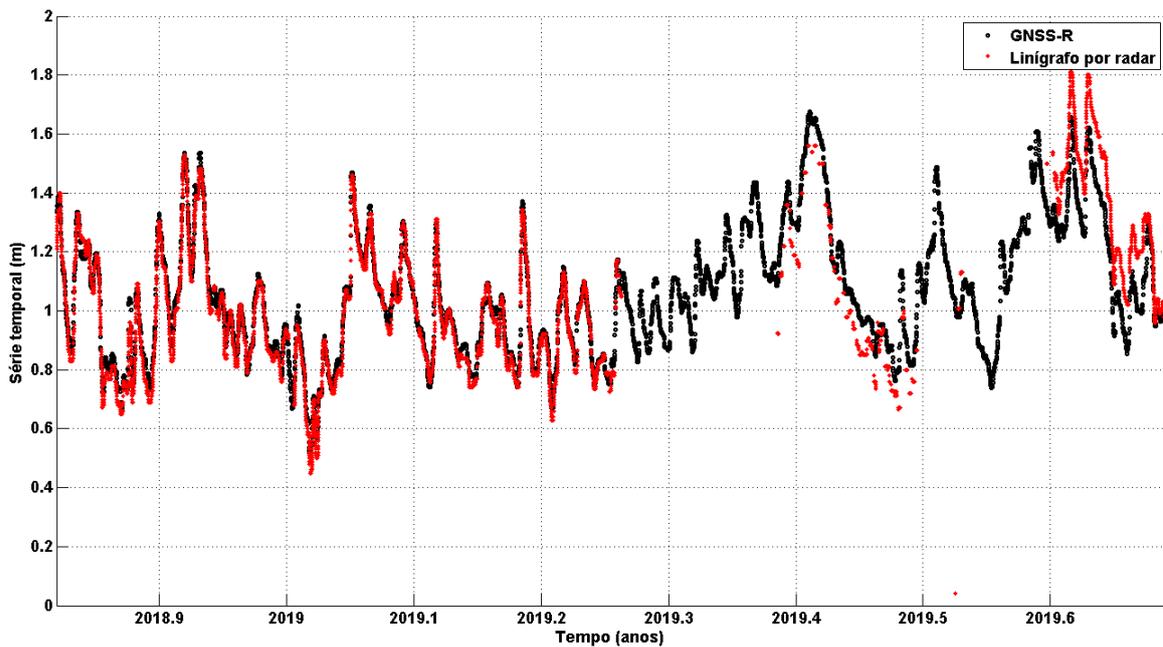


Figura 51 - Séries temporais sobrepostas. GNSS-MR em preto e linígrafo em vermelho.

A Figura 52 contém as informações de união das séries temporais e geração do erro de altura. Olhando a série conclui-se que os resultados são promissores visto que em todo o período contínuo tem-se alta correspondência visual entre as séries temporais. O erro apresenta picos isolados onde há breves interrupções no linígrafo, como por exemplo próximo a 2019,05. Porém, o erro em geral não ultrapassa 20 centímetros em valor absoluto, com EMQ de 7,5 cm. Outra observação relevante é quanto aos degraus que podem ser observados após os dois eventos de manutenção do linígrafo, com início em 2019,4 e 2019,6. Há um offset nos erros onde, a partir do período contínuo, as séries temporais pararam de coincidir. Isso é devido à recalibração do linígrafo.

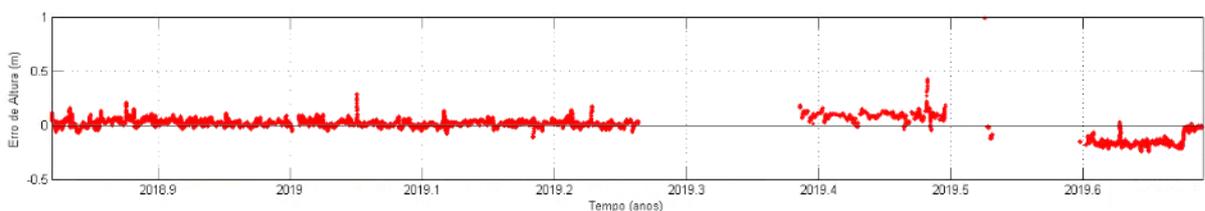


Figura 52 – Séries temporais do erro de altura entre GNSS-R e linígrafo

Tabela 3. Análise estatística.

Coefficiente de correlação	EMQ
0,957	0,075 m

Na Figura 53 observa-se a dispersão dos dados do GNSS-MR e do linígrafo. A Figura 54 representa a diferença entre os valores encontrados nas séries. Em ambas as figuras nota-se que há um espaçamento entre os dados, referente aos degraus identificados na série temporal. Para isso observou-se em qual período teria ocorrido, visto que na Figura 51 foi possível detectar um período de falha do linígrafo, e com os resultados da dispersão supõe-se a existência de uma possível alteração na altura do sensor. Conforme descrito anteriormente, houve um contato com a SEMA, mas o técnico que efetuou a manutenção estava em trabalho de campo, e nenhum outro profissional soube informar se o equipamento sofreu alguma troca. O que se sabe é que houve uma interferência no local, que se supõe ter ocasionado uma mudança na cota. O órgão informou ainda que eventualmente ocorrem esses degraus devido à calibração, mas não informaram se esta informação é disponibilizada na página oficial de download dos dados. Ressalta-se a estabilidade do sensor refletométrico e sua utilidade para identificação de offsets no linígrafo.

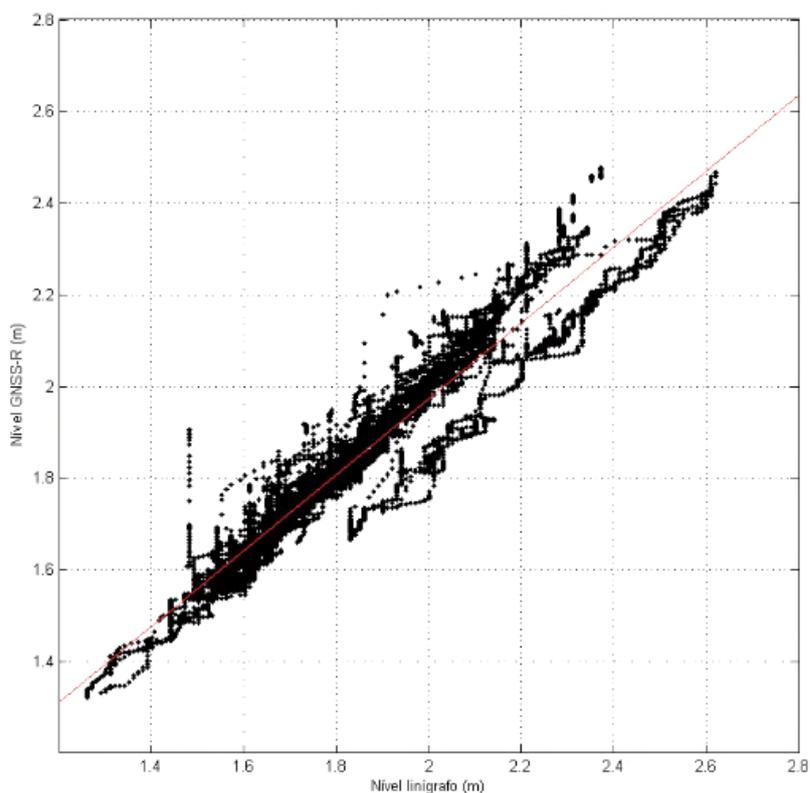


Figura 53 - Dispersão dos dados do GNSS-MR versus dados do linígrafo.

