

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LÍVIA FARIA SAMPAIO

PROPOSTA DE SOLUÇÃO EMPREGANDO SMARTPHONES PARA APOIO AO
PLANEJAMENTO DE REDE DE MONITORAMENTO GEODÉSICO

CURITIBA

2024

LÍVIA FARIA SAMPAIO

PROPOSTA DE SOLUÇÃO EMPREGANDO SMARTPHONES PARA APOIO AO
PLANEJAMENTO DE REDE DE MONITORAMENTO GEODÉSICO

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga

Coorientadora: Prof. Dr^a. Regiane Dalazoana

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Sampaio, Livia Faria

Proposta de solução empregando smartphones para apoio ao planejamento de rede de monitoramento geodésico / Livia Faria Sampaio. – Curitiba, 2024.

1 recurso on-line: PDF.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga.

Coorientadora: Profa. Dra. Regiane Dalazoana

1. Redes (Geodésia). 2. Geodésia – Processamento de dados.
3. Sensores. Smartphones. I. Veiga, Luís Augusto Koenig. II. Dalazoana, Regiane. III. Universidade Federal do Paraná. IV. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. V. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS - 40001016002F6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **LÍVIA FARIA SAMPAIO** intitulada: **PROPOSTA DE SOLUÇÃO EMPREGANDO SMARTPHONES PARA APOIO AO PLANEJAMENTO DE REDE DE MONITORAMENTO GEODÉSICO**, sob orientação do Prof. Dr. **LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA**, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 27 de Fevereiro de 2024.

Assinatura Eletrônica
27/02/2024 17:16:04.0
LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
27/02/2024 18:08:59.0
ROVANE MARCOS DE FRANÇA
Avaliador Externo (INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica
27/02/2024 20:28:32.0
PEDRO LUIS FAGGION
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
28/02/2024 07:07:06.0
EDVALDO SIMÕES DA FONSECA JUNIOR
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

Dedico este trabalho a Deus, a minha família, e em especial à Eliane de Fátima Fiorese Grochoski (Historiadora, professora, mãe, esposa, avó, amiga, irmã, filha, sogra, companheira e exemplo de vida plena e alegria nesse mundo).

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, e pela força para eu conseguir atingir meus objetivos.

À UFPR e ao corpo docente do curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, em especial aos Professores Doutores Regiane Dalazoana e Luís Veiga, que não mediram esforços para me orientar e auxiliar ao longo do doutorado.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoa do Ensino Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

Aos colegas do GEENG, laboratório de Geodésia aplicada à engenharia, em especial Samir, Leandro, Felipe, Andreas, Day e Ana Luiza, por toda parceria ao longo desse período de doutorado.

Aos técnicos da UFPR, Marinei, Tânia, Fabi e Monica, que sempre foram grandes incentivadoras da minha pesquisa e da minha trajetória acadêmica até aqui.

Aos meus pais, Raquel e Martoni que sempre me apoiaram e me incentivaram ao longo da minha formação.

Ao meu marido, companheiro e melhor amigo Rodrigo, por estar aqui todos os dias me acompanhando, e me ajudando, inclusive na correção deste trabalho.

Ao meu filho Gabriel, que já tão pequeno veio para me ensinar e ressignificar o sentido do amor na minha vida.

Aos meus sogros, Eliane (em memória) e Floriano, e à minha cunhada Rafaela, que também sempre me incentivaram e apoiaram.

Aos meus familiares, irmãos (Luísa, Vitor, Pedro e Gabriel), avós (Margarida, Antônio (em memória), Edno e Laisy), tios (em especial ao tio e Professor Tony) e primos que sempre estiveram presentes na minha vida.

A todos que contribuíram de alguma forma na minha formação nesses 12 anos de Universidade Federal do Paraná. Espero que um dia eu consiga retribuir todo carinho, investimento e ensinamentos que recebi ao longo desses anos.

“Dê a quem você ama: asas para voar, raízes para voltar e motivos para ficar.”

(Dalai Lama)

RESUMO

O monitoramento de estruturas é realizado por meio de técnicas físicas e geodésicas e busca fornecer informações sobre suas condições para fins de manutenção e controle. Para realizar o monitoramento geodésico é necessário estabelecer uma rede de monitoramento que deve ser previamente planejada por meio de uma pré-análise, etapa que normalmente é realizada em escritório, com base em plantas e projetos da área. As atividades de levantamentos com objetivo de monitorar estruturas poderiam ser otimizadas e facilitadas se a etapa de pré-análise para a configuração geométrica da rede de monitoramento fosse realizada in loco, uma vez que seria possível analisar as limitações físicas impostas pela própria área de estudos. Automatizar esta etapa de pré-análise permite que se possa ter uma concepção inicial da configuração da rede de monitoramento de forma mais rápida e precisa, e permite que sejam realizadas várias simulações, ampliando o número de possibilidades de escolha pelo profissional da área de mensuração e ter a percepção do local para melhor poder projetar sua rede. Assim, uma forma prática e ágil para esta automação pode ser obtida com a tecnologia dos smartphones através do uso dos seus diversos sensores de posicionamento, associado a um sistema que permita o planejamento da rede diretamente em campo. Diversos aplicativos são projetados para acessar informações provenientes dos sensores chamados de hardware e software, como dados de giroscópio de observações GNSS (*Global Navigation Satellite System*) transformando os smartphones em plataformas de mensuração com baixo custo. Com isso, essa pesquisa tem como objetivo apresentar uma proposta de automatização para a etapa de planejamento do levantamento de uma rede de monitoramento geodésico utilizando smartphones, de forma que esta possa ser realizada in loco de forma prática, e que permita ao usuário analisar as possibilidades de implantação dos pontos que irão incorporar à rede de monitoramento. As etapas desta pesquisa consistiram no desenvolvimento de um aplicativo que engloba o levantamento dos pontos da rede in loco por meio de sensores de smartphones, e posteriormente o ajuste da rede para análise do usuário. Inicialmente foi necessário avaliar a viabilidade da utilização dos sensores presentes nos smartphones, e a qualidade deles. Para essa análise, foi realizada uma revisão de literatura contendo as pesquisas relacionadas à qualidade dos sensores acoplados aos smartphones. Além disso, foi aplicada uma metodologia de comparação entre dados obtidos por smartphones e os dados provenientes de mensurações efetuadas com estação total de alta precisão (de acordo com a classificação na NBR 13.133/2021). Como resultado, verificou-se que as medições angulares referentes aos ângulos verticais apresentaram uma discrepância que variou de 2,09° a 5,02°. Já em relação aos ângulos horizontais verificou-se maiores discrepâncias e um erro sistemático que ainda necessita ser investigado. Além disso, apresentou-se um escopo da aplicação desenvolvida para a simulação das redes de monitoramento. Com essa pesquisa concluiu-se que é possível a utilização dos smartphones para a aplicação proposta de pré-análise da rede de monitoramento, apesar de ainda existirem limitações em função da qualidade dos sensores acoplados nos smartphones.

Palavras-chave: Rede de Monitoramento Geodésico 1. Pré-Análise 2. Automação 3. Sensores 4. Smartphones 5.

ABSTRACT

Monitoring structures is carried out using physical and geodetic techniques and seeks to provide information about their conditions for maintenance and control purposes. To realize geodetic monitoring, it is necessary to establish a monitoring network that must be previously planned through pre-analysis, a step that is normally carried out in an office, based on plans and projects in the area. Survey activities aimed at monitoring structures could be optimized and facilitated if the pre-analysis stage for the geometric configuration of the monitoring network was performed in situ, since it would be possible to analyze the physical limitations imposed by the study area itself. Automating this pre-analysis stage allows an initial conception of the configuration of the monitoring network to be created more quickly and accurately, and allows several simulations to be done, expanding the number of possibilities for professionals in the measurement area and have local awareness to better design your network. Thus, a practical and agile way for this automation can be obtained with smartphone technology using its various positioning sensors, associated with a system that allows network planning directly in the field. Various applications are designed to access information from so-called hardware and software sensors, such as gyroscope data from GNSS (Global Navigation Satellite System) observations, transforming smartphones into low-cost measurement platforms. Therefore, this research aims to present an automation proposal for the planning stage of surveying a geodetic monitoring network using smartphones, so that it can be realized in situ in a practical way, and that allows the user to analyze the possibilities implementation of the points that will be incorporated into the monitoring network. The stages of this research consisted of developing an application that encompasses the survey of network points in loco using smartphone sensors, and subsequently adjusting the network for user analysis. Initially, it was necessary to evaluate the feasibility of using the sensors present in smartphones, and their quality. For this analysis, a literature review was done containing research related to the quality of sensors attached to smartphones. Furthermore, a comparison methodology was applied between data obtained by smartphones and data from measurements with high precision total station (according to the classification in NBR 13.133/2021). As a result, it was found that the angular measurements referring to vertical angles presented a discrepancy that varied from 2.09° to 5.02° . In relation to horizontal angles, there were greater discrepancies and a systematic error that still needs to be investigated. Furthermore, a scope of the application developed for the simulation of monitoring networks was presented. With this research it was concluded that it is possible to use smartphones for the proposed application of pre-analysis of the monitoring network, although there are still limitations due to the quality of the sensors attached to smartphones.

Keywords: Geodetic Monitoring Network 1. Pre-Analysis 2. Automation 3. Sensors 4. Smartphones 5.

LISTA DE FIGURAS

Figure 2.2.1 – Classification of Smartphone Sensors.....	25
Figure 2.2.2 – Axes of MEMS sensors	27
Figure 2.3.1 – A Trigonometric model for three-dimensional determination of the coordinates of a point located at the position $p (i, j)$	29
Figure 2.4.1 – Support developed for taking measurements with the smartphone attached to a base.....	30
Figure 2.4.2 – Flowchart of the application.....	31
Figure 2.4.3 – Graphical Application interface.....	32
Figure 2.4.4 – Indication of the approximated position of the measured and Smartphone in horizontal positioning.	33
Figure 2.4.5 – Tests with the application at GEENG.	35
Figure 2.4.6 – Sketch of positioning targets in an indoor environment.	35
Figure 2.4.7 – Testing with the application in an external environment.	36
Figure 2.4.8 – Survey with TS15 Total Station	37
Figure 2.5.1 – Differences between the measurements with Total Station and the application.	39
Figure 3.2.1 – MEMS type sensors axes	45
Figure 3.2.2 – IMU MEMS – accelerometer, gyroscope, and magnetometer.....	46
Figure 3.3.1 – Classification of smartphone sensors.....	49
Figure 3.4.1 – Example of Coriolis acceleration	52
Figure 3.4.2 – Schematic operation of a MEMS-type gyroscope.....	53
Figure 3.5.1 – Mass system used to measure acceleration: UFPR Electric / Sensors Operating Principle.....	57
Figure 3.7.1 – Sensors present in the SAMSUNG Galaxy S10.....	60
Figure 3.8.1 – Specifications of sensors in devices.....	62
Figure 3.8.2 – iToF e dToF.....	63
Figure 3.9.1 – Developed base coupled to the total station.....	65
Figura 4.1.1 – Escolha da posição dos pontos de controle de uma rede de monitoramento	78
Figura 4.3.1 – Etapas do sistema proposto para o planejamento da rede de monitoramento	84

Figura 4.3.2 – Interface do sistema proposto para o planejamento da rede de monitoramento	86
Figura 4.4.1 – Representação do método de irradiação tridimensional	89
Figura 4.5.1 – Interface da aplicação desenvolvida	95

LISTA DE TABELAS

Table 2.5-1 – Difference between data raised with the total station and with the application - internal environment.	38
Table 2.5-2 – Difference between data raised with the total station and with the application - external environment.	38
Table 3.3-2 – Sensor types supported by the Android platform	51
Table 3.9-1 – Data from vertical angle measured with total station and App.....	66
Table 3.9-2 – Data from horizontal directions measured with total station and App..	66

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	15
1.1 INTRODUÇÃO	15
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo geral	20
1.2.2 Objetivos específicos.....	20
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
CAPÍTULO 2	22
2.1 INTRODUCTION.....	23
2.2 SENSORS.....	25
2.3 ALGORITHM FOR CALCULATING DISTANCE	28
2.4 MATERIALS AND METHODS.....	30
2.4.1 Materials	30
2.4.2 Methodology	31
2.4.2.1 Development of the application	31
2.4.2.2 Carrying out measures in internal and external environment.....	34
2.4.3 Performing the same measurements performed with the application using a total station	37
2.5 RESULTS.....	37
2.6 CONCLUSIONS	40
REFERENCES.....	41
CAPÍTULO 3	43
3.1 INTRODUCTION.....	44
3.2 MEMS-TYPE SENSORS AND THE COORDINATE SYSTEM OF THESE SENSORS.....	44
3.3 QUALITY OF ORIENTATION SENSOR.....	47
3.4 SENSORS EMBEDDED IN SMARTPHONES	48
3.5 GYROSCOPE	52
3.6 ACCELEROMETER.....	55
3.7 MAGNETOMETER.....	58
3.8 GNSS	59
3.9 LIDAR SCANNER	61
3.10 EXPERIMENT	64

3.11 FINAL CONSIDERATIONS	67
REFERENCES	69
CAPÍTULO 4	73
4.1 INTRODUÇÃO	73
4.2 PLANEJAMENTO DA REDE DE MONITORAMENTO.....	78
4.3 PROPOSTA DO SISTEMA DE PLANEJAMENTO DA REDE DE MONITORAMENTO GEODÉSICO	83
4.4 DEFINIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PARA A PRÉ-ANÁLISE	86
4.4.1 Determinação das precisões dos pontos de controle.....	86
4.4.2 Determinação das precisões dos pontos-objeto.....	89
4.5 DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DO SISTEMA PROPOSTO	94
4.6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	95
REFERÊNCIAS	96
CAPÍTULO 5	100
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	103
CAPÍTULO 6	104
REFERÊNCIAS	104

Capítulo 1

1.1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de unidades estruturais pode ser realizado por meio de técnicas geodésicas e busca fornecer informações sobre as condições da estrutura para fins de manutenção e controle. O foco da Geodésia neste tipo de trabalho é avaliar possíveis deslocamentos bidimensionais ou tridimensionais de pontos da estrutura. Posteriormente, estes dados são utilizados para a determinação da ocorrência ou não de deformações. São diversos os estudos que apontam a necessidade de se realizar o monitoramento de diferentes tipos de unidades estruturais, como por exemplo: Beshr et al. (2015) que realizam um estudo voltado ao monitoramento geodésico de pontes e enfatizam que estes tipos de estrutura são comuns em todas as sociedades e afetam aspectos humanos, sociais, econômicos e culturais; Capra et al. (2015) que destacam a importância do monitoramento de edifícios antigos para identificar mudanças progressivas de inclinação, movimentos diferenciais da estrutura e detalhamento dos elementos estruturais; Yuwono (2019) que realiza uma pesquisa voltada ao monitoramento de barragens, enfatizando que a construção deste tipo de unidade estrutural é importante à vida humana pois uma das funções é o fornecimento de água para a sociedade, e aponta que barragens são suscetíveis à deformação devido a fatores relacionados com a mudança no nível do lençol freático, marés e processos geotécnicos, sendo necessário que seja realizado o monitoramento para garantir a segurança da estrutura da barragem e avaliar a necessidade de manutenção.