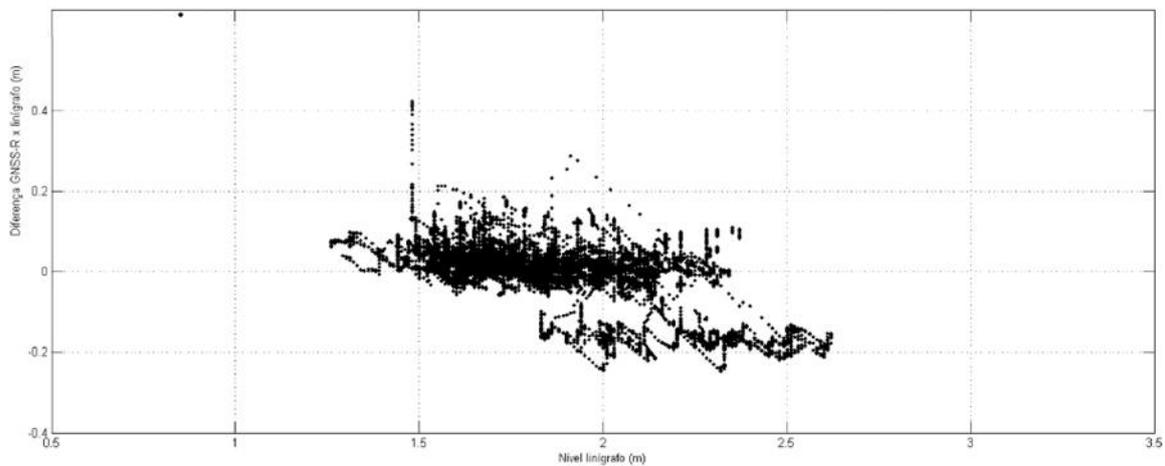


Figura 54 - Diferença entre os dados: GNSS-MR versus linígrafo.

Para o período completo, foi possível estimar a resolução temporal média do sensor GNSS-R. Devido a dependência da órbita dos satélites, o espaçamento entre a aquisição dos dados é irregular. Em determinados períodos do dia, pode-se obter dados de vários satélites simultaneamente, porém em outros momentos pode haver lacunas devido à ausência de satélites no azimute e na elevação de interesse. Neste sentido, elaborou-se a Figura 55 que apresenta os períodos médios de observação, e a porcentagem de medições que se enquadram neste intervalo. Para o período de 11 meses, obteve-se 13197 medições, com média de 40 estimativas por dia. Pode-se concluir que o intervalo de duas horas seria o máximo de tempo entre aquisição de dados. A cada 30 minutos é possível ter uma estimativa para metade das observações.

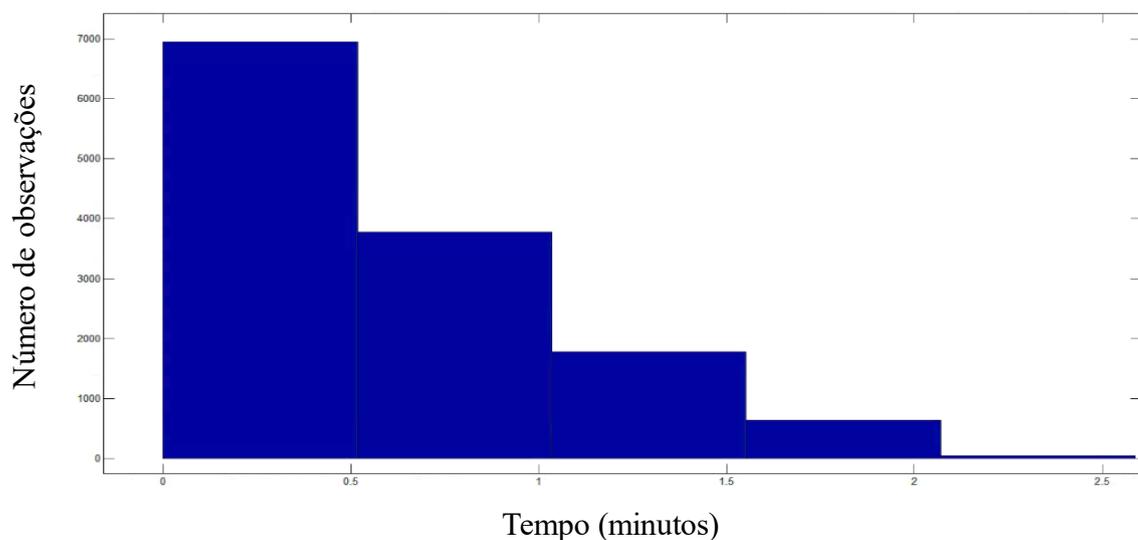


Figura 55 – Resolução temporal média

Tabela 4. Resolução temporal média, em termos de percentis do espaçamento temporal entre estimativas

50%	90%	99%
28,2946 min	74,9869 min	112,4318 min

4.3.3 Análise temporal reduzida

A comparação reduzida (sem lacunas) entre as séries temporais foi realizada considerando o período de 27 de outubro de 2018 a 23 de março de 2019. Nestes 147 dias o linígrafo apresentou interrupções de funcionamento em curtos intervalos, influenciando bem menos na precisão da correlação do que se fosse considerado o período de onze meses medidos pelo GNSS-MR.

Como havia uma diferença de referencial entre as séries e objetivando comparar as mesmas, calculou-se uma diferença de seus valores médios. Assim, as duas passaram a ter valores comparáveis de altura. A Figura 56 mostra as séries temporais consideradas, com inversão filtrada, e intervalo de elevação entre 15 e 35 graus. A Figura 57 representa a dispersão entre os dados das duas séries, e a Figura 58 mostra a diferença entre os valores de altura obtidos para GNSS-MR e linígrafo.

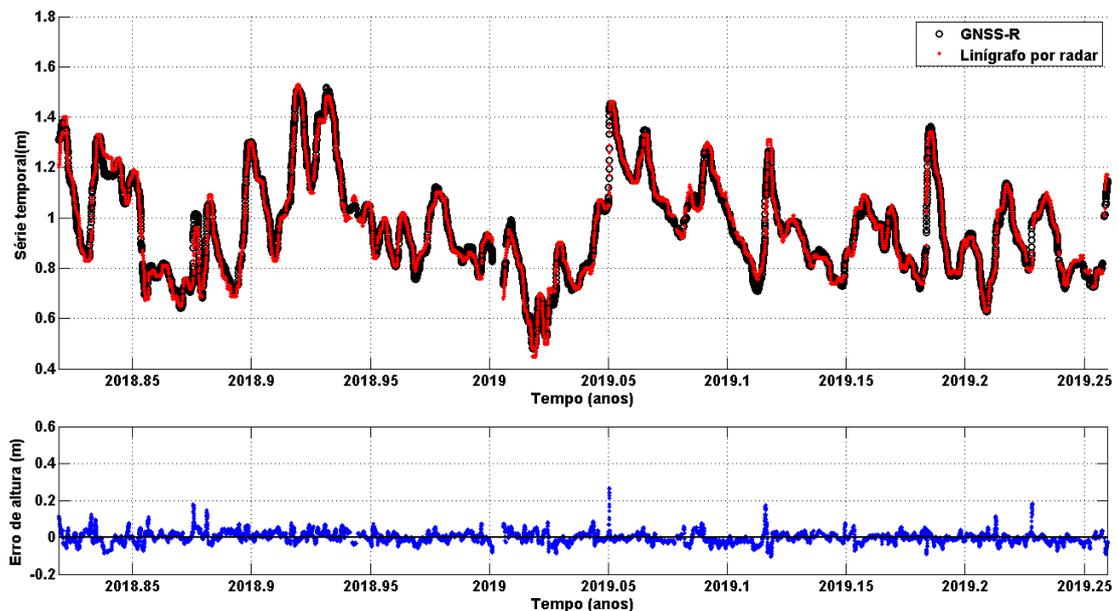


Figura 56 - Série temporal do período reduzido

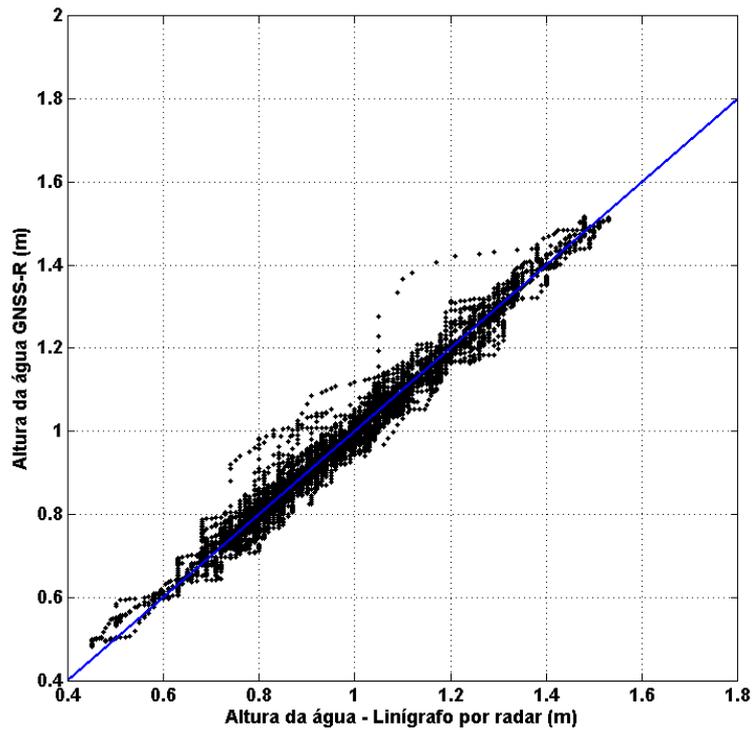


Figura 57 - Gráfico de dispersão para o período reduzido

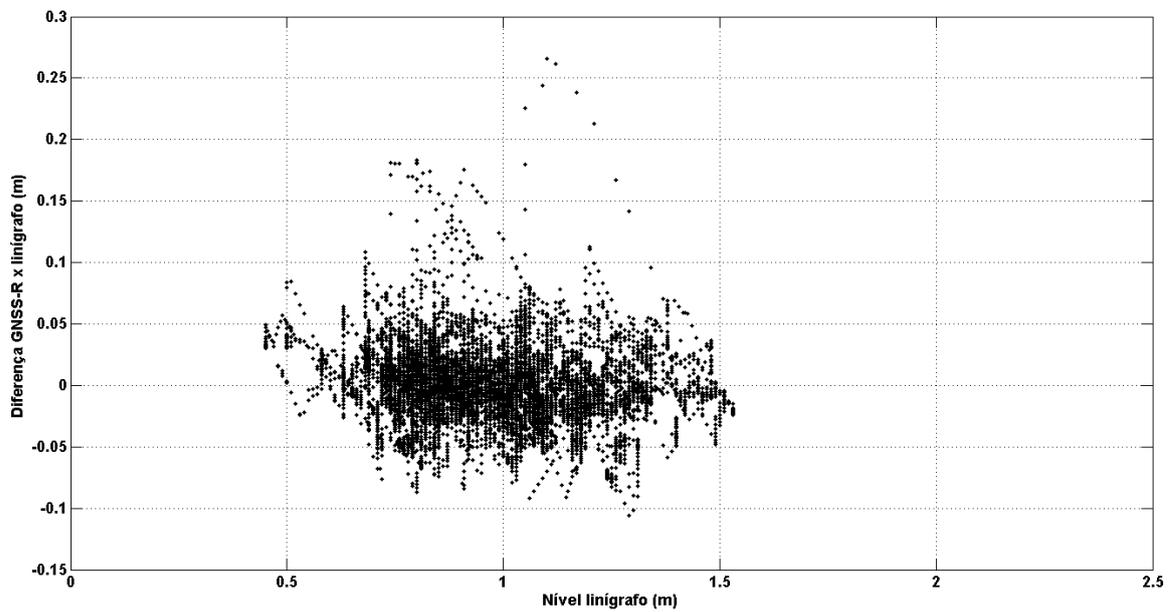
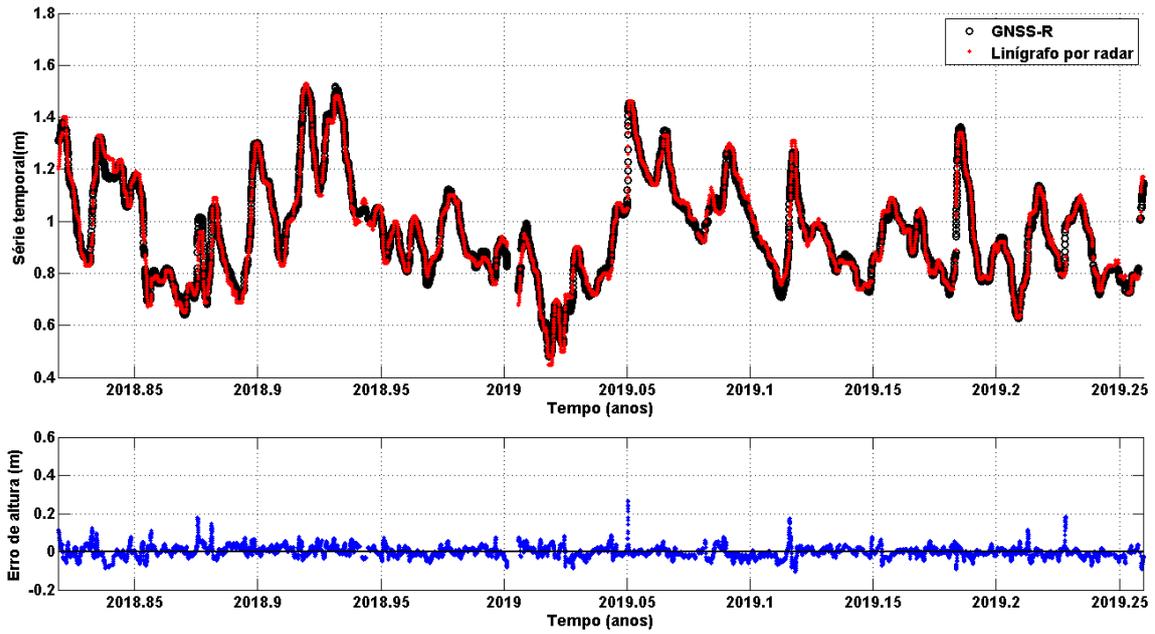


Figura 58 - Diferença para o período reduzido

Os erros encontrados para os novos dados apresentam-se mais promissores. Pode-se dizer que caso o linígrafo tivesse funcionamento regular em todo o período, a correlação poderia ser ainda maior.