Diante de um cenário de tragédias ocorridas com o rompimento de barragens, como a de Mariana (2015) e a de Brumadinho (2019), ambas em Minas Gerais, reforça-se a importância de atividades ligadas ao monitoramento constante de unidades estruturais, com destaque para os diferentes tipos de barragens. Todos os estudos relacionados ao monitoramento de estruturas a partir de métodos de levantamentos geodésicos, incluindo a etapa de planejamento, se mostram importantes para o acompanhamento temporal do empreendimento (Sampaio, 2019).

Normalmente, o monitoramento destas estruturas é realizado a partir de um conjunto de pontos de referência. Juntamente com os pontos monitorados ou pontos objetos constituem a rede geodésica de monitoramento. Os pontos de referência

assemelham-se à definição clássica de rede geodésica. As redes geodésicas consistem em um conjunto de pontos materializados no terreno cujas coordenadas são determinadas em relação a um referencial bem definido e estimadas por meio de observações terrestres e/ou, em um contexto mais moderno, observações espaciais (KLEIN, 2014). Estas redes apresentam várias aplicações dentro do contexto da engenharia, entre elas: realização de um sistema de referência para o usuário; apoio para o mapeamento e navegação; fornecimento de pontos de apoio para a realização de monitoramento; entre outros. Para aplicação de uma rede visando o monitoramento de estruturas é necessário um levantamento de campo para implantação dos pontos que irão compor a rede geodésica de monitoramento, devendo levar em consideração a posição dos pontos de referência e dos pontos-objeto a serem medidos (SAMPAIO, 2019).

A estimativa da precisão de um trabalho de posicionamento geodésico, como por exemplo o monitoramento de unidades estruturais, depende do modelo matemático utilizado para a determinação das grandezas de interesse, e da geometria da rede, entendida aqui como a disposição dos pontos que serão utilizados durante o processo de mensuração e da precisão das observações coletadas em campo.

Se for possível ter o conhecimento a priori de todas estas informações, pode-se inferir o quanto estas, e conseqüentemente os resultados, serão afetados por condições instrumentais e de ambiente (SANTOS, 1999). O estudo a priori da combinação de todos estes elementos permite o planejamento de todo o trabalho de campo, de forma a atingir a precisão requerida no mesmo. A este estudo denomina-se pré-análise.

Segundo Dalazoana (2015), na etapa de planejamento visando a execução de um levantamento, a pré-análise serve para verificar os efeitos da propagação de erros com base no que foi projetado, antes mesmo da coleta das observações em campo, possibilitando verificar se um dado critério de qualidade será atingido. Aspectos importantes a serem considerados na pré-análise são: as possíveis técnicas de levantamento e o modelo matemático relacionado; os equipamentos disponíveis para o levantamento; e a geometria da rede de monitoramento.

A pré-análise é uma etapa normalmente executada em escritório onde se pode utilizar como ferramenta de auxílio uma imagem aérea ou um mapa da região. No entanto não é possível somente a partir de uma imagem verificar todas as limitações para a implantação de um ponto em determinado local. Limitações estas

que estão ligadas tanto à verificação de visibilidade entre os pontos, quanto a algum problema relacionado ao tipo de solo presente no local (instabilidade do local) que impeça de algum modo a materialização de um ponto naquele local. Assim, a pré-análise pode ser dividida em duas etapas, onde uma é voltada à estimação do posicionamento dos pontos na região, e outra voltada à verificação e levantamento preliminar na área de estudo para uma primeira validação do projeto e posteriormente ajuste e definição do projeto final.

A evolução tecnológica permitiu o desenvolvimento de ferramentas com o objetivo de automatização e controle de mensurações a partir do uso de dispositivos móveis como *tablets* e smartphones. O uso desses dispositivos não substitui equipamentos de alta precisão utilizados na Geodésia, mas têm se tornado ferramentas úteis em atividades que auxiliam, por exemplo, o planejamento e o controle das atividades de campo (SAMPAIO et al., 2023).

Os smartphones vem sendo utilizados cada vez mais no âmbito de aplicações das ciências geodésicas por possuírem sensores internos que permitem a realização de mensurações de grandezas físicas. A capacidade operacional, e a possibilidade de acessar e programar utilizando os dados destes sensores, abre um leque de possibilidades de utilização destes para mensurações de grandezas, como por exemplo ângulos e distâncias. Dentro do contexto da pré-análise, estes equipamentos tornam-se aliados por serem de pequeno porte, de fácil manuseio e de custo acessível.

No entanto, é necessário realizar investigações sobre como funciona o processo de obtenção dos dados dos smartphones. São diversas as variáveis a serem consideradas neste contexto, tais como: os tipos de sensores internos disponíveis no aparelho o que é dependente do modelo; qual a precisão dos dados provenientes dos sensores; se é possível ou não acessar os dados provenientes do aparelho para uma aplicação visando o planejamento de uma rede de monitoramento, entre outros.

Já existem alguns softwares que foram desenvolvidos para ambientes computacionais com o objetivo de otimizar o planejamento das redes geodésicas. Alguns exemplos de softwares que realizam a simulação das redes são: o Microsearch GeoLab e o Star*Net Pro (OGUNDARE, 2015).

Muitas pesquisas vêm utilizando conceitos de otimização e pré-análise para o planejamento de trabalhos de campo, mas sempre com enfoque no planejamento de redes geodésicas considerando apenas a rede de pontos de controle, como por

exemplo o trabalho de Guzzato (2017), no qual é apresentada uma metodologia para o planejamento de redes geodésicas por meio de simulações numéricas. Na pesquisa realizada por Klein (2014) foi desenvolvido um método considerando como critérios de planejamento de uma rede: níveis de confiabilidade e homogeneidade mínimos aceitáveis para as observações; acurácia posicional dos vértices, considerando tanto os efeitos de precisão quanto os efeitos de tendência, segundo um determinado nível de confiança; e o número máximo admissível de outliers não detectados.

Quando o termo abordado é rede geodésica dentro de um contexto de monitoramento de estruturas, é importante entender que a rede pode ser dividida em uma rede de controle - que normalmente é levantada a partir de técnicas de posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) ou técnicas de levantamentos tradicionais, como por exemplo triangulação e trilateração - e a rede de pontos a ser monitorada (ou seja a rede de pontos-objeto), que normalmente é levantada utilizando técnicas como o método de irradiação tridimensional ou métodos mais clássicos como intersecção a ré. Para a realização de um monitoramento é necessário que essas redes sejam conectadas e planejadas de forma integrada para permitir que sejam preditos os erros que envolvem as técnicas aplicadas, e conseqüentemente, garantir que estas técnicas permitam a detecção de deslocamentos na estrutura de forma a apresentar valores confiáveis e com precisões melhores.

Apesar da literatura apresentar trabalhos no âmbito de levantamentos de campo utilizando métodos geodésicos, bem como existam softwares e trabalhos que envolveram o planejamento de redes geodésicas, conforme citado anteriormente, ainda não se avaliou como seria realizado o planejamento de um levantamento de campo, de forma que, além da rede geodésica de controle, também fossem integradas técnicas geodésicas para o monitoramento da rede de pontos-objeto de forma planejada e automatizada, garantindo principalmente que os requisitos definidos para um monitoramento de estruturas sejam atendidos. E isto diretamente em campo.

O projeto de monitoramento de estruturas inicia-se pelo entendimento das forças atuantes sobre a estrutura e onde e quais deslocamentos são esperados. A partir disto, são definidas as áreas de interesse de serem monitoradas e nestas os locais dos pontos objeto. A etapa seguinte consiste na definição das observações e equipamentos a serem utilizados. Parte-se então para o planejamento da rede de monitoramento geodésico. Tradicionalmente este é um processo iterativo, envolvendo

escritório e campo até chegar a uma configuração de consenso que atenda aos critérios do projeto de monitoramento. Assim, pretende-se buscar uma forma prática e ágil de resposta a esta questão, a partir da tecnologia dos smartphones através do uso dos seus diversos sensores de posicionamento, associado a um sistema que permita o planejamento da rede diretamente em campo.

A ideia é integrar a possibilidade de obter medidas *in loco* com aplicações *mobile*, com a possibilidade de planejar a rede de referência e a rede de pontos-objeto de forma a viabilizar a execução da etapa de planejamento de forma mais prática e eficiente.

Um aspecto diferencial do trabalho de pesquisa proposto é permitir que na própria área de estudo já se possa ter uma concepção inicial da configuração da rede de monitoramento de forma mais rápida e precisa, e ao mesmo tempo, permitir que sejam realizadas várias simulações, ampliando o número de possibilidades de escolha pelo profissional da área de mensuração.

Neste contexto, estabeleceu-se o seguinte problema de pesquisa: Como automatizar a etapa de pré-análise para que esta possa ser realizada de forma interativa e iterativa, na própria área onde o monitoramento será executado (*in loco*), facilitando assim o planejamento da rede de monitoramento, e garantindo que sejam obtidos os menores erros propagados para os pontos-objeto e para os pontos da rede de referência?

O processo de planejamento de rede de monitoramento é iterativo em decorrência da necessidade de adequações no posicionamento definido para os pontos da rede em função de particularidades e limitações encontradas na área onde será implantada. Este processo normalmente é realizado em escritório, através da definição de possíveis cenários de disposição dos pontos e aplicação de conceitos de propagação de covariâncias, buscando-se maximizar as precisões obtidas nas coordenadas finais dos pontos-objeto. A aplicação do conceito de propagação de covariâncias requer que se tenha uma estimativa a priori dos valores numéricos das observações. Assim, com o auxílio de sensores de posicionamento existentes em smartphones, conjugados com uma aplicação que englobe os conceitos matemáticos envolvidos na propagação de covariâncias, modelagem tridimensional da feição monitorada e gerenciamento dos dados observados, é possível realizar este planejamento iterativamente no local onde será realizado o monitoramento.

Neste sentido, esta tese busca propor um sistema que permita a automatização do processo de pré-análise de forma que este possa ser realizado *in loco* auxiliando na etapa de planejamento de um levantamento geodésico visando o monitoramento de unidades estruturais.

1.2 OBJETIVOS

Nos itens a seguir serão abordados os objetivos geral e específicos propostos para o desenvolvimento deste trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

Propor a automatização do processo de pré-análise visando o monitoramento de unidades estruturais, gerando uma solução computacional para apoio à tomada de decisão *in loco*.

1.2.2 Objetivos específicos

- Verificar a qualidade das medidas obtidas a partir de sensores presentes nos smartphones, através de estudos de caso;
- Analisar quais os parâmetros mínimos necessários a serem fornecidos pelo usuário para a automação do processo de pré-análise *in loco*;
- Avaliar diferentes modelos matemáticos na propagação de erros levando em consideração o uso simultâneo de diferentes métodos de levantamento de campo;
- Propor uma interface de comunicação com o usuário para a utilização do sistema automatizado;

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em três capítulos principais: Capítulo 2, 3 e 4, os quais contemplam a pesquisa por meio da elaboração de artigos que permeiam a proposta indicada. No Capítulo 2 é apresentado o artigo publicado “**Análise da viabilidade do uso de dados provenientes de sensores presentes em smartphones visando a mensuração de ângulos e distâncias**”, na revista

Brasileira de Cartografia em 2022. Neste artigo, realizaram-se testes voltados à avaliação da qualidade dos sensores presentes em um smartphone, com o propósito de determinar valores de ângulos e distâncias, elementos fundamentais para a determinação de posicionamento terrestre.

O Capítulo 3 corresponde ao 2º artigo, denominado “**Utilizando smartphones como plataforma de mensuração para aplicações na Geociências**”, na Revista Anuário do Instituto de Geociências em 2022. Esse artigo apresentou uma revisão bibliográfica sobre os principais sensores de posicionamento acoplados no smartphone e que podem ser utilizados para auxiliar no posicionamento e medição de elementos na superfície da Terra. Além disso, foi apresentada uma metodologia para comparar dados do smartphone com dados obtidos com uma estação total. Nesta pesquisa, foram apresentadas também aplicações possíveis de serem realizadas na área de geociências utilizando dados provenientes dos smartphones.

No Capítulo 4 apresenta-se a proposta de redação inicial para um 3º artigo, intitulado “**Proposta de uma solução computacional utilizando smartphone para automatização do processo de pré-análise visando o monitoramento de unidades estruturais**”. Após avaliar a possibilidade de utilização dos sensores presentes no smartphone para utilização em pesquisas na área de geociências (Como visto nos capítulos 2 e 3), o Capítulo 4 vem apresentar uma proposta concreta da utilização destes dados, por meio de uma aplicação que visa planejar in loco uma rede de monitoramento geodésico. Nesse sentido é apresentado neste capítulo a proposta de desenvolvimento de aplicação para automatizar o processo de planejamento de uma rede geodésica visando o monitoramento de unidades estruturais na própria área de estudos onde o levantamento será realizado.

Capítulo 2

FEASIBILITY OF USING DATA FROM SENSORS EMBEDDED IN SMARTPHONES TO MEASURE ANGLES AND DISTANCES

Abstract: Smartphones have become communication and information retrieval tools, but as part of their functionality they also contain a variety of sensors to determine their orientation and location. This research aims to evaluate the capacity of the embedded sensors: gyroscope, accelerometer and magnetometer, and the camera sensor, with the purpose of indirectly determining values of angles and distances, basic elements for the determination of positions by positioning techniques. The tests consisted of measuring some points in an internal environment and in an external environment. These were collected using a total station and with the application developed for comparison purposes. The results showed that, for the distances evaluated, the differences obtained between the data measured by the total station and by the application were a maximum of 1.54 meters and a minimum of 0.09 m. The measurements of the vertical angles showed, on average, approximately 2.09 degrees of discrepancies between the data compared to the total station data. The horizontal angles showed the greatest differences between the values measured with the application and the total station, which ranged from 4.83° to 69.32° evaluated indoors. These observed discrepancies increased with the increase of the measured and calculated angle, thus verifying a problem mainly in relation to the determination of the horizontal angles.