Observando a representação dos erros em vermelho, pode-se afirmar que caso o linígrafo não apresentasse falhas, o erro de altura diminuiria, fazendo com que a correlação aumentasse. Neste caso, pode-se considerar a seleção com séries mensais para avaliar com mais precisão a correlação obtida por radar e por refletometria. Neste trabalho optou-se por trabalhar com a maior série temporal possível e observar a estatística envolvida no período. Pode-se concluir que o EMQ diminui para 2,9 cm quando o linígrafo opera corretamente.

Tabela 5. Estatística da série temporal reduzida

Coeficiente de correlação	EMQ
0,989	0,029 m

5. CONCLUSÕES

A partir da metodologia empregada pode-se concluir que o sensor GNSS-R de código aberto e de baixo custo atendeu a expectativa de monitorar o nível da superfície da água para a região de teste, localizada no Rio Guaíba, com precisão melhor que decimétrica. Considerando os resultados expostos, entende-se que os componentes de hardware e software apresentados foram suficientes para a aplicação. O painel solar que melhor cumpriu o suprimento da energia foi de tamanho médio, correspondendo a uma potência de 6 W. A instalação permanente encontra-se em funcionamento há mais de um ano, sem apresentar falhas.

A cobertura da técnica no local de estudo permitiu um alcance horizontal de até 11 m, com elevação mínima de 15° para os satélites, considerando que a antena está há uma distância vertical aproximada de 3 m da água. A elevação mínima foi estabelecida em função da presença de árvores e prédios na região de entorno, o que interferiria negativamente no sinal. Porém, em ambientes livres, poder-se-á considerar elevações menores e obter um alcance maior.

Quanto às análises de inversão conclui-se que o resultado encontrado, desconsiderando o intervalo com lacunas observacionais, configurou a inversão com dados brutos e a comparação com suavização das séries temporais. Nestes o coeficiente de correlação foi de 0,989 e EMQ de 2,9 cm. Detectou-se offsets de recalibração devido a manutenções no linígrafo, o que mostrou que o mesmo pode ser complementado pelas informações do sensor GNSS-R.

A partir da validação conclui-se que os dados coletados continuamente por onze meses, apresentam uma boa perspectiva para futuras instalações. Mesmo com precisão centimétrica, o sensor GNSS-R será capaz de manter a série temporal em momentos que o dispositivo consolidado apresentar falhas, assim como garantir dados em locais inacessíveis ou de difícil instalação.

A metodologia propôs a medição de séries longas através do monitoramento das oscilações do nível da água, entretanto vê-se outras possibilidades de aplicações com o sensor envolvendo estudos relacionados às forçantes geradoras, ventos e precipitação. Uma futura melhora na precisão pode ser considerada quando modelos da troposfera forem elaborados, e consigam esclarecer qual a magnitude do erro inserido pela troposfera.

Durante a campanha permanente, constatou-se que o sensor foi capaz de manter-se ininterruptamente e o painel solar foi suficiente durante os períodos nublados, assim como a estrutura mecânica suportou todas as intempéries presentes nas quatro estações do ano. Sabendo disso, elaborou-se no grupo de pesquisa um tutorial para servir de base e outros pesquisadores que almejam trabalhar com a técnica de GNSS-R utilizando um sensor de código-aberto. No

documento, disponível na internet via github, apresenta-se todos os componentes, fornece-se o passo-a-passo da montagem e instalação, assim como insere-se os códigos utilizados. Todos os documentos mencionados abaixo estão disponibilizados publicamente em: <https://github.com/fgnievinski/mphw>

Afirma-se que a campanha permanente, estação refletométrica experimental, será a nível de Brasil a primeira com a finalidade de monitorar a altura da superfície da água via GNSS-R. Em termos de baixo custo, acredita-se ser a pioneira no mundo cuja série temporal obtida possuirá mais de um ano de medições contínuas. A partir desta atitude espera-se promover mais a técnica de GNSS-R no país, assim como as aplicações para medição do nível da água à distância. O baixo custo torna viável a criação de uma rede de sensores refltométricos que monitorem à distância a altura da água, fazendo com que se tenha mais dados como subsídio para estratégias e planos de mitigação. Neste contexto aceita-se a hipótese de viabilidade científica e financeira, visto que o sensor apresentou boa precisão e mostrou-se viável para ser reproduzido em campanhas.

Para trabalhos futuros recomenda-se o estudo do padrão de ganho da antena experimental, que poderá ser um fator de melhora no cálculo da altura da superfície da água. Algumas restrições também puderam ser notadas e futuramente melhoradas, dentre elas a transmissão do sinal via internet, para que se possa acompanhar o monitoramento em tempo real. Para isso deve-se incluir o custo dos equipamentos a serem acoplados e reaver o valor do sensor. Por fim, restam as novas instalações permanentes costeiras, que foram implementadas e mereceriam ser analisadas oportunamente (Apêndice D - Campanhas iniciadas).

Há distinções a serem consideradas na metodologia quando se monitora o mar, pois neste caso tem-se ondas de maior amplitude devido à região ser mais ventosa, há mais complexidade na instalação, além da necessidade de um marégrafo próximo ao local com disponibilidade dos dados.

REFERÊNCIAS

ADAMS, Jake *et al.* **FROS-D: Free-Standing Receiver of Snow Depth (Aerospace Engineering Sciences Senior Design Project)**. [S. l.]: University of Colorado Boulder, Department of Aerospace Engineering Sciences, 2013. Disponível em: <http://web.archive.org/web/20131023112502/http://aeroprojects.colorado.edu/projects1.shtml>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Medindo as Águas do Brasil – Noções de Plu e Fluviometria**. [S. l.: s. n.] Disponível em: https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/122/1/_Apostila_Medindo_as_%C3%81guas_-_ANA.pdf. Acesso em: 10 nov. 2019.

ALONSO ARROYO, Alberto *et al.* Dual-Polarization GNSS-R Interference Pattern Technique for Soil Moisture Mapping. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, [S. l.], v. 7, n. 5, p. 1533–1544, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2320792>

ALONSO-ARROYO, A. *et al.* Retrieval of Significant Wave Height and Mean Sea Surface Level Using the GNSS-R Interference Pattern Technique: Results From a Three-Month Field Campaign. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [S. l.], v. 53, n. 6, p. 3198–3209, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2371540>

ANDRADE, Mauro Michelena; TOLDO, Elírio Ernestino; NUNES, José Carlos Rodrigues. Tidal and subtidal oscillations in a shallow water system in southern Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**, [S. l.], v. 66, n. 3, p. 245–254, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1679-87592018017406603>

BEVIS, Michael; SCHERER, Wolfgang; MERRIFIELD, Mark. Technical Issues and Recommendations Related to the Installation of Continuous GPS Stations at Tide Gauges. **Marine Geodesy**, [S. l.], v. 25, n. 1–2, p. 87–99, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/014904102753516750>

BIAGI, Ludovico; GREC, Florin; NEGRETTI, Marco. Low-Cost GNSS Receivers for Local Monitoring: Experimental Simulation, and Analysis of Displacements. **Sensors**, [S. l.], v. 16, n. 12, p. 2140, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s16122140>

BOATENG, I. **Spatial Planning in Coastal Regions: Facing the Impact of Climate Change**. Copenhagen: International Federation of Surveyors (FIG), 2010. *E-book*.

BRASIL. **LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997**. 8 jan. 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm. Acesso em: 24 mar. 2020.

CAMPBELL. **CS475A - Radar Water Level Sensor. Product Manual**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cs475a.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2020.

CAZENAVE, A. Present-day sea level change: Observations and causes. **Reviews of Geophysics**, [S. l.], v. 42, n. 3, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2003RG000139>. Acesso em: 4 out. 2018.

CEIC, Centro Integrado de Comando. Cheia no Guaíba é terceira maior desde a enchente de 41. In: BOLETIM ESPECIAL - CHEIA NO LAGO GUAÍBA. 23 jul. 2015. Disponível em: http://www2.portoalegre.rs.gov.br/ceic/default.php?reg=1121&p_secao=4. Acesso em: 29 set. 2019.

CHEN, Qiang; WON, Daehee; AKOS, Dennis M. Snow depth sensing using the GPS L2C signal with a dipole antenna. **EURASIP Journal on Advances in Signal Processing**, [S. l.], v. 2014, n. 1, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/1687-6180-2014-106>. Acesso em: 27 mar. 2020.

CHEN, Qiang; WON, Daehee; AKOS, Dennis M. Snow depth estimation accuracy using a dual-interface GPS-IR model with experimental results. **GPS Solutions**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 211–223, 2017 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0517-1>

CHEN, Quiang. **Optimization of GPS Interferometric Reflectometry for Remote Sensing**. 2016. PhD thesis - University of Colorado Boulder, [s. l.], 2016. Disponível em: https://scholar.colorado.edu/concern/graduate_thesis_or_dissertations/3n203z29w

CIPOLLINI, Paolo *et al.* Monitoring Sea Level in the Coastal Zone with Satellite Altimetry and Tide Gauges. **Surveys in Geophysics**, [S. l.], v. 38, n. 1, p. 33–57, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10712-016-9392-0>

ELSHAROUNY, Mohamed Ramadan Mohamed Mahrous. Planning Coastal Areas and Waterfronts for Adaptation to Climate Change in Developing Countries. **Procedia Environmental Sciences**, [S. l.], v. 34, p. 348–359, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.031>

FABRA, Fran *et al.* WAVPY: A GNSS-R open source software library for data analysis and simulation. In: 2017 IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS)WAVPY 2017, Fort Worth, TX. **2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**. Fort Worth, TX: IEEE, 2017. p. 4125–4128. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8127908>. Acesso em: 31 mar. 2020.

GARRISON, James L. *et al.* GNSS Reflectometry for Earth Remote Sensing. In: **POSITION, NAVIGATION, AND TIMING TECHNOLOGIES IN THE 21ST CENTURY: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications**. [S. l.]: JOHN WILEY, 2019. v. 2p. 100. *E-book*.

GEREMIA-NIEVINSKI, Felipe *et al.* GPS Diffractive Reflectometry: Footprint of a Coherent Radio Reflection Inferred From the Sensitivity Kernel of Multipath SNR. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, [S. l.], v. 9, n. 10, p. 4884–4891, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2579599>

GREGORY, Jonathan M. *et al.* Concepts and Terminology for Sea Level: Mean, Variability and Change, Both Local and Global. **Surveys in Geophysics**, [S. l.], v. 40, n. 6, p. 1251–1289, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09525-z>

GUTMANN, Ethan D. *et al.* Snow measurement by GPS interferometric reflectometry: an evaluation at Niwot Ridge, Colorado: GPS-IR SNOW MEASUREMENT AT NIWOT RIDGE.

Hydrological Processes, [S. l.], v. 26, n. 19, p. 2951–2961, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.8329>

HALL, C. D.; CORDEY, R. A. Multistatic Scatterometry. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, “REMOTE SENSING: MOVING TOWARD THE 21ST CENTURY”. 1988, Edinburgh, UK. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium, “Remote Sensing: Moving Toward the 21st Century”**. Edinburgh, UK: IEEE, 1988. p. 561–562. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1988.570200>. Acesso em: 6 jan. 2020.

HOBIGER, T.; HAAS, R.; LÖFGREN, J. S. GLONASS-R: GNSS reflectometry with a Frequency Division Multiple Access-based satellite navigation system. **Radio Science**, [S. l.], v. 49, n. 4, p. 271–282, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2013RS005359>

HOBIGER, Thomas; HAAS, Rudiger; LOFGREN, Johan. Software-Defined Radio Direct Correlation GNSS Reflectometry by Means of GLONASS. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, [S. l.], v. 9, n. 10, p. 4834–4842, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2529683>

IBGE. **Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos em território brasileiro**. 21 jul. 1983. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/metodos-e-outros-documentos-de-referencia/normas/16463-especificacao-e-normas-gerais-para-levantamentos-geodesicos-em-territorio-brasileiro.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 8 mar. 2018.

KATZBERG, Stephen J.; GARRISON, JR, James L. **Utilizing GPS To Determine Ionospheric Delay Over the Ocean**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.78.367&rep=rep1&type=pdf>

LARSON, K. M. *et al.* The Accidental Tide Gauge: A GPS Reflection Case Study From Kachemak Bay, Alaska. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, [S. l.], v. 10, n. 5, p. 1200–1204, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2236075>

LARSON, Kristine M. GPS interferometric reflectometry: applications to surface soil moisture, snow depth, and vegetation water content in the western United States: GPS interferometric reflectometry. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, [S. l.], v. 3, n. 6, p. 775–787, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wat2.1167>

LARSON, Kristine M.; LÖFGREN, Johan S.; HAAS, Rüdiger. Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver. **Advances in Space Research**, [S. l.], v. 51, n. 8, p. 1301–1310, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.017>

LARSON, Kristine M.; NIEVINSKI, Felipe G. GPS snow sensing: results from the EarthScope Plate Boundary Observatory. **GPS Solutions**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 41–52, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0259-7>

LARSON, Kristine M.; RAY, Richard D.; WILLIAMS, Simon D. P. A 10-Year Comparison of Water Levels Measured with a Geodetic GPS Receiver versus a Conventional Tide Gauge. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, [S. l.], v. 34, n. 2, p. 295–307, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0101.1>

LESTARQUIT, Laurent *et al.* Reflectometry With an Open-Source Software GNSS Receiver: Use Case With Carrier Phase Altimetry. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, [S. l.], v. 9, n. 10, p. 4843–4853, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2568742>

LÖFGREN, J. S. *et al.* Three months of local sea level derived from reflected GNSS signals: THREE MONTHS OF GNSS-DERIVED LOCAL SEA LEVEL. **Radio Science**, [S. l.], v. 46, n. 6, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2011RS004693>. Acesso em: 10 out. 2018.

LÖFGREN, Johan S.; HAAS, Rüdiger. Sea level measurements using multi-frequency GPS and GLONASS observations. **EURASIP Journal on Advances in Signal Processing**, [S. l.], v. 2014, n. 1, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/1687-6180-2014-50>. Acesso em: 10 out. 2018.

LÖFGREN, Johan S.; HAAS, Rüdiger; SCHERNECK, Hans-Georg. Sea level time series and ocean tide analysis from multipath signals at five GPS sites in different parts of the world. **Journal of Geodynamics**, [S. l.], v. 80, p. 66–80, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2014.02.012>

MARTÍN-NEIRA, M. A. Passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry. **Passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry**, ESA Journal, 1993. 17, p. 27.