Keywords: App. Smartphone Sensors. Determining angles and distances.

Resumo: Os smartphones se tornaram instrumentos de comunicação e de recuperação de informações, mas como parte de sua funcionalidade eles também contêm uma variedade de sensores para determinar sua orientação e localização. Essa pesquisa tem como objetivo avaliar a capacidade dos sensores: giroscópio, acelerômetro e magnetômetros, e o sensor da câmera, embarcados com o propósito de determinar indiretamente valores de ângulos e distâncias, elementos básicos para a determinação de posições por técnicas de posicionamento terrestres. Os testes consistiram na medida de pontos em um ambiente interno e em ambiente externo. Com a finalidade de estabelecer um parâmetro de comparação, estes foram levantados com a utilização de uma estação total e com o auxílio do aplicativo desenvolvido. Os resultados mostraram que, para as distâncias avaliadas, as diferenças obtidas entre os dados medidos pela estação total e pelo aplicativo foi de no máximo 1,54 metro e no mínimo 0,09 m. As medidas dos ângulos verticais apresentaram em média, aproximadamente 2,09 graus de discrepâncias entre os dados comparados com os dados da estação total. Já os ângulos horizontais apresentaram as maiores diferenças entre os valores medidos com o aplicativo e a estação total, sendo estas variando de 4,83° até 69,32° avaliados em ambiente interno. Estas discrepâncias observadas aumentaram conforme o aumento do ângulo medido e calculado, verificando-se assim um problema principalmente em relação à determinação dos ângulos horizontais.

Palavras-chave: Aplicativo. Sensores de Smartphone. Determinação de ângulos e distâncias.

2.1 INTRODUCTION

Over the years, hundreds of app's (application programs) have been designed to access this hidden information, turning smartphones into measurement platforms and generally at low cost (ODENWALD, 2019). A modern smartphone allows measuring different physical quantities directly from its embedded sensors (DAPONTE et al., 2013). Some examples of sensors that come embedded to the most modern smartphones are accelerometer, digital compass, gyroscope, GPS, microphone and camera, which are enabling the emergence of new sensing applications (LANE, 2010).

With the advent of these devices, the programming process for using data from these sensors has been facilitated. Now phones can be programmed to support new disruptive sensing applications. Most smartphones available on the market have open and programmable platforms. In addition, it is possible to use programming interfaces from reliable platforms that allow access to the sensors available on the devices (LANE, 2010). This factor allowed the development of several applications aimed at different purposes, such as the health sector, environmental monitoring, safety, transportation, among others.

In the geodetic sciences, some studies have already been developed in the context of the use of smartphones for different applications such as: geographic information systems (GIS) (CONTI, 2015); photogrammetry (as applications developed for aerophotogrammetric flight planning); monitoring of structures (PERES, 2015) and GNSS surveys (Global Navigation Satellite System) (HWANG, 2012). For the development of these applications, it is necessary to use raw data from different sensors on smartphones.

Within the context of using data from the sensors of smartphones to measure angles and distances, Kuhlmann, Garaizar and Reips (2021) presented a study on the accuracy of the data, especially with regard to the sensors that allow obtaining the orientation of the smartphone: the magnetometer, the accelerometer and the gyroscope. From the sensors it is possible to obtain the device orientation angles. These authors presented a comparison between the different models of smartphones on the market, and consequently the different types of sensors embedded in each of these devices.

Studies in the area of distance measurement were carried out by Salih and Malik (2012) in which a methodology for measuring distance from a single photo was

presented. In this research this method was used, with the aim to obtain distances from a single image. So, the multiple images method was not used. In addition, the author Odenwald (2019) presented free and paid applications, with the purpose of measuring distances, but all based on the principle of measurement by coordinates obtained from GNSS data.

As shown, several applications have already been developed for measurement purposes. However, no studies were found showing applications for the purpose of measuring angles and distances at the same time, on free platforms, which also aim to evaluate the feasibility of using smartphone's sensors. It should also be noted that the simultaneous measurement of angles and distances is the most practical way to obtain two-dimensional and three-dimensional coordinates from a single station. Using just measurements of angles or just measurements of distances require the occupation of two or more station points to obtain the coordinates.

On this context, this paper proposes the development of an application on a free platform, which allows accessing data from different embedded sensors in the smartphone, with the objective of making the indirect measure of angles and distances through this application, and the determination of local coordinates, without using GNSS (Global Navigation Satellite System). To verify the feasibility of the application, measurements will be made with the total station located in the same positions where the measurements will be made with the developed application.

The use of a satellite positioning system presents limitations of use especially in urbanized and indoor environments, and in this case alternative methodologies such as the one proposed in this paper become more viable depending on the application.

Historically, smartphones have integrated depth sensors and augmented reality. The first smartphone equipped with ToF (Time of Flight) camera and augmented reality features launched in the consumer market was in 2016. In 2020, an American company launched the iPad Pro 2020 and the iPhone 12 on the market with the presence of LiDAR sensors (COSTANTINO, 2022).

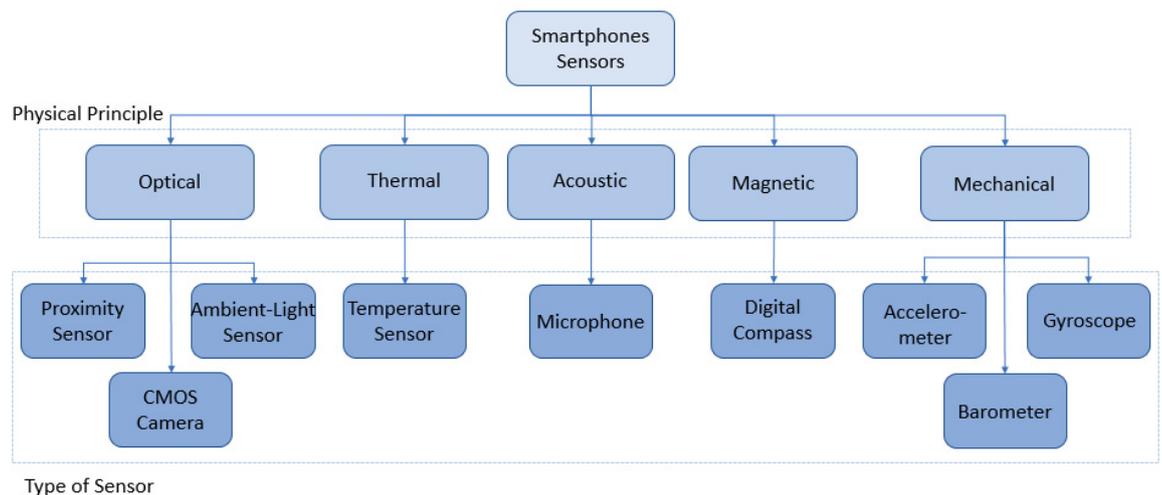
This LiDAR sensor is a new kind of sensor embedded in smartphones that measures depth and detects objects in three dimensions. It is important to emphasize that from a survey using a laser scanner, scans of hundreds and thousands of points are obtained for the 3D reconstitution of an environment or an object, which requires devices with a high operational capacity so that processing is possible and analysis of these data.

In addition, as it is a recent technology (it started after the year 2020), the values of cell phones that contain this sensor are still very high, difficult to access. The software and programming tools still do not have adequate and easily accessible tools to use the raw data coming from this sensor. Due to these limiting factors, this sensor has not yet been used to obtain distances in the proposed application in this paper.

2.2 SENSORS

Daponte (2013) classifies the sensors according to their physical principle of operation (Figure 2.2.1).

Figure 2.2.1 – Classification of Smartphone Sensors.



Source: Adapted from Daponte (2013).

Magnetic and mechanical sensors are based on a technology known as MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems), which are sensors that contain microelectronic and micromechanical structures. MEMS technology is used for the development of sensors, such as the accelerometer, the gyroscope and the magnetometer, which have three axes. The main advantages for using these technologies are the low cost of this system, the size (few millimeters), and the high performance.

The gyroscope is a device that determines orientation through angles. It has applicability in sectors such as aviation, computing, robotics and in mobile devices such as video games and cell phones. There are several types of gyroscopes, among them: gyrostat, Fiber-Optic Gyroscopes (FOG), Dynamically Tuned Gyroscopes

(DTG), London Momentum and MEMS. The MEMS-type gyroscope uses the Coriolis effect to explain the direction and change of this direction, so the application works (PASSARO et al. 2017).

Used together with the gyroscope to define the rotation of the pulse, there is the accelerometer, which is an electromechanical device that measures the acceleration force. The most common type of accelerometer found on smartphones is one that contains three axes and a capacitive principle.

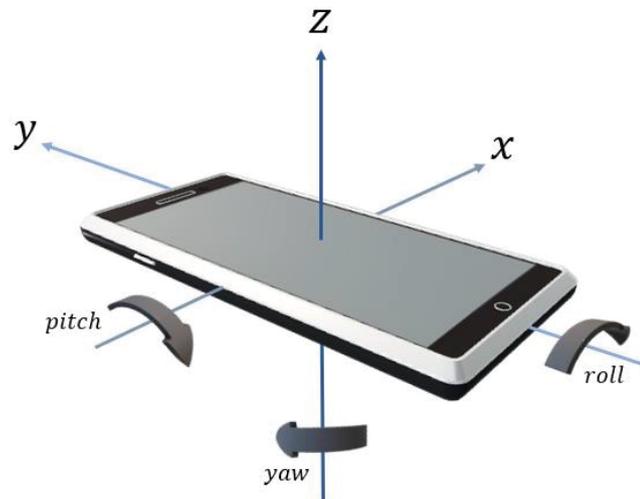
In addition to the gyroscope and the accelerometer, there is the magnetometer. The magnetometer estimates the strength of the earth's magnetic field. The digital compass, for example, is based on this three-axis magnetic sensor (DAPONTE, 2013).

These so-called MEMS sensors allow obtaining information related to the orientation of smartphones. The three axes of these sensors, as seen in Figure 2.2.2, provide the roll, pitch and yaw angles. The roll measures 0° when the device is leveled, increases 90° when the device is tilted upwards on the left side and decreases to -90° when the device is tilted upwards on the right side (MIT, 2020).

The pitch measures the slope, being 0° when the device is leveled, up to 90° when the device is tilted so that its top is pointing down, and up to 180° as it is turned. Likewise, as the device is tilted down, the angle decreases to -90° and then to -180° as it is rotated all the way.

The yaw also corresponds to the magnetic azimuth, and measures 0° when the top of the device is pointing towards magnetic north, measures 90° when it is pointing east, 180° when it is pointing south, and 270° when it is pointing west. These measures assume that the device itself is not moving.

Figure 2.2.2 – Axes of MEMS sensors



Source: The Authors (2022).

Another important sensor that will be used to carry out this research is the digital camera. Smartphone cameras are basically composed of sensors, lens, auxiliary circuits and, in some cases, a lighting system for photos (flash). The big difference between cellphone cameras and others is the need for low cost and small size (MORIMOTO, 2009).

While sensor availability varies by device, it may also vary between the operating system versions of the device being used. That is why it is important to know which operating system and which version is being used to verify whether or not it is possible to use data from certain sensors. Smartphones have an operating system whose main function is to manage all the applications and hardware processes of a device.

There are some application development platforms, the so-called “frameworks.” These frameworks allow accessing various types of sensors. Some of them are hardware based while others are software based. Hardware-based sensors are physical components built into a mobile device or tablet. They derive data by directly measuring specific environmental properties such as acceleration, geomagnetic field strength or angular change. Software-based sensors are not physical devices, although they mimic hardware-based sensors. These derive data from one or more hardware-based sensors and are known as virtual or synthetic sensors. The linear acceleration sensor and the gravity sensor are examples of software-based sensors (KUHLMANN, GARAIZAR e REIPS, 2021).

In this research, a platform called MIT App Inventor will be used to access sensor data. This platform provides guidance data from software-based sensors. MIT App Inventor is an environment that uses a block-based visual language to allow users to create applications for mobile devices. The creation of a project in “App Inventor” consists of a set of components and blocks of programs that provide functionality to these components, which are items visible on the phone, such as buttons and text boxes, and non-visible items, such as sensors and the database (TURBAK, 2014).

2.3 ALGORITHM FOR CALCULATING DISTANCE

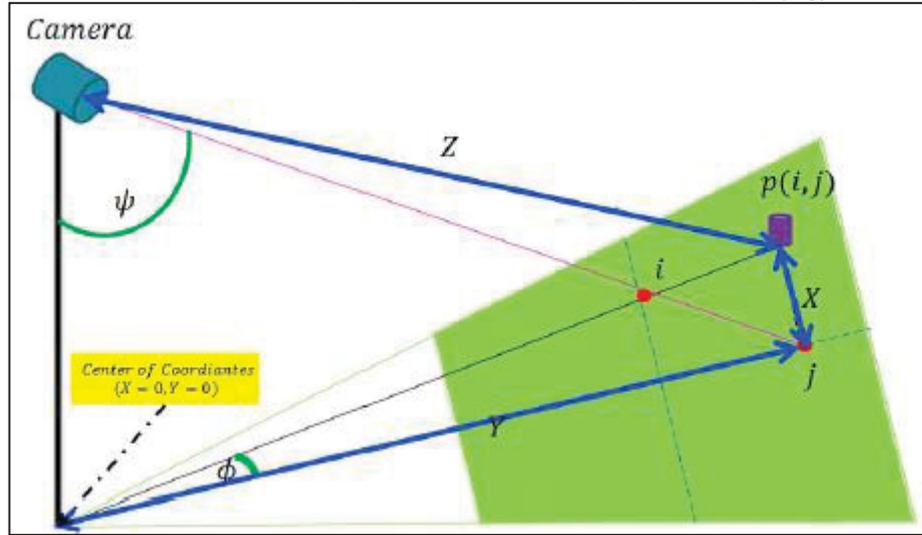
Salih and Malik (2012) presented a method for calculating the depth and geometry of an object in a photo from a single 2D image. In this article, this methodology presented by these authors will be used to calculate the distance between the smartphone and a certain point measured in the photo.