MATTHÄUS, Wolfgang. On the History of Recording Tide Gauges. **Proceedings of the Royal Society of Edinburgh. Section B. Biology**, [S. l.], v. 73, p. 26–34, 1972. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S0080455X00002083>

MÉSZÁROS, J. AERIAL SURVEYING UAV BASED ON OPEN-SOURCE HARDWARE AND SOFTWARE. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, [S. l.], v. XXXVIII-1/C22, p. 155–159, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-155-2011>

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, Brasil. **PROCOSTA: Programa Nacional para Conservação da Linha de Costa**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://www.mma.gov.br/gestao-territorial/gerenciamento-costeiro/procosta2>

MONICO, João Francisco Galera. **Posicionamento pelo GNSS descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2007. *E-book*.

MOTTE, Erwan *et al.* Applications of GNSS-R in Continental Hydrology. In: **Land Surface Remote Sensing in Continental Hydrology**. [S. l.]: Elsevier, 2016. p. 281–322. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-104-8.50009-7>. Acesso em: 6 out. 2018.

MUNHOZ, Sérgio. **Decreta situação de emergência nas áreas do município de Elorado do Sul afetadas por inundação (COBRADE 12.100) e dá outras providências**20. 2016. Disponível em: http://www.eldorado.rs.gov.br/uploads/pagina/arquivos/Decreto_Pagina-1.jpg. Acesso em: 16 set. 2019.

NICHOLLS, Robert. Planning for the Impacts of Sea Level Rise. **Oceanography**, [S. l.], v. 24, n. 2, p. 144–157, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5670/oceanog.2011.34>

NICOLODI, João Luiz. **O Padrão de ondas no lago Guaíba e sua influência nos processos de sedimentação**. 2007. Tese - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

NICOLODI, João Luiz; TOLDO JR, Elirio E.; FARINA, Leandro. Dynamic and resuspension by waves and sedimentation pattern definition in low energy environments: guaíba lake (Brazil). **Brazilian Journal of Oceanography**, [S. l.], v. 61, n. 1, p. 55–64, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1679-87592013000100006>

NIEVINSKI, Felipe G.; LARSON, Kristine M. Forward modeling of GPS multipath for near-surface reflectometry and positioning applications. **GPS Solutions**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 309–322, 2014 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10291-013-0331-y>

NIEVINSKI, Felipe G.; LARSON, Kristine M. An open source GPS multipath simulator in Matlab/Octave. **GPS Solutions**, [S. l.], v. 18, n. 3, p. 473–481, 2014 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0370-z>

NIEVINSKI, Felipe G.; LARSON, Kristine M. Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Depth Estimation—Part I: Formulation and Simulations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [S. l.], v. 52, n. 10, p. 6555–6563, 2014 d. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2297681>

NIEVINSKI, Felipe G.; LARSON, Kristine M. Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Depth Estimation—Part II: Application and Validation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [S. l.], v. 52, n. 10, p. 6564–6573, 2014 e. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2297688>

NIEVINSKI, Felipe Geremia. **Forward and Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Monitoring**. 2013. Tese de doutorado - University of Colorado Boulder, Colorado, 2013. Disponível em: https://scholar.colorado.edu/concern/graduate_thesis_or_dissertations/vh53wv88m. Acesso em: 17 out. 2018.

PENNA, Nigel T. *et al.* Sea Surface Height Measurement Using a GNSS Wave Glider. **Geophysical Research Letters**, [S. l.], v. 45, n. 11, p. 5609–5616, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2018GL077950>

PÖRTNER, O. *et al.* **Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/technical-summary/>

RAINVILLE, Nicholas *et al.* Design and Preliminary Testing of the Volcanic Ash Plume Receiver Network. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 353–367, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-18-0177.1>

RECKZIEGEL, E. W.; WESCHENFELDER, J.; BAZZAN, T. Temporal and Spatial Dynamics of Floods in Guaíba Lake and Jacuí Delta (RS) Between 1940 and 2015. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, [S. l.], v. 41, n. 2, p. 499–519, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.11137/2018_2_499_519

RODRIGUES, E.; KASSER, M. Limnimétrie par réflectométrie GNSS à faible coût. **Geomatik Schweiz**, [S. l.], n. 8, p. 349–354, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5169/SEALS-389508>

RODRIGUES, F. S.; MORAES, A. O. ScintPi: A Low-Cost, Easy-to-Build GPS Ionospheric Scintillation Monitor for DASI Studies of Space Weather, Education, and Citizen Science Initiatives. **Earth and Space Science**, [S. l.], 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2019EA000588>. Acesso em: 6 out. 2018.

RODRIGUEZ-ALVAREZ, Nereida *et al.* Land Geophysical Parameters Retrieval Using the Interference Pattern GNSS-R Technique. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [S. l.], v. 49, n. 1, p. 71–84, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2049023>

ROESLER, Carolyn; LARSON, Kristine M. Software tools for GNSS interferometric reflectometry (GNSS-IR). **GPS Solutions**, [S. l.], v. 22, n. 3, 2018 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0744-8>. Acesso em: 15 jan. 2020.

ROUSSEL, N. *et al.* Simulations of direct and reflected wave trajectories for ground-based GNSS-R experiments. **Geoscientific Model Development**, [S. l.], v. 7, n. 5, p. 2261–2279, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/gmd-7-2261-2014>

ROVER, Simone; VITTI, Alfonso. GNSS-R with Low-Cost Receivers for Retrieval of Antenna Height from Snow Surfaces Using Single-Frequency Observations. **Sensors**, [S. l.], v. 19, n. 24, p. 5536, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s19245536>

RUMMEL, R.; ROTHACHER, M.; BEUTLER, G. Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS)—science rationale. **Journal of Geodynamics**, [S. l.], v. 40, n. 4–5, p. 357–362, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.06.003>

SANTAMARÍA-GÓMEZ, Alvaro *et al.* Levelling co-located GNSS and tide gauge stations using GNSS reflectometry. **Journal of Geodesy**, [S. l.], v. 89, n. 3, p. 241–258, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00190-014-0784-y>

SEMMLING, A. M. *et al.* Detection of Arctic Ocean tides using interferometric GNSS-R signals: ARCTIC OCEAN TIDES DETECTED WITH GNSS-R. **Geophysical Research Letters**, [S. l.], v. 38, n. 4, p. n/a-n/a, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2010GL046005>

STRANDBERG, Joakim; HAAS, Rudiger. Can We Measure Sea Level With a Tablet Computer? **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, [S. l.], p. 1–3, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2957545>

TAMISIEA, Mark E. *et al.* Sea level: measuring the bounding surfaces of the ocean. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [S. l.], v. 372, n. 2025, p. 20130336, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0336>

TEUNISSEN, Peter J. G.; MONTENBRUCK, Oliver (org.). **Springer handbook of global navigation satellite systems**. Cham: Springer, 2017. (Springer handbook). *E-book*.

UNITED NATIONS; OFFICE FOR OUTER SPACE AFFAIRS. **The interoperable global navigation satellite systems space service volume**. [S. l.: s. n.]. *E-book*.