The method proposed by Salih and Malik (2012) works for cameras that face downwards with a known angle of inclination and height. The camera is installed at a known height (h) from the floor and has a tilt (inclination) angle (θ). The camera's field of view is (FOV_h) in the horizontal direction and (FOV_v) in the vertical direction. The above parameters restrict the geometry of the image and control how large or small the viewing area can be. The calculation of depth and geometry is performed using triangulation, so the angle of inclination can be defined by Equation (2.1).

$$\theta < 90 - \frac{FOV_v}{2} \quad (2.1)$$

In Figure 2.3.1, an object located in the image is considered as the point p (i, j). The location of this object can be completely described by the height of the camera, as well as the vertical angle (Ψ) and rotation angle (Φ). These two angles are calculated using equations (2.2) and (2.3), respectively, where W and H are the width and height of the image.

Figure 2.3.1 – A Trigonometric model for three-dimensional determination of the coordinates of a point located at the position $p(i, j)$



Source: Salih e Malik (2012).

$$\Psi = \theta + \left(\frac{H}{2} - j\right) \times \left(\frac{FOV_v}{H}\right) \quad (2.2)$$

$$\Phi = \left(i - \frac{W}{2}\right) \times \left(\frac{FOV_h}{W}\right) \quad (2.3)$$

The values $\left(\frac{FOV_v}{H}\right)$ and $\left(\frac{FOV_h}{W}\right)$ are the angles in the respective vertical and horizontal direction. These angles are calculated due to the displacement of a pixel in the vertical or horizontal direction. Given the angles (Ψ) and (Φ) and assuming that the center of the coordinates is directly below the camera, the absolute location of the ground (X, Y) and the absolute depth of the field (Z) for the image point $p(i, j)$ can be calculated using equations (2.4), (2.5) and (2.6), respectively.

$$Y = h \times \tan(\Psi) \quad (2.4)$$

$$X = Y \times \tan(\Phi) \quad (2.5)$$

$$Z = \sqrt{h^2 + Y^2 + X^2} \quad (2.6)$$

The methodology presented by the authors Salih and Malik (2012) was used in this research only to obtain the distance between the point in the image and the object. With this information and the data obtained by the sensors of the angular

measurements, it is possible to obtain the three-dimensional coordinates of the measured points.

2.4 MATERIALS AND METHODS

2.4.1 Materials

The materials used for this research were:

- a) The application development platform: MIT App Inventor;
- b) A smartphone that contains the following sensors: camera, gyroscope, accelerometer and magnetometer – smartphone Xiaomi Redmi Note 8;
- c) TS15 total station;
- d) Support developed for the smartphone (Figure 2.4.1).

Figure 2.4.1 – Support developed for taking measurements with the smartphone attached to a base.



Source: The Authors (2022).

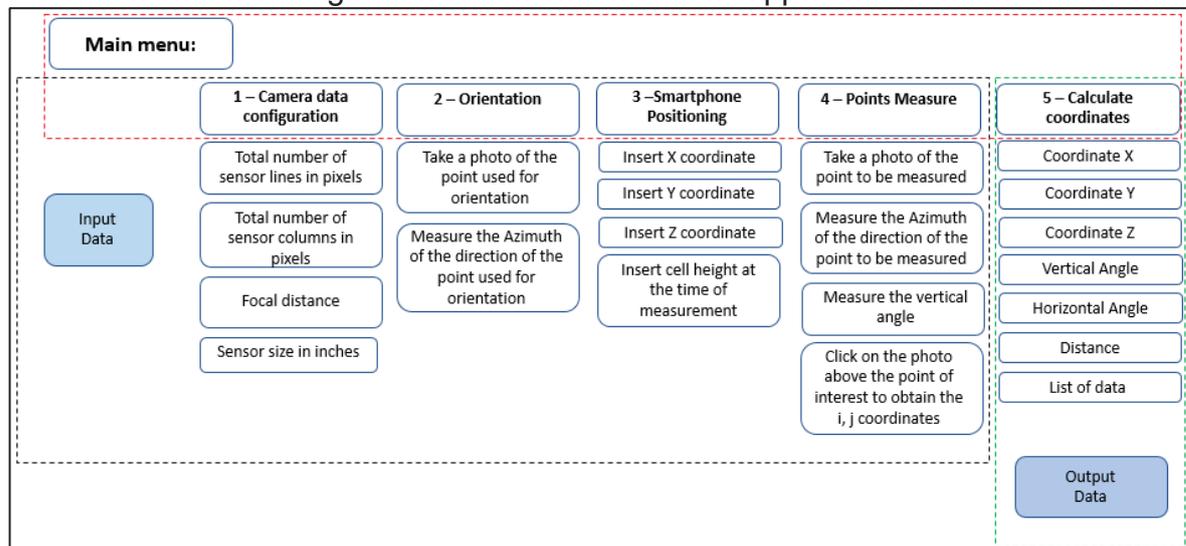
The support developed allowed the smartphone with the application program to be installed in the same position as the total station, in order to ensure that the measured data were taken from the same position. The support consists of a leveling base, a cell phone holder normally used for pinning smartphones in vehicles and a prism holder, adapted for the cell phone.

2.4.2 Methodology

2.4.2.1 Development of the application

The first step of the methodology consisted in the elaboration of the application that was called MEDIDAS. The development of this application was divided into parts to facilitate data entry and exit. Figure 2.4.2 shows the parts of the developed application. In the first screen of the application there are steps 1, 2, 3, 4 and 5 that must be followed to obtain the measurements of the points of interest.

Figure 2.4.2 – Flowchart of the application



Source: The Authors (2022).

In Figure 2.4.2, it is also possible to verify all the data that will be necessary to be inserted in each step of the application. In the first step, for example, the user must enter data from the camera of the cell phone used, such as the focal length, the size of the sensor, etc. The application allows these data to be saved. So, this is a procedure that does not need to be repeated to measure different points, it is necessary to enter this data only once.

For the cases of devices that have multiple cameras on the cell phone, such as front and rear camera, it is necessary to enter data only from the main camera of the device, which usually is the rear camera, that will be used to measure the points. The graphical interface of the main screen of the application and the first stage presented can be seen in Figure 2.4.3.

Figure 2.4.3 – Graphical Application interface.



Source: The Authors (2022).

It is important to highlight some necessary precautions for carrying out the measurements using the developed application. Thus, before starting measurements with the application, it is necessary to perform a calibration of the smartphone's compass. This calibration can be done using the compass application available on smartphones that have a magnetometer sensor attached.

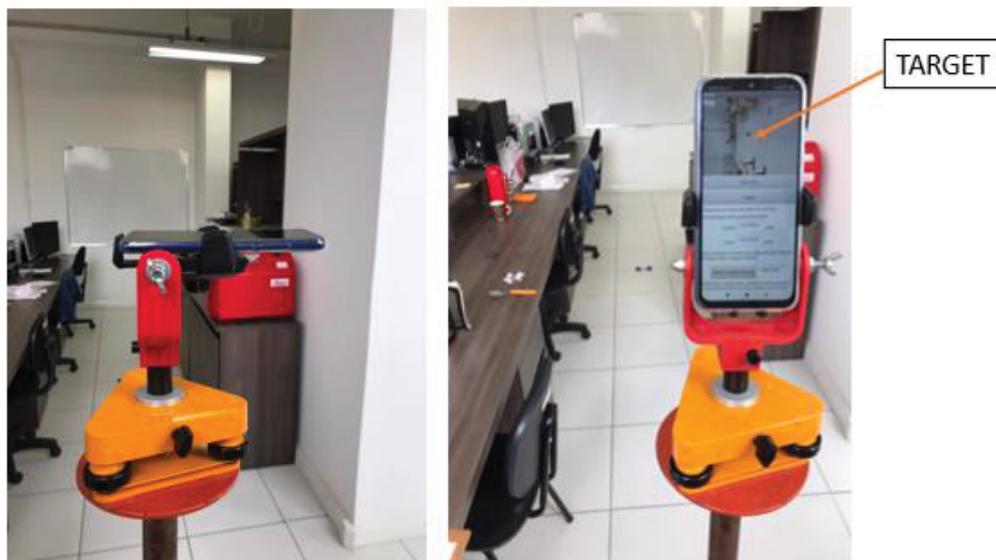
Another precaution that must be taken is the positioning of the cell phone to obtain the horizontal angle measured between two directions. The horizontal direction is obtained by using the magnetometer sensor. This should be measured with the cell phone in a horizontal position, facing the direction you want to observe. In addition, it is necessary that between the measurements, a few seconds of waiting are given so that the sensor is stabilized in the new position.

The measurement of a first point is carried out, which will serve to guide the other measures. For this, on the second screen of the application, (2-orientation), you must take a photo of the point that will serve as a reference for the other measurements. Then, position the phone horizontally and click on the button to obtain the horizontal direction between the device and the observed point. Finally, you must save these measurements made by clicking on the button: “save.”

With the smartphone properly oriented, you must fill in the requested data on the third screen of the application (3-cell positioning), in this screen the coordinates (X, Y and Z) adopted for the point where the equipment is parked must be entered and the height of it. The height should be measured, with a measuring tape, from the floor to approximately the height of the cell phone's main camera. As in the previous step, it is necessary to click on the “save” button to save the data entered.

Once the equipment is already oriented and the information about the position of the cell phone is already inserted, step 4 of the application is carried out, where the point measurements will be effectively performed. In this step, rotate the device slowly to the approximate direction in which the point to be measured is. When the cell phone is positioned towards the point, a photo of the target must be taken so that it is approximately in the center of the photo. The user must click on the photo, in the approximate position where the target is (Figure 2.4.4).

Figure 2.4.4 – Indication of the approximated position of the measured and Smartphone in horizontal positioning.



Source: The Authors (2022).

The cell phone must be in a horizontal position (Figure 2.4.4), and the user must wait a few seconds for the sensors to stabilize, and then measure the horizontal direction between the device and the observed point. After this measurement, it is necessary to click on save, to store the measured data.

After performing each of the steps, it is necessary for the user to save the data entered, in order to ensure that the application calculates the coordinates of the observed points in a correct and updated way. If the new measurement is not saved, the application will calculate the coordinates, based on previously measured data.

Finally, to obtain the coordinates of the measured point, it is necessary to click on the button "5 - Calculate coordinates" and click on the button "calculate". If the user wants to save these coordinates, click on the "save" button, and they will go to a list created in the application itself, which can be shared by email, if the user wants to work with this data later.

If the user wishes to use the same reference point for the measurement of a new point, it is possible to go back to the button "4 - measurement of points" and perform the measurement of one more point, proceed to button 5 to calculate and add new point to the list of measured points.

The ".aia" file with the application code created, is available in Sampaio (2022).

2.4.2.2 Carrying out measures in internal and external environment

First, for preliminary evaluation of the application's operation, tests were carried out at the Laboratory of Geodesy Applied to Engineering (GEENG) at the Federal University of Paraná (UFPR). These tests consisted of measuring some points in the laboratory, using the MEDIDAS application.

For this, it was used a smartphone that was placed on the support developed in the laboratory, as shown in Figure 2.4.5. Some targets were distributed on the laboratory floor, and these were used to carry out these measurements. In Figure 2.4.5, it can be seen how these targets were arranged, and how the mobile device was positioned in relation to these points.

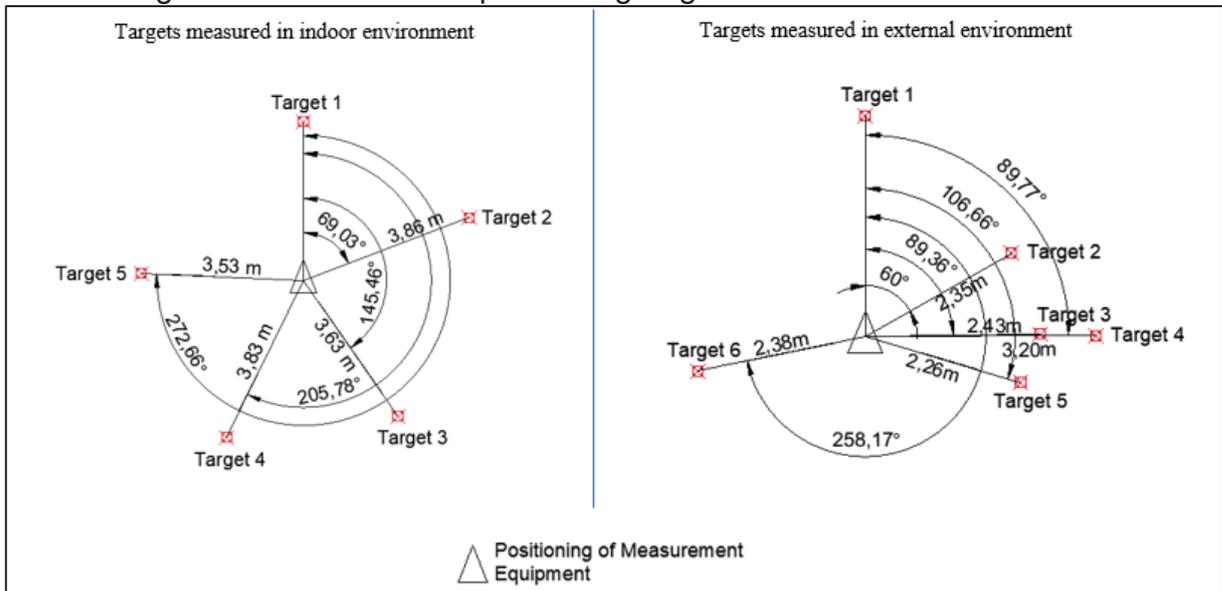
Figure 2.4.5 – Tests with the application at GEENG.



Source: The Authors (2022).

Figure 2.4.6 presents a sketch for a visualization of how the points were distributed around the place where the measurement equipment was installed. Target 1 was used to orient the measurement equipment, and from this point on, the other targets were measured. With the application, 5 sets of measurements were made for each point. In relation to vertical angles, this angle was measured in the same position that the photo was taken, with the same inclination of the smartphone.

Figure 2.4.6 – Sketch of positioning targets in an indoor environment.



Source: The Authors (2022).

Subsequently, the same experiments were carried out in an external environment, on the UFPR campus, as can be seen in Figure 2.4.7.

Figure 2.4.7 – Testing with the application in an external environment.



Source: The Authors (2022).

For the experiment carried out in an external environment, five targets were distributed around the installation position of the measurement equipment. The positioning of the points can be seen in Figure 2.4.6.

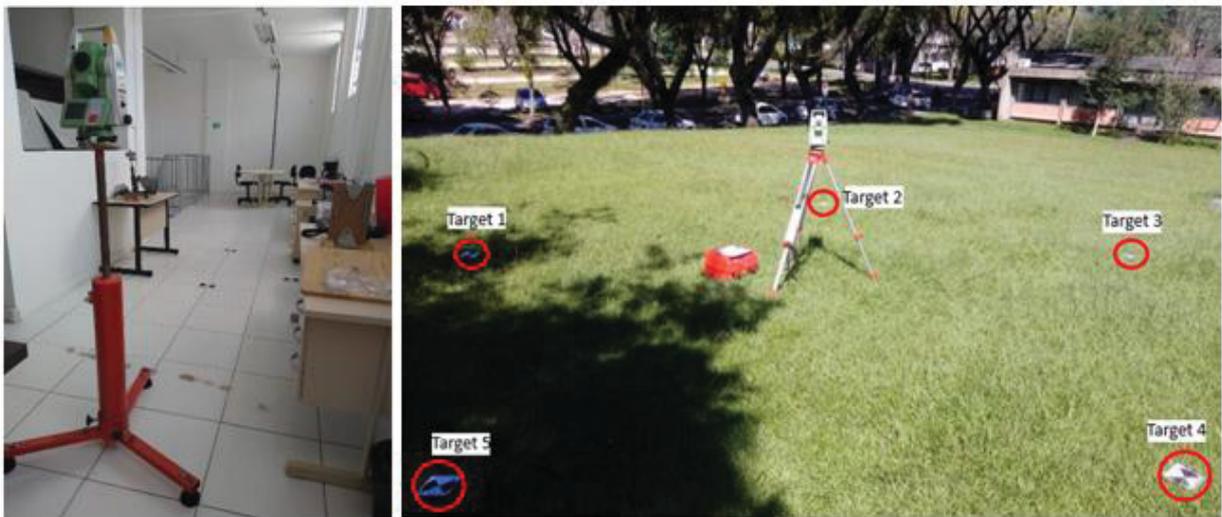
To carry out the measurements, a smartphone was used, which was placed on the developed support. In this way, it was possible to install this equipment on the tripod in the same position (centering) that the total station was installed, to perform measurements that would allow to check the results obtained (coordinates).

For preliminary assessment of the operation of the application, experiments were carried out in an internal and external environment. The experiments were carried out in these environments in order to evaluate the operation of the magnetometer sensor, since it is influenced by the magnetic field, which is affected by interference depending on the place where the experiment is being carried out.

2.4.3 Performing the same measurements performed with the application using a total station

To verify the data collected with the application, the same measurements were performed with a TS15 total station (Figure 2.4.8). Measurements were taken for the same targets and in the same positions in which the cell phone was placed. For this case, as it is a high precision measuring equipment (angular precision of 1" and linear precision of 1mm + 1ppm), 3 series of readings were performed.

Figure 2.4.8 – Survey with TS15 Total Station



Source: The Authors (2022).

2.5 RESULTS

As shown in the methodology, 5 sets of repetitions were taken to measure each target with the application, both indoors and outdoors. The differences found between the data measured by the application and the total station is shown in **Erro! Fonte de referência não encontrada.**1 e Table 2.5-2. In Table 2.5-2 it is possible to verify that the largest differences refer to the horizontal angle measurements, with the largest discrepancy (69.32°) being obtained for point 6. As for the distance and vertical angle measures, the largest differences found were 0.81m and 2.88° respectively.

Table 2.5-1 – Difference between data raised with the total station and with the application - internal environment.

Target	Horizontal angle (°)	Distance (m)	Vertical angle (°)
2	4.83	0.29	2.29
3	16.38	0.17	1.82
4	17.01	0.81	2.82
5	23.50	0.73	2.88
6	69.32	0.11	2.46

Source: The Authors (2022).

In Table 2.5-2 it is possible to verify that the largest differences are also to the horizontal angle measurements, with the largest discrepancy (29.39°) being obtained for point 4. As for the distance and vertical angle measures, the largest differences found were 1.54m and 2.38° respectively.

Table 2.5-2 – Difference between data raised with the total station and with the application - external environment.

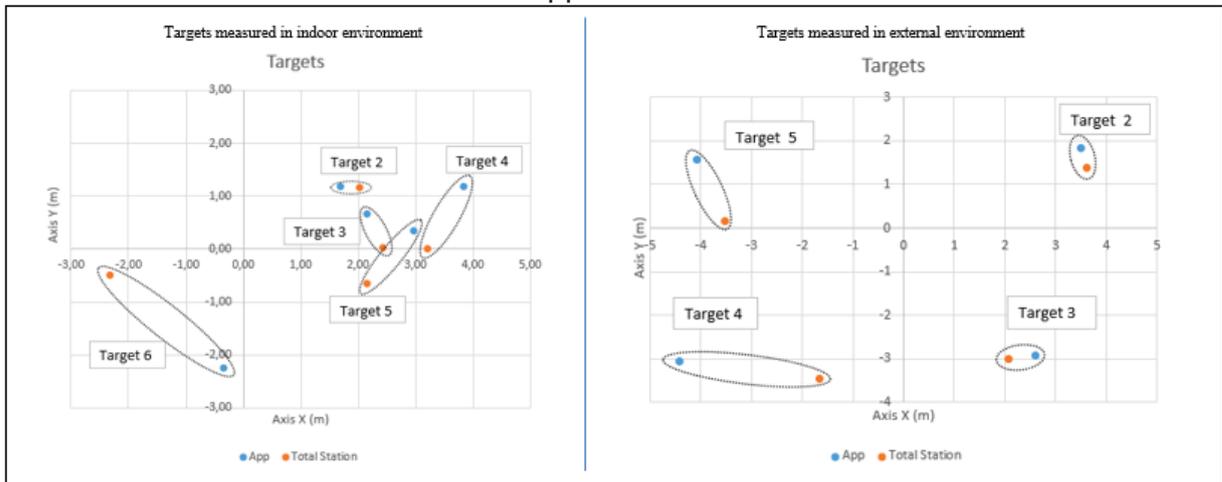
Target	Horizontal angle (°)	Distance (m)	Vertical angle (°)
2	6.82	0.09	0.58
3	7.18	0.27	2.38
4	29.39	1.54	1.71
5	18.57	0.85	1.86

Source: The Authors (2022).

In the experiments carried out, the X and Y coordinates calculated for the measured targets were also evaluated. In this way, it is possible to plot and spatially visualize the location of the points and check the difference between the positions of the targets measured by the total station and the application.

In Figure 2.5.1, the coordinates of the targets calculated from the measurements made with the application and from the measurements made with the total station were represented. In this figure, the blue dots represent the position of the targets raised with the application and in orange, the position of the targets raised with the total station. It appears that targets 6 and 4 are the ones with the greatest discrepancy in the coordinates.

Figure 2.5.1 – Differences between the measurements with Total Station and the application.



Source: The Authors (2022).

As a pattern can be observed in these differences found, techniques can be developed to minimize these differences, for example, applying a correction factor proportionally to the increase in the measured angle value. Another possibility is to increase the time for stabilization of the sensors between the intervals of the measurements in each target.

It is necessary that the data obtained for the horizontal angles be treated, since they present systematic errors due to the use of the magnetometer sensor to obtain this measurement.

Another factor that can be investigated to improve a gyroscope and accelerometer quality is to use the data coming from hardware sensors instead of software sensors. Finally, the question of obtaining horizontal angles from smartphone sensors deserves further study.

Both in experiments carried out indoors and outdoors, it was found that the discrepancies found for the distance values were on average 0.54 m. The average of the distance measurements carried out in the experiments was approximately 3.47 m due to the limitation of indicating in the image, the approximate position of the target being measured. This limitation due to the method used to determine the distances, could be calculate the distances from estimated coordinates that could be obtained using a map base inside the app. The measurements of the vertical angles showed, on average, approximately 2.09 ° of discrepancies between the measurements, which also proves their usability for the purposes of the application.

2.6 CONCLUSIONS

Although the tests were carried out with a specific model of smartphone, they showed that it is possible to determine local coordinates of points using the sensors of a smartphone. The precision of the determined quantities and of the calculated coordinates is not yet comparable with traditional techniques, such as surveying techniques, but the advance in the development of sensors to help minimize these problems.

The results showed that for the distance determination, the differences obtained between the data were in general at most 1 meter, and that the quality of the determined distance worsens as the point moves away from the smartphone. The measurements of the vertical angles showed on average approximately 2 degrees of discrepancies between the measurements, which also proves its usability. The measurements obtained from the horizontal angles were those that showed the biggest differences between the values measured with the application and the total station.

It is necessary to treat these data obtained for the horizontal angles, since they present systematic errors due to the use of the magnetic compass to obtain this measurement. It is recommended that a calibration technique be applied to this sensor, for example.

For the calibration of sensors, D'ELIA et al. (2013) presents a proposal for a method with this purpose, more focused on accelerometer calibration, but indicates that this method can be used for different sensors. This consists of determining some parameters such as the scale factor matrix and the MEMS sensor displacement vector. As these sensors make measurements in relation to three axes, the calibration model incorporates the displacement and a scale factor for each axis and the symmetric factor in the transverse axis.

Another factor that can be investigated to improve the achievement of the horizontal angle is the use of the accelerometer sensor with the gyroscope to obtain these measurements.

From the analysis performed, it is concluded that, from the access to the data provided by the sensors present in smartphones, measurements of angles and distances can be performed using these data, making possible to determine the three-dimensional coordinates of points on a physical surface. It should be noted that the precision in determining the coordinates was not the factor sought in this work, but the

possibility of determining them. It should be noted that studies are still needed to improve the measurements obtained for mainly the horizontal angles measured from the gyroscope.

REFERENCES

- CONTI, G.; RIBEIRO, S. R. A.; DIAS, A. H. Arquitetura de um sistema de informação geográfica mobile para coleta de dados geográficos baseados em conceitos de cloud computing e banco de dados NoSQL. In: **Congresso brasileiro de agroinformática**, 10, 2015, Ponta Grossa. Anais... Ponta Grossa: SBIAgro, 2015.
- COSTANTINO, Domenica et al. Smartphone LiDAR Technologies for Surveying and Reality Modelling in Urban Scenarios: Evaluation Methods, Performance and Challenges. **Applied System Innovation**, v. 5, n. 4, p. 63, 2022.
- DAPONTE, Pasquale et al. State of the art and future developments of measurement applications on smartphones. **Measurement**, v. 46, n. 9, p. 3291-3307, 2013.
- D'ELIA, M. G. et al. Measurement uncertainty on smart phone. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE AND VIRTUAL ENVIRONMENTS FOR MEASUREMENT SYSTEMS AND APPLICATIONS, 2013, Milan. Proceedings... Milan: **IEEE**, 2013. p. 144-149.
- HWANG, J. et al. Development of an RTK-GPS positioning application with an improved position error model for smartphones. **Sensors**, v. 12, n. 10, p. 12988-13001, 2012.
- KUHLMANN, T.; GARAIZAR, P.; REIPS, U. Smartphone sensor accuracy varies from device to device in mobile research: The case of spatial orientation. **Behavior research methods**, v. 53, n. 1, p. 22-33, 2021.
- LANE, N. D. et al. A survey of mobile phone sensing. **IEEE Communications magazine**, v. 48, n. 9, p. 140-150, 2010.
- MIT, App Inventor. Disponível em: <<http://appinventor.mit.edu>>. Acesso em: 1 nov. 2020.
- MORIMOTO, C. E. Smartphones Guia Prático. **GDH Press e Sul Editores**, 2009.
- ODENWALD, S. Smartphone sensors for citizen science applications: Radioactivity and magnetism. **Citizen Science: Theory and Practice**, v. 4, n. 1, 2019.
- PASSARO, V. et al. Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective. **Sensors**, v. 17, n. 10, p. 2284, 2017.
- PERES, F. F. F. et al. Realidade aumentada para o acesso à instrumentação da barragem de Itaipu. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 30, 2015, Foz de Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: CBDB, 2015. p. 1-9.

SALIH, Y.; MALIK, A. S. Depth and geometry from a single 2d image using triangulation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIMEDIA AND EXPO WORKSHOPS, 2012, Melbourne. Proceedings... Melbourne: **IEEE**, 2012. p. 511-515.

SAMPAIO, L. F. Código MIT APP medidas. 2022. Disponível em: <https://github.com/liviafariasampaio/MIT---medidas>. Acesso em: 12 dez. 2022.

TURBAK, F.; WOLBER, D.; MEDLOCK-WALTON, P. The design of naming features in App Inventor 2. In: SYMPOSIUM ON VISUAL LANGUAGES AND HUMAN-CENTRIC COMPUTING, 2014, Melbourne. Proceedings... Melbourne: **IEEE**, 2014. p. 129-132.

Capítulo 3

USING SMARTPHONES AS A MEASUREMENT PLATFORM IN GEOSCIENCE APPLICATIONS

Abstract. Most modern smartphones come with a variety of sensors. Among them are the gyroscope, accelerometer, magnetometer, GNSS (Global Navigation Satellite Systems) receiver, and from 2020, most modern devices are also coupled with a Lidar (Light Detection and Ranging) sensor. These specific sensors allow to acquire data that enables the location and spatial orientation of the smartphone in relation to other objects, and also measure them. For this, it is important to understand how the principle of operation of these sensors occurs, as well as the respective raw data obtained and how to use these data from the sensors to get measurements of the elements of the physical surface of the Earth. This article aims to present a state of the art about the working principle of these sensors and presents the raw data from them. In addition, this article seeks to present an initial test on the quality of the orientation sensor, based on the comparison between the data obtained from this sensor and a total station with high angular precision (1 second). It was noted the occurrence of a systematic error in the observations of the horizontal directions, and an average discrepancy of 5.20° between the observations of the vertical angle. The use of sensors attached to smartphones can support in several activities of geoscience application, such as carrying out a prior survey of a given area of study, aiming to do a pre-analysis of geodetic networks, to carry out measurements of angles and distances for applications in terrain measurements, or even to assist the Geographic Information System (GIS) development.