ZAVOROTNY, Valery U. *et al.* Tutorial on Remote Sensing Using GNSS Bistatic Radar of Opportunity. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, [S. l.], v. 2, n. 4, p. 8–45, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MGRS.2014.2374220>

ZIMMERMANN, Florian *et al.* GPS Multipath Analysis Using Fresnel Zones. **Sensors**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 25, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s19010025>

APÊNDICES

Apêndice A – Rotina de inversão

%% busca configurações de inversão:

```
sett = snr_inv_settings();
```

%% Configura pastas onde ficarão salvos os arquivos:

```
sett.inv.path.in = 'C:\Users\manue\Documents\MATLAB\matlab_2015_2\inv\in\';  
sett.inv.path.in = 'C:\Users\Manuella\Documents\MATLAB\matlab_2015_2\inv\in\';  
sett.inv.path.orb = 'C:\Users\Manuella\Documents\MATLAB\matlab_2015_2\inv\orb\';  
sett.inv.path.out = 'C:\Users\Manuella\Documents\MATLAB\matlab_2015_2\inv\out\';  
sett.inv.path.qc = 'C:\Users\Manuella\Documents\MATLAB\matlab_2015_2\inv\qc\';
```

%%Em caso de erro no download das efemérides, sites alternativos:

```
sett.inv.file.orb_ftp.host = 'gssc.esa.int';  
sett.inv.file.orb_ftp.dir = 'gnss/products/$week';
```

%% Configura estação: Verificar o arquivo de informações do padrão de ganho da antena

```
sett.inv.stn.code = 'SPH4';
```

%% Configura nome para a pasta

```
sett.inv.opt.session_name = 'Walle_CHI_out2018_set2019_elev_15_a_35';
```

%% Configura período de trabalho: datas inicial e final da série temporal

```
sett.inv.epoch.min = mydatetime([2018 10 27]);  
sett.inv.epoch.max = mydatetime([2019 09 09]);
```

%% Configura o sinal: fase da onda portadora e formato do arquivo

```
sett.inv.file.obs_code = 'GS1C'; % fase da onda  
sett.inv.file.format = 'NMEA'; % formato do arquivo
```

%% Configura outras opcoes gerais:

```
sett.inv.track.obs_type = 'filter'; % aplicar filtragem nos dados
sett.inv.track.filter.window_width = 0.1; % intervalo da janela móvel
sett.inv.track.filter.obs_spacing = 0.08/100; % espaçamento da janela
sett.inv.track.filter.hi_or_lo_pass = 'hi'; % filtragem passa alta ou baixa
sett.inv.track.filter.trend.poly_degree = 0; % grau do polinômio de filtragem
sett.inv.track.elev_lim = [15 35]; % intervalo de elevação
sett.inv.track.azim_lim = [280 90]; % intervalo de azimute
sett.ref.height_ant = 3; % estimativa de altura da antena
sett.bias.fit.height_domain = {[2 4], 0.01}; % intervalo de domínio para alturas
```

%% Configura gráficos:

```
sett.inv.plot.obs.ylim = 'auto'; % valores limite para o eixo y
sett.inv.plot.obs.xlim = [15 35]; % valores limite para o eixo x
sett.inv.plot.obs.prelim_or_final = 'both'; % apresentar resultado preliminar e final
sett.inv.plot.obs.caller = 'file'; % plotar gráficos todos ao final
```

%% define parametros a serem estimados:

```
sett.inv.solve.param.name = { ...
    'phase_bias_interf0' %viés de fase, relacionado ao valor de altura obtido
    'phase_bias_interf1'
    ...'phase_bias_interf2' %chirp = acompanha possível alteração da frequência ao longo
do tempo
```

```
    'power_bias_interf0' %[vetor] Coeficientes polinomiais do viés de potência
interferométrica Ordem zero = constante.
```

```
    'power_bias_interf1' primeira-ordem = mudança linear;
    'power_bias_interf2' segunda-ordem = mudança quadrática;
    ...'power_bias_interf3' terceira ordem = mudança cúbica.
```

```
    'power_bias_direct0' %[vetor] Coeficientes polinomiais do viés de potência direta
'power_bias_direct1' primeira-ordem = mudança linear;
    'power_bias_direct2' segunda-ordem = mudança quadrática.
```

```
};
```

```
%% Tipo de material da superfície medida:
```

```
sett.sfc.material_bottom = 'freshwater';
```

```
%% Executa a inversão:
```

```
setupi = snr_inv_setup(sett);
```

```
resulti = snr_inv(setupi);
```

Apêndice B – Orçamento do hardware

	2.1mm female/male barrel jack extension cable - 1.5m / 5 ft	\$2.95	1
	GPS Antenna - External Active Antenna - 3-5V 28dB 5 Meter SMA	\$14.95	1
	CR1220 12mm Diameter - 3V Lithium Coin Cell Battery - CR1220	\$0.95	1
	SMA to uFL/u.FL/IPX/IPEX RF Adapter Cable	\$3.95	1
	Header Kit for Feather - 12-pin and 16-pin Female Header Set	\$0.95	1
	Adafruit Ultimate GPS FeatherWing	\$39.95	1
	Adafruit Feather 32u4 Adalogger	\$21.95	1
	Lithium Ion Battery Pack - 3.7V 4400mAh	\$19.95	1
	3.5 / 1.3mm or 3.8 / 1.1mm to 5.5 / 2.1mm DC Jack Adapter Cable	\$0.95	1
	Waterproof DC Power Cable Set - 5.5/2.1mm	\$2.50	1
	10K Precision Epoxy Thermistor - 3950 NTC	\$4.00	1
	Cable Gland PG-9 size - 0.158" to 0.252" Cable Diameter - PG-9	\$1.95	1
	USB / DC / Solar Lithium Ion/Polymer charger - v2	\$17.50	1
	Short Headers Kit for Feather - 12-pin + 16-pin Female Headers	\$1.50	1
	Large Plastic Project Enclosure - Weatherproof with Clear Top	\$19.95	1

	Huge 6V 6W Solar panel - 6.0 Watt	\$59.00	1
	Through-Hole Resistors - 2.2K ohm 5% 1/4W - Pack of 25	\$0.00	0
	Cable Gland PG-7 size - 0.118" to 0.169" Cable Diameter - PG-7	\$1.95	1
	2.1mm to 2.5mm DC Barrel Plug Adapter	\$0.95	1
COMBINED TOTAL		\$215.85	

Orçamento do suporte

	Suporte para antena torre	R\$65,90	1
	Mastro de madeira	R\$20,00	1
	Parafusos, porcas e arruelas	R\$15,00	6, 10 e 10
	Braçadeira	R\$15,00	1
	Parabolt – chumbador mecânico	R\$10,00	4
Total		125,9	

Apêndice C – Sistema de energia

O circuito foi dimensionado através da verificação do consumo diário de energia. Objetivamos fazer o sistema atender às necessidades consumindo o mínimo possível. Considera-se 3,3V é o valor de tensão padrão do arduino, de acordo com a tabela abaixo.

Dimensionamento de consumo do circuito

Consumo medido	
Corrente total média	90mA
Potência total	90mA*3,3V = 297mW
Tempo de uso por dia	19h
Consumo de energia diário	297mW * 19h = 5643mWh

A bateria deve durar pelo menos um dia, com autonomia durante a noite, antes de ser recarregada ao nascer do sol. Para garantia em dias sem sol, especifica-se a duração desejável em um dia e meio. A equação seguinte apresenta as variáveis envolvidas no dimensionamento da bateria.

$$DDB = \frac{CDB}{CDC}$$

Onde:

DDB = duração da bateria em horas

CDB = capacidade da bateria em ampére por hora

CDC = consumo de corrente em ampéres

Invertemos a equação para dimensionar a bateria necessária, conforme a próxima equação. A tabela abaixo apresenta o cálculo da capacidade do GPS de acordo com a necessidade do trabalho.