Keywords: Smartphones; Sensors; Measurements

Resumo. Os smartphones modernos vêm com uma variedade de sensores. Entre eles estão o giroscópio, acelerômetro, magnetômetro e receptor GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) e, a partir de 2020, alguns dispositivos mais modernos são equipados com sensores Lidar (*Light Detection and Ranging*). Esses sensores específicos mencionados possibilitam obter dados que permitem que a localização e orientação espacial do smartphone em relação a outros objetos possam ser medidos a partir deste dispositivo. Para isso, é importante entender como ocorre o princípio de funcionamento desses sensores, bem como os respectivos dados brutos, obtidos e como utilizar esses dados dos sensores para realizar medições dos elementos da superfície física da terra. Este artigo tem como objetivo apresentar um Estado da arte sobre o princípio de funcionamento desses sensores e apresentar os dados brutos obtidos a partir deles. Além disso, este artigo busca apresentar um teste inicial sobre a qualidade do sensor de orientação, a partir da comparação entre os dados obtidos entre este sensor e uma estação total de alta precisão angular (1 segundo). Observou-se a ocorrência de um erro sistemático nas observações das direções horizontais, e uma discrepância média de 5.20° entre as observações do ângulo vertical. A utilização dos sensores acoplados nos smartphones podem auxiliar em diversas atividades na área de geociências, como por exemplo, para a realização de um levantamento prévio de uma determinada área de estudos, visando a realização de pré-análise de redes geodésicas, ou a realização de mensurações de ângulos e distâncias para aplicações

que envolvem medidas de um terreno, ou mesmo para auxiliar no desenvolvimento de Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Palavras-chave: Smartphones; Sensores; Medidas

3.1 INTRODUCTION

Advances in technology have enable the development of tools to automate and control the process of measurements using mobile devices such as tablets and smartphones. The use of these devices does not replace high-precision equipment used in Geodesy. But they have become useful tools in activities that help, for example, the planning and control of field activities.

Daponte et al. (2013) present a state of the art of the measurement applications used in smartphones. These authors present a definition of modern smartphones as equipment that contain different sensor technologies, so that they can be used as measuring instruments. In addition, they also present a review of applications that use smart sensors and the communication interfaces available in these devices.

Within the Geodetic Sciences, some studies have already been developed in the context of the use of smartphones for different applications such as: Geographic Information Systems (GIS); photogrammetry, as applications developed for aerophotogrammetric flight planning monitoring of structures and surveys with GNSS receivers (SAMPAIO ET AL., 2022 APUD. CONTI, RIBEIRO & DIAS 2015; PERES 2015; HWANG, 2012)

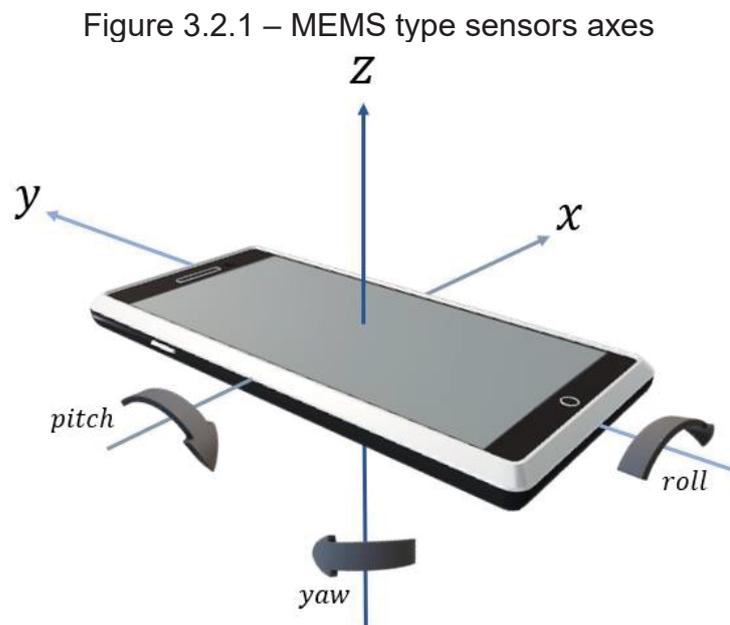
For the development of these applications, it is necessary to use raw data from the different sensors embedded in smartphones. This paper seeks to present a state of the art of how the principle of operation of some sensors present in smartphones occurs, in addition to seeking to present what are the raw data that can be obtained through them and the respective quality of this data. The main sensors used for the spatial positioning of the devices will be presented, considering the sensors for positioning and that allow the realization of measurements with them.

3.2 MEMS-TYPE SENSORS AND THE COORDINATE SYSTEM OF THESE SENSORS

Smartphones have sensors attached to these devices that are based on a technology known as Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS). The acronym MEMS in American nomenclature or Micro Systems Technology (MST) in Europe, are integrated circuits consisting of mechanical parts.

The components of MEMS are formed by a silicon substrate. These devices can be of two types, microsensors and micro actuators. Microsensors have the function of collecting information from the surrounding environment through their mechanical, magnetic, thermal, chemical, and optical elements. The function of micro-actuators is to act as needed through mechanisms such as filters, actuators, valves, and motors. All these functions are performed by these microscopic-sized, highly efficient, reliable, economical, and low-cost devices (STUHLER, 2022).

MEMS technology is used for the development of sensors, such as the accelerometer, gyroscope, and magnetometer, which have three axes, as shown in Figure 3.2.1.

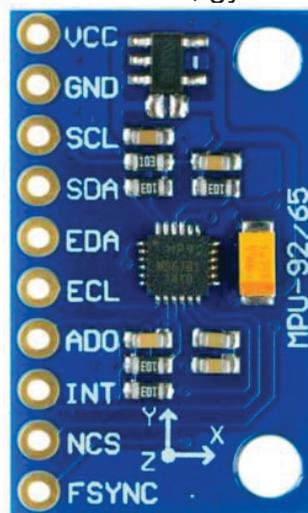


Source: Sampaio et al. (2022)

For most sensors, the coordinate system is set relative to the device's screen when the device is held in the default orientation, i.e., when the smartphone is in portrait position. In this case, the “X” axis is horizontal and points to the right, the “Y” axis is vertical and points up, and the Z axis points away from the screen. In this system, the coordinates behind the screen have negative Z values (ANDROID, 2022).

The Inertial Measurement Unit (IMU) acronym for inertial measurement unit, is an inertial platform from a system composed of sensors that informs the position of an object to be measured in relation to its rotation axes. The sensors that make up the inertial system are usually the gyroscope, accelerometer and magnetometer that serve to measure orientation, acceleration, and magnetic direction (Figure 2). From the combination of these sensors, it is possible to obtain the device orientation angles. Each sensor can act on three different axes. The three axes of these sensors provide the roll, pitch, and yaw angles (Figure 3.2.2) (KUHLMANN, GARAIZAR, REIPS 2021; STUHLER, 2022).

Figure 3.2.2 – IMU MEMS – accelerometer, gyroscope, and magnetometer.



Source: Geekfactory (2022).

The roll angle varies as the device is moved about the “Y” axis. When the device is level, this angle has a value of 0° , and varies from 90° to -90° , when the device is tilted up on the left side, and when the device is tilted up on the right side respectively. The pitch varies as the device is moved about the “X” axis. It has a value of 0° when the device is level and varies between 90° and 180° as the device is tilted so that its top is pointing down. Likewise, as the device is tilted downwards, the angle varies from -90° to -180° as it is rotated (MIT, 2020).

The yaw angle corresponds to the magnetic azimuth and varies as the device is moved around the “Z” axis. Measures 0° when the top of the device is pointing to magnetic north; 90° when pointing east; 180° when pointing south; and 270° when pointing west. These measurements assume that the device itself is not moving (MIT, 2020).

The most important feature to understand about this coordinate system is that the axes are not switched when the device's screen orientation changes, i.e., the sensor coordinate system never changes as the device is moved. It cannot be assumed that the natural (default) orientation of the device is portrait. The natural orientation of many tablets is the landscape. The sensor coordinate system is always based on the device's natural orientation (ANDROID, 2022).

3.3 QUALITY OF ORIENTATION SENSOR

Within the context of using data from smartphone sensors to measure angles, Kuhlmann, Garaizar & Reips (2021) presented a study on the accuracy of this data, especially about sensors that allow the smartphone's orientation to be obtained. These authors made a comparison between the different smartphone models present on the market, and consequently the different types of sensors embedded in each of these devices.

This study investigated the accuracy of the orientation data on the spatial position of smartphones through a measurement device developed by them. The smartphone's pitch (vertical orientation) and roll (horizontal orientation) angle data were compared to data collected from sensors through applications developed in web browsers and from native applications. The accuracies achieved differed between smartphone models, with average inaccuracies per device of up to 2.1° and 6.6° , respectively for pitch and roll. The results of this research confirm the presence of heterogeneities when collecting orientation data from different smartphone devices. In most cases, measuring via a web browser was identical to measuring via a native app, but this was not true for all smartphone devices.

The authors Oh & Kim (2020) carried out research related to the determination of azimuths from the geomagnetic sensor. This author points out that it is difficult to use the azimuths obtained from this sensor, because the accuracy cannot be determined even in places where the geomagnetic disturbance can be compensated. In this research the authors propose a new algorithm that employs the accelerometer, gyroscope, and geomagnetic sensor data to determine the accuracy of the initial azimuth orientation. Azimuth angle measurement using geomagnetic sensors is unreliable due to distortion of the Earth's magnetic field.

Data on the accuracy of spatial orientation are performed primarily based on investigation of external influences on accuracy and natural deviations from values (GREWAL & ANDREWS, 2010). One of these external factors is the influence of the temperature at which the orientation sensor operates. Temperature change results in inaccuracies in the readings. Because this inaccuracy is predictable and consistent, most orientation sensors are coupled with a temperature sensor. Another source of inaccuracies is acceleration and vibration. This is especially a problem for compact orientation sensors without much damping that are implemented in mobile devices (WEINBERG, 2011).

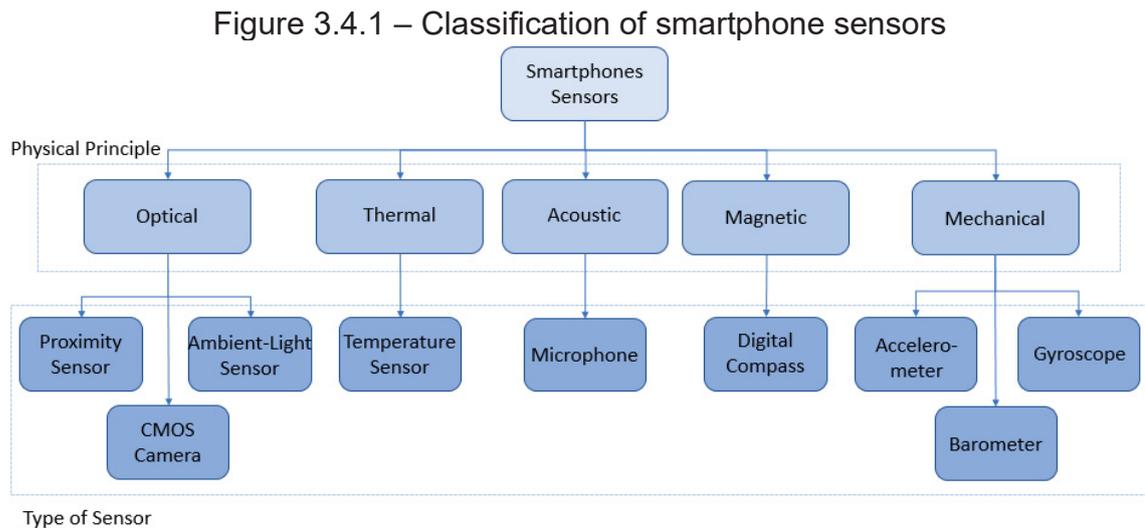
Data on the accuracy of spatial orientation are performed primarily based on investigation of external influences on accuracy and natural deviations from values (GREWAL & ANDREWS, 2010). One of these external factors is the influence of the temperature at which the orientation sensor operates. Temperature change results in inaccuracies in the readings. Because this inaccuracy is predictable and consistent, most orientation sensors are coupled with a temperature sensor. Another source of inaccuracies is acceleration and vibration. This is especially a problem for compact orientation sensors without much damping that are implemented in mobile devices (WEINBERG, 2011).

3.4 SENSORS EMBEDDED IN SMARTPHONES

Data on the accuracy of spatial orientation are performed primarily based on investigation of external influences on accuracy and natural deviations from values (GREWAL & ANDREWS, 2010). One of these external factors is the influence of the temperature at which the orientation sensor operates. Temperature change results in inaccuracies in the readings. Because this inaccuracy is predictable and consistent, most orientation sensors are coupled with a temperature sensor. Another source of inaccuracies is acceleration and vibration. This is especially a problem for compact orientation sensors without much damping that are implemented in mobile devices (WEINBERG, 2011).

3.4.1 Sensors embedded in smartphones

The author Daponte et al. (2013) classifies the sensors according to their physical principle of operation, which can be: optical, thermal, acoustic, magnetic, or mechanical (Figure 3.3.1).



Source: Sampaio et al. (2022).

While sensor availability varies by device, it may also vary between the operating system versions. That is why it is important to know which operating system and which version is being used to verify whether it is possible to use data from certain sensors.

According to Oliveira et al. (2014), smartphones have an operating system whose main function is to manage all the applications and hardware processes of a device. Android is currently the most used operating system in smartphones available on the market (83.8% of the world market in 2020 – IDC 2020).

The author also points that Android is a Linux-based operating system designed for smartphones and tablets but can be found on other devices such as digital cameras, TVs, and even video games. It allows the source code to be modified, but Google requires the modified version to work in all applications available on Google Play (Android Web Store).

Most devices have built-in sensors that generate raw data with high accuracy and are useful for monitoring three-dimensional motion or positioning or for tracking

changes in the surrounding environment. The Android platform supports three broad categories of sensors (ANDROID, 2022):

- **Motion sensors:** measure rotational and acceleration forces in three axes. This category includes accelerometers, gravity sensors, gyroscopes, and rotation vector sensors.

- **Environmental sensors:** measure various environmental parameters such as ambient air temperature and pressure, lighting, and humidity. This category includes barometers, photometers, and thermometers.

- **Position sensors:** measure the physical position of a device. This category includes orientation sensors and magnetometers.

3.4.2 Hardware sensors, software sensors and ways to obtain sensors data

Experiments on mobile devices can be performed using native and web applications. Native apps run on top of the device's operating system and use compiled code (i.e., Java/Kotlin for Android devices, Objective-C/Swift for iOS devices). Web applications run in a web browser (Google Chrome, Apple Safari, Mozilla Firefox) and use web Application Programming Interfaces (APIs) through JavaScript language code. In addition, there are some application development platforms, the so-called “frameworks”: (Xamarin, Appcelerator, Adobe PhoneGap) that can port their code to multiple platforms (KUHLMANN, GARAIZAR & REIPS, 2021).

These frameworks allow accessing various types of sensors. Some of them are hardware based while others are software based (Table 3.3-2). Hardware-based sensors are physical components built into a mobile device or tablet. They derive data by directly measuring specific environmental properties such as acceleration, geomagnetic field strength or angular change. Software-based sensors are not physical devices, although they mimic hardware-based sensors. These derive data from one or more hardware-based sensors and are known as virtual or synthetic sensors. The linear acceleration sensor and the gravity sensor are examples of software-based sensors (GARAIZAR & REIPS, 2021; ANDROID, 2022).

Table 3.4-1 – Sensor types supported by the Android platform

Sensor	Type	Description	Common Uses
TYPE_ACCELEROMETER	Hardware	Measures the acceleration force in m/s^2 that is applied to a device on all three physical axes (x, y, and z), including the force of gravity.	Motion detection (shake, tilt, etc.).
TYPE_GRAVITY	Software or Hardware	Measures the force of gravity in m/s^2 that is applied to a device on all three physical axes (x, y, z).	Motion detection (shake, tilt, etc.).
TYPE_GYROSCOPE	Hardware	Measures a device's rate of rotation in rad/s around each of the three physical axes (x, y, and z).	Rotation detection (spin, turn, etc.).
TYPE_MAGNETIC_FIELD	Hardware	Measures the ambient geomagnetic field for all three physical axes (x, y, z) in μT . Measures degrees of rotation that a device makes around all three physical axes (x, y, z).	Creating a compass.
TYPE_ORIENTATION	Software	As of API level 3 you can obtain the inclination matrix and rotation matrix for a device by using the gravity sensor and the geomagnetic field sensor in conjunction with the <code>getRotationMatrix()</code> method.	Determining device position.
TYPE_ROTATION_VECTOR	Software or Hardware	Measures the orientation of a device by providing the three elements of the device's rotation vector.	Motion detection and rotation detection.

Source: Android (2021).

Native apps can collect data from hardware sensors directly, while web apps are unable to do this for security reasons. However, most native mobile apps do not receive values directly from sensors, but data from software sensors (GARAIZAR & REIPS; KUHLMANN, GARAIZAR & REIPS 2021; ANDROID, 2022). In Table 13.3.2, it is possible to verify, for example, the types of sensors compatible with the Android platform and classified as being Hardware sensors, software sensors, and those that can be both hardware and software sensors.

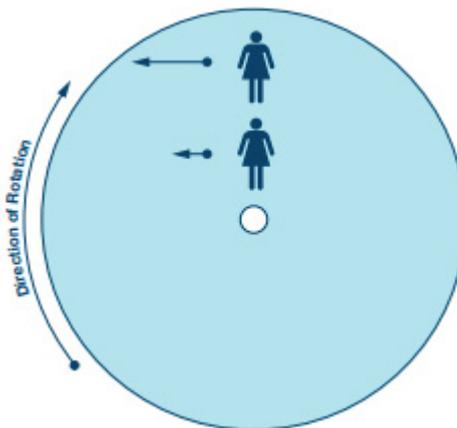
Software sensors provide estimates of actual position, orientation, and motion values by combining readings from various hardware sensors such as accelerometers,

gyroscopes, magnetometers, or barometers. The hardware sensors in today's smartphones are like circuit chips in appearance and work electronically. The use of software sensors is considered a good development strategy as it allows the integration of values obtained from different sensors (KUHLMANN, GARAIZAR & REIPS, 2021).

3.5 GYROSCOPE

The gyroscope is a device that determines orientation through angles. It has applicability in sectors such as aviation, computing, robotics and in mobile devices such as video games, cell phones, among others. There are several types of gyroscopes, including: Mechanical scopes, Ring Laser Gyroscopes (RLGs), Fiber-Optic Gyroscopes (FOGs) and silicon MEMS Gyroscopes, the latter used in cell phones and mobile devices because it has minimal cost and is easy to manufacture (PASSARO et al., 2017). The MEMS-type gyroscope uses the Coriolis effect to explain the direction and change in this direction. The Coriolis effect can be explained as follows, starting with Figure 3.4.1 (WATSON, 2016).

Figure 3.5.1 – Example of Coriolis acceleration



Source: Watson, 2016

Consider a person standing on a turntable, near the center. Your velocity relative to the ground is shown as the lengths of the blue arrows. If that person were to move to a point near the outer edge of the platform, their speed would increase relative to the ground, as indicated by the longer blue arrow. The rate of increase of its tangential velocity, caused by its radial velocity, corresponds to the Coriolis

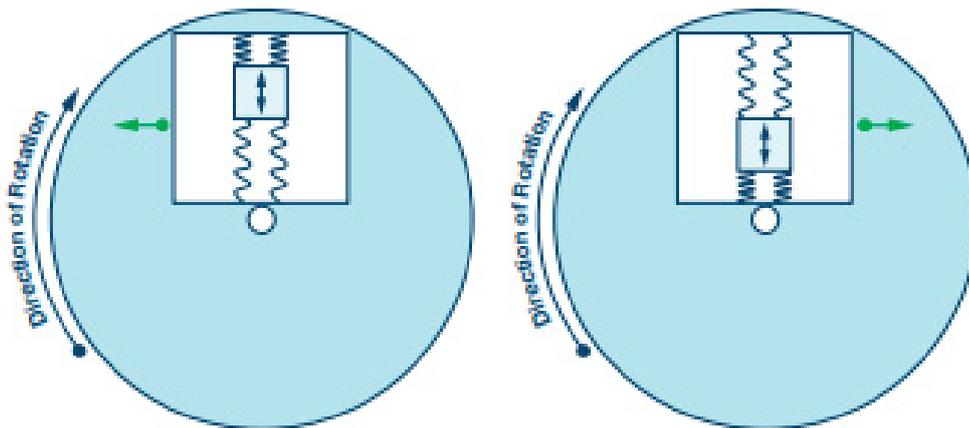
acceleration (WATSON, 2016). The Coriolis effect states that in a frame rotating at an angle of velocity ω , a mass m moving with velocity v experiences a force (QAZIZADA & PIVARČIOVÁ, 2016):

$$F = -2m(\omega \times v) \quad (3.1)$$

A microelectromechanical gyroscope (MEMS) instead of rotating disk to measure angular velocity, it uses a structure like the accelerometer through capacitance variation, but instead of measuring displacement, it measures angular velocity through the force of Coriolis.

A mass moving in a direction with a certain speed and when an external angular rate (rotation process) is applied, a resultant force will appear causing the perpendicular displacement of this mass (Figure 3.4.2), this displacement changes the capacitance of the circuit that will be measured, processed, and will correspond to a certain angular rate (STUHLER, 2022).

Figure 3.5.2 – Schematic operation of a MEMS-type gyroscope



Source: Watson, 2016

According to Watson (2016), a person moving north toward the outer edge of a rotating platform must increase the westward velocity component (blue arrows) to maintain a northbound course. The required acceleration is the Coriolis Acceleration. The green arrows indicate the force applied to the structure based on status of the resonating mass.

The author explains that, as shown in Figure 5, when the resonant mass moves towards the edge of the rotation, it is accelerated to the right and exerts a reaction force to the left on the frame. As it moves toward the center of rotation, it exerts a force to the right, as indicated by the green arrows. For Coriolis's truth, the frame containing the mass is tied to the substrate by springs at 90° in relation to the resonant motion.

With the resonant mass motion and with the surface to which the gyroscope is mounted, the mass and its structure experience Coriolis acceleration and are translated 90° of the vibratory motion. As the rate of rotation increases, so does the mass displacement and the signal derived from the corresponding capacitance change. It should be noted that the gyroscope can be placed anywhere on the rotating object and at any angle if the sensor axis is parallel to the axis of rotation (WATSON, 2016).

The sensor measures the displacement of the resonant mass due to the Coriolis effect through capacitive sensing elements attached to the resonator. A resonator is a device that exhibits resonance or resonant behavior, that is, it naturally oscillates at certain frequencies, called resonant frequencies, with greater amplitudes than at others. These elements are silicon beams interdigitated with two sets of silicon beams, stationary attached to the substrate, thus forming two nominally equal capacitors (WATSON 2016; RESONATOR, 2022).

The resonator circuit senses the velocity of the resonant mass, amplifies, and drives the resonator while maintaining a well-controlled phase (or delay) with respect to the Coriolis signal path. The Coriolis circuit is used to detect the motion of the accelerometer frame with the mass drive direction and signal processing to extract the magnitude of the Coriolis acceleration and produce an output signal consistent with the input rotation rate. The displacement due to the angular rate induces a differential capacitance in this system. In practice, this acceleration is an extremely small signal (a unit of measurement of length equivalent to 10^{-10} m) of beam deflection. Therefore, it is extremely important to minimize cross-sensitivity to parasitic sources such as temperature, packaging stress, external acceleration, and electrical noise (XIA et al. 2014; WATSON, 2016).

The main source of error of the MEMS type gyroscope corresponds to the "bias", which generates a linear growth over time, which can be corrected by

calculating the variation generated in the device at rest (ARAVENA 2018 apud. SHALA & RODRIGUEZ 2011).

The main source of error of the MEMS type gyroscope corresponds to the “bias”, which generates a linear growth over time, which can be corrected by calculating the variation generated in the device at rest (ARAVENA 2018 apud. SHALA & RODRIGUEZ, 2011).

The main source of error of the MEMS type gyroscope corresponds to the “bias”, which generates a linear growth over time, which can be corrected by calculating the variation generated in the device at rest (ARAVENA 2018 apud. SHALA & RODRIGUEZ, 2011).

3.6 ACCELEROMETER

Used together with the gyroscope to define the rotation of the pulse is the accelerometer, which is an electromechanical device that measures the acceleration force. The most common type of accelerometer found in smartphones is the one that contains three axes and a capacitive principle. MEMS accelerometers are one of the simplest but also most applicable micro-electromechanical systems. They became indispensable in automobile industry, computer, and audio-video technology (ANDREJAŠIC, 2008).

The accelerometer is an electromechanical device with the purpose of measuring acceleration, unlike acceleration, which is measured between velocity and time, the function of the accelerometer is to measure the own acceleration which is the relation to another system in free fall, so that is linked to your sensation of weight, its function in IMU sensors is to measure speeds and distances covered. There are several types of accelerometers that can work from different physical effects such as resistive, magneto resistive, capacitive, piezoelectric and presents a wide range of acceleration values (AROEIRA, 2021).

The typical MEMS accelerometer is made up of a proof moving mass with plates that are attached via a mechanical suspension system to a frame of reference. Moving plates and fixed outer plates show the capacitors. The test mass deviation is measured using the capacitance difference. The test mass is fixed by springs (kS: constant spring) on the substrate. He can only move up and down. Moving and fixed plates build capacitors (QAZIZADA & PIVARČIOVÁ, 2016).

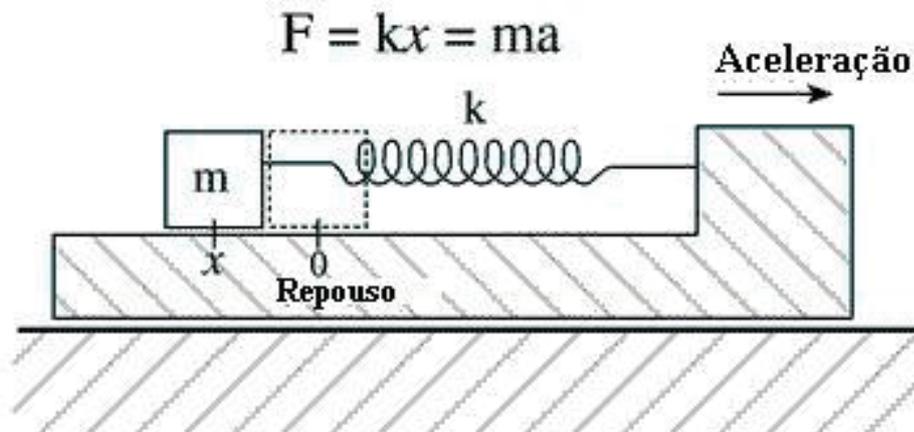
Generally, when using an accelerometer, the developer seeks to extract the linear acceleration, this acceleration is only that applied to the sensor, discounting the acceleration due to gravity. This acceleration, depending on the device, can be measured in three dimensions, and if it weren't for its lack of precision, it could easily be used to measure speed and displacement (FUX, 2008). When working with this linear acceleration, this is usually where the first problem is found, since the sensor has a dubious accuracy, and has its own x, y and z axes different from the Earth-relative axes, it is difficult to say precisely what intensity the gravitational force is applying on each of these sensor axes (MENEGUZZI, TREIS & CENDRON, 2016)

Accelerometers based on MEMS circuits generally use capacitance to measure acceleration. Its microstructure looks like a comb, having an external fixed assembly and a mass attached to a spring that is limited to moving along one direction. When an acceleration occurs, the mass moves and the capacitance is changed between the two plates, which will be measured and processed by the system circuit (ANDREJAŠIĆ, 2008).

The basic operating principle behind this accelerometer is the mass and spring system. Springs, while within their linear region, are governed by Hooke's law, which says that the displacement of the spring is proportional to the applied force, that is, $F=kx$, where k is a constant inherent in the spring, measured in N/ m and x is the strain of the spring, measured in meters (Figure 3.5.1).

Another physical principle involved is Newton's second law, which relates force to mass and acceleration through the equation $F=ma$. Equalizing both equations give $ma=kx$, and therefore it can be seen that an acceleration a cause a displacement of the mass of $x=(ma)/k$, or, alternatively, if the mass has undergone a displacement x , it means that the mass is under an acceleration of $a=(kx)/m$. In this way the problem of measuring acceleration became a problem of measuring the displacement of a mass. Note that the accelerometer only measures acceleration along the spring. This is therefore a single-axis accelerometer. For each axis along which you want to measure acceleration, you need a system like this (UFPR ELECTRIC / SENSORS OPERATING PRINCIPLE, 2022).