Capacidade	
Corrente total	90mA
Duração desejada	36h
Capacidade necessária	90mA*36h = 3240mAh

Para o dimensionamento do painel utilizou-se a equação abaixo.

$$E_{SD} = PPS * \frac{DLSL}{2}$$

Onde:

ESD = energia solar diária em Watt por hora

PPS = Potência do painel solar em Watt

Duração de luz solar diária = DLSD em hora

2 é equivalente a um fator de perda

Para o cálculo do painel solar invertemos a equação e determinamos a potência do painel a ser adquirido. Supomos a duração da luz solar por dia igual a 5h. Este fator varia com a época do ano (entre verão e inverno) e com a posição geográfica (próximo do equador ou dos pólos). A tabela abaixo apresenta os resultados dos cálculos envolvidos na estimativa do painel.

Estimativa do painel

Painel estimado	
Consumo de energia diário	5643mWh
Potência do painel solar	$2 * 5643mWh / 5h = 2257,2mW$

Sugestão de produto: painel de 3,5W.

O ideal é que a bateria seja recarregada completamente pelo painel durante as horas de sol de um único dia. Porém o painel solar, assim como o recarregador solar, tem uma taxa máxima de recarga. Lembrando que a capacidade da bateria é dimensionada para durar mais de um dia, com autonomia em dias nublados. Nestes casos o painel solar precisa recarregar não apenas a bateria para o consumo do circuito do dia seguinte, mas para o período inteiro de autonomia. A tabela seguinte apresenta os cálculos e variáveis envolvidas na projeção do consumo.

Projeção do consumo

Consumo medido	
Corrente total média	930mA
Potência do painel	6W
Tempo de uso por dia (tempo médio de sol)	5h
Consumo de energia para recarregar a bateria	4400mAh
Tempo para carregar a bateria	$4400\text{mAh}/930\text{mA} = 4,7\text{h}$

O modelo de 6,0W produz 930 mA. Para a bateria de 4400mAh o painel levaria 4,7h ($4400\text{mAh}/930\text{mA}$) para carregar. Portanto, o painel de 6W é suficiente para garantir a autonomia.

Apêndice D - Campanhas iniciadas

O Brasil possui uma zona costeira com aproximadamente 8500km de extensão, porém o IBGE possui apenas cinco estações maregráficas ativas. O que significa que não temos, a nível federal e com disponibilidade de dados, a especialização necessária para prever eventos com precisão para cada cidade costeira.

Uma dificuldade encontrada quando se trata de monitoramento em regiões costeiras é a instalação e manutenção dos equipamentos. A instalação muitas vezes é complexa, fica suscetível a vandalismos e às condições climáticas. Mantê-los em funcionamento é um desafio, visto que há necessidade de um monitoramento constante e de equipes de supervisão e conferência dos dispositivos. Além do fato dos marégrafos serem instrumentos que necessitam estar em contato com a água, ou sobre ela, para efetuar as medições, o que muitas vezes dificulta sua fixação.

Após a validação do sensor GNSS-R no Rio Guaíba, algumas campanhas foram iniciadas com o intuito de obter dados do nível do mar com o mesmo dispositivo. A primeira campanha permanente no mar foi realizada em Imbituba, cujo dispositivo contou com a mesma estrutura física da estação refletométrica experimental localizada no Cais Mauá (Rio Guaíba). A estrutura foi fixada no Porto de Imbituba (figuras Figura 59 e Figura 60), em um local onde não há arrebentação, próximo ao marégrafo do IBGE.



Figura 59- Localização da estação refletométrica experimental de Imbituba

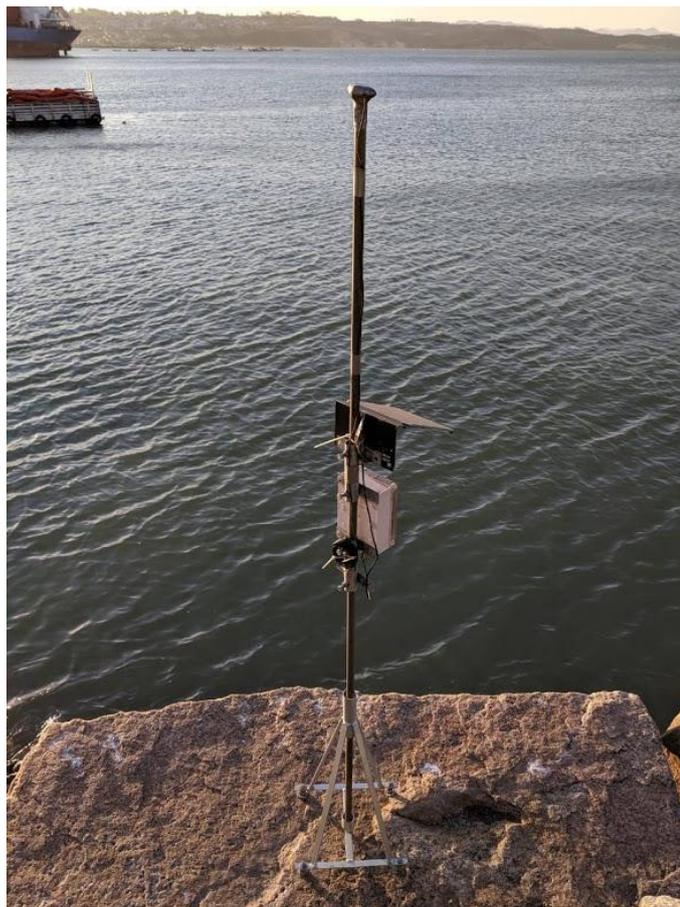


Figura 60- Estação refletométrica experimental de Imbituba

A segunda instalação foi realizada na plataforma de Balneário Rincão (Figura 61). A estrutura conta com um marégrafo da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri), cujos dados são disponibilizados via preenchimento de formulário de solicitação na página web do órgão. As estruturas físicas dos dispositivos instalados em Balneário Rincão diferiram das instalações no Cais Mauá e em Imbituba devido às condições apresentadas pela plataforma. Na primeira estação instalada, Figura 62, observa-se que a antena foi inserida junto ao mastro de um receptor geodésico presente no teto da estrutura da plataforma. O segundo dispositivo foi instalado no ponto o mais próximo possível da ponta da plataforma, almejando-se assim coletar dados medidos para além da zona de arrebentação.



Figura 61 - Localização das estações de Balneário Rincão



Figura 62 - Sensor GNSS-R fixo em Balneário Rincão

Para aplicações no mar algumas variáveis antes desconsideradas, em função do ambiente controlado do Rio, devem ser observadas como a amplitude das ondas, o intervalo de elevação do satélite e a corrosão da estrutura. A maresia causa corrosão em materiais como ferro, e para a instalação permanente deve-se explorar opções de materiais resistentes ao clima costeiro.

Espera-se que a produção em série destes equipamentos de baixo custo e fácil instalação contribua para uma melhor espacialização e, conseqüentemente, a aquisição de uma série temporal mais longa. Via sensoriamento remoto proximal pode-se utilizar o sensor GNSS-R para monitorar à distância as características de determinado alvo.

Apêndice E – Mapa de localização da instalação no Cais Mauá