Figure 3.6.1 – Mass system used to measure acceleration: UFPR Electric / Sensors Operating Principle



Source: UFPR Electric / Sensors Operating Principle

In the accelerometer there is a mass that is held by springs and has plates around it; when there is movement, there is an unbalance of the capacitive half-bridge, and the integrated circuit already processes the signal from the capacitors.

The accelerometer is related to the phenomenon of weight generated in a reference mass known by the measuring device. The main source of accelerometer error is the “bias”, which corresponds to the offset of the output signal with respect to its true value, this constantly generates an error in the position that has a quadratic growth over time (SHALA & RODRIGUEZ, 2011; REGUEIRO, 2014). The calibration of the accelerometer measurement can be performed periodically, measuring the variation of acceleration of the device at rest and considering the acceleration due to the movement of the Earth (DESCAMPS-VILA, PÉREZ & CONESA, 2013).

Accelerometers are considered inaccurate, and even static ones have significant noise. The problem with this noise is that it is random, and when we talk about integrating this noisy acceleration twice to get the displacement, there is a huge inaccuracy, since the accumulation of errors would quickly make the speed and displacement completely unreal (CRESTANI, 2015). Some mechanisms are used to reduce this noise.

Usually filters are used, such as the Kalman filter. The Kalman filter is a simple algorithm that works recursively and dynamically, where you have a noisy dataset or with some type of interference and the algorithm tries to estimate the real value of that data (FUX, 2008).

Regarding the quality of the accelerometer data, D'Elia et al. (2013) carried out a study evaluating the uncertainties in the accelerometer data and developed a methodology to determine the calibration parameters for this sensor.

3.7 MAGNETOMETER

A magnetometer is a device for measuring the direction and intensity of magnetic fields. They are used in geophysics studies, for navigation, mineral prospecting, evaluation of interference in communications and so on. There are several types of magnetometers, among them there are vectors that measure the strength and direction of an Earth's magnetic field. In mobile devices, vector magnetometers are used to measure the component of the magnetic field in each direction relative to the spatial orientation of the device (SHALA & RODRIGUEZ, 2011; REGUEIRO, 2014).

Other sensors on the market use the magneto-resistive effect. These sensors use materials sensitive to the magnetic field, generally composed of Iron (Fe) and Nickel (Ne). Therefore, when these materials are exposed to the magnetic field, they change their resistance.

MEMS construction magnetometers use the resistive magneto effect or Hall effect to capture the magnetic fields, most of them use the Hall effect which consists of a conductive plate (STUHLER, 2022).

Geomagnetic sensor (magnetometer) improves GPS results by capturing the magnetic field. More simply, it is said to act like a compass detecting the planet's magnetic north pole. It is used, for example, on the Google Maps platform when it identifies the user's current position.

The magnetometer used to measure the yaw angle corresponds to the magnetic azimuth, it varies as the device is moved around the "Z" axis, it can be calibrated to help the gyroscope data to improve the drift issue, but in some cases, when The magnetometer is built into the IMU, depending on the project, may present a disadvantage if the environment being used is surrounded by ferromagnetic metal, or by magnetic interference from electric motors, as they can affect the reading of the magnetic field (ANDROID 2022; STUHLER, 2022).

When we define the current that passes through it, electrons begin to flow from one side of the plate to the other, creating a flux, when approaching a magnetic field

close to the plate, it will automatically interfere with the flow of electrons, deflecting them to one side of the plate, creating a positive and a negative side, when measuring between the two sides of the plate there will be a voltage that depends on the strength of the magnetic field and its direction (STUHLER, 2022).

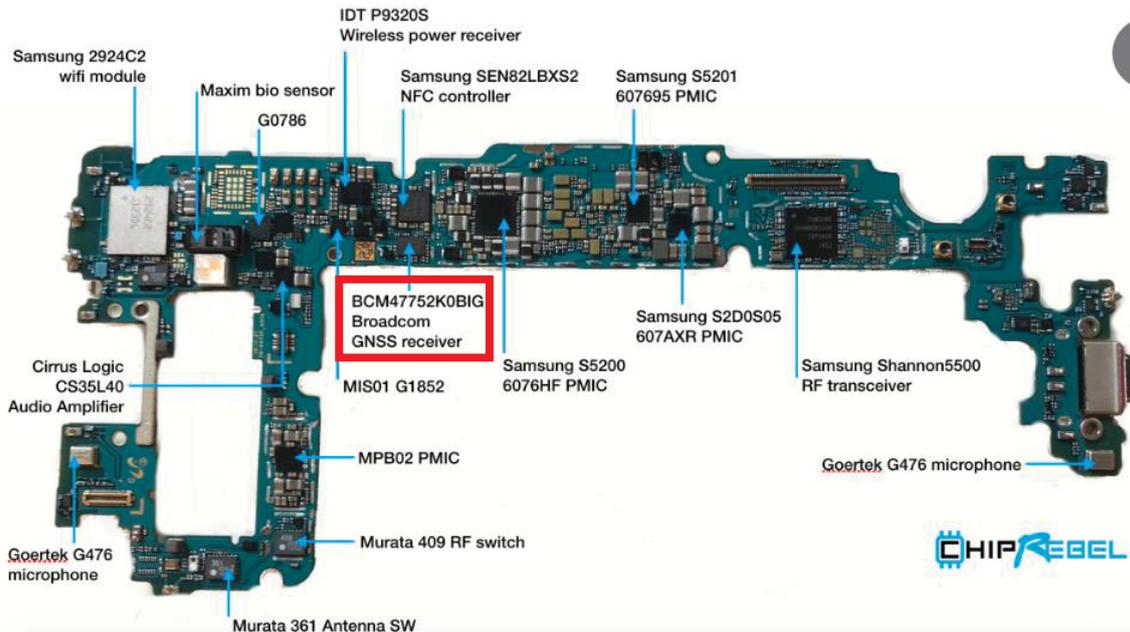
The main sources of errors in magnetometers are magnetic interference of the sensor and the presence of ferrous elements or material in the construction of the instrument. The error is estimated through long-term measurements on the device at rest (REGUEIRO, 2014). Odenwald (2019) presented some experiments to evaluate the quality of the digital compass from smartphones, evaluating how the variation of the data obtained from the measured magnetic north occurs in different environments.

Azimuth angle measurement using the geomagnetic sensor is considered unreliable due to the distortion of the Earth's magnetic field by soft iron and hard iron caused by geomagnetic disturbances. Although many studies have been carried out to determine how to compensate for this distortion, most disturbances cannot be compensated for in places with extreme disturbances. In most cases, studies on omnidirectional azimuth have been carried out, and there are no studies to determine the accuracy of the result, which could not have been applied in a real situation (OH & KIM, 2020).

3.8 GNSS

In the context of positioning by Global Navigation Satellite System (GNSS), the International Association of Geodesy (IAG), through sub-committee 4.1 (SC 4.1: Emerging positioning technologies and GNSS augmentation) linked to Commission 4 (Positioning and Applications), presents as one of its objectives research and development in low cost GNSS positioning systems, using smartphones. In Figure 3.7.1, you can see some sensors present in a specific model of smartphone, highlighted in the Figure is the GNSS sensor that has a few millimeters in size.

Figure 3.8.1 – Sensors present in the SAMSUNG Galaxy S10



Source: SANSUNG Galaxy S10.

Gomes (2019) conducted a survey to assess the quality of GNSS positioning performed by smartphones. The author presents that in this innovative context, certain applications have emerged aimed at positioning accuracy that allow storing data in files in the universal RINEX format, making it possible to carry out post-processing and, consequently, the possible improvement in the positional accuracy obtained by the mobile device. The author also highlights that among the existing technological innovations in the context of positioning via smartphones, it is worth mentioning the use of modern dual-frequency GNSS sensors, capable of collecting information from multiple constellations (eg. GPS, GLONASS, Galileo, Bei Dou and QZSS) and multiple frequencies (eg L1/L5, B1, E1/E5).

Another study carried out along this line aimed to assess the feasibility of obtaining improved positioning accuracy with raw GNSS measurements using Precise Point Positioning (PPP), and positioning accuracy from selected devices newly available on the market (AGGREY ET AL., 2020).

Through a new Application Programming Interface (API) implemented in Android 7 (API level 24) and its successors, it is possible to access raw GNSS data, such as the information used in the calculation of pseudodistances, navigation messages, information from satellite clocks, carrier wave phase, among others (GOMES, 2019).

By observing the great potential of this innovative methodology, the scientific community and companies in the field of geosciences have developed certain applications based on the modern API. The company Google made the first application available free of charge, called GnsS Logger, which makes it possible to store raw GNSS data in a specific format, enabling the analysis of this data in the GNSS Analysis app software, developed by the company Diggelen & Khider (2018).

3.9 LIDAR SCANNER

Historically, smartphones have integrated depth sensors and augmented reality. The first smartphone equipped with Time of Flight (ToF) camera and augmented reality features launched in the consumer market was in 2016. In 2020, an American company launched the iPad Pro 2020 and the iPhone 12 on the market with the presence of LiDAR sensors (COSTANTINO ET AL., 2022).

The term LiDAR scanner describes a new sensor that measures depth and detects objects in three dimensions. LiDAR sensor technology is widely used for various applications, however in 2020 it is the first time that this technology is used coupled with smartphones. It is important to emphasize that from a survey using a laser scanner, scans of hundreds and thousands of points are obtained for the 3D reconstitution of an environment or an object, which requires devices with a high operational capacity so that processing is possible and analysis of these data. In Figure 3.8.1 is possible to verify the specification of sensor embedded in these devices.

Figure 3.9.1 – Specifications of sensors in devices

Device	Huawei P30 Pro	iPhone 12 Pro	iPad 2021 Pro
Image			
Chipset	Huawei HiSilicon Kirin 980	Apple A14 Bionic	Apple M1
RAM	8 GB	6 GB	8 GB
Original operative system	Android 9 EMUI 9.1 Pie	iOS 14	iOS 14
Digital Camera	40 Mp + 20 Mp + 8 Mp	12 Mp + 12 Mp + 12 Mp	12MP + 10MP
Aperture Size	F 1.6 + F 2.2 + F 3.4	F 1.6 + F 2.4 + F 2	F 1.8 + F 2.4
Depth sensor	Sony IMX316 (ToF)	Sony IMX590	Sony IMX590
GNSS	GPS, GLONASS, BeiDou,	GPS, GLONASS, BeiDou,	GPS, GLONASS, BeiDou,
Constellation	Galileo, QZSS	Galileo, QZSS	Galileo, QZSS
Frequency	L1/L5	L1/L5	L1/L5
Inertial sensors	Accelerometer, gyroscope, magnetometer	Accelerometer, gyroscope, magnetometer	Accelerometer, gyroscope, magnetometer
Weight	191 g	189 g	466 g
Dimensions	158 × 73 × 8 mm	146.7 × 71.5 × 7.4 mm	247.6 × 178.5 × 5.9 mm

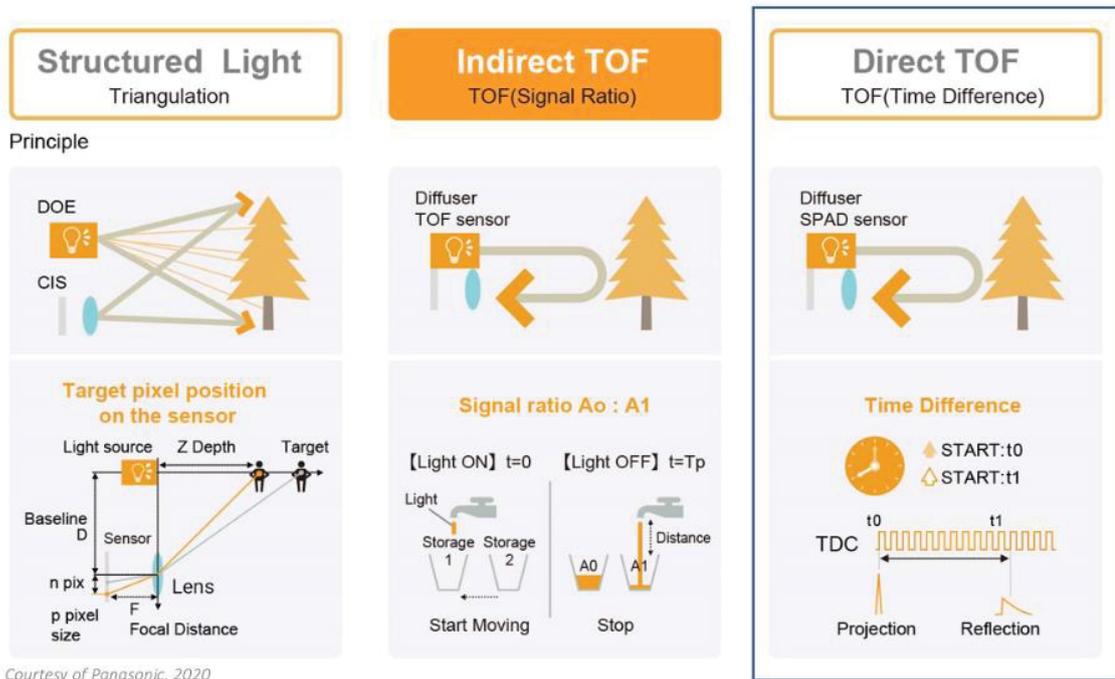
Source: Constantino et al. (2022).

Many systems designers (whether developing self-driving cars, smartphones, or tablets) have been exploring ways to add “depth” information to pixels and colors captured by 2-D image sensors. LiDARs are being adopted by the automotive industry to detect and map distances of objects around highly automated vehicles, for example (YOSHIDA, 2020).

In recent years, smartphones equipped with depth sensors have been launched in the consumer market. These sensors were advertised as “LiDAR scanners” for iOS devices and “time-of-flight depth cameras” (ToF cameras) for Android. Sensors were originally used to improve the quality of photos (e.g., improved camera focus, bokeh effect, etc.) and to enable augmented reality applications, but they proved suitable for other purposes (CONSTANTINO ET AL., 2022).

The LiDAR scanner used by smartphones features a specific technology used inside the unit to detect and measure depth. There are several technology options available to system designers for 3D surveying. They include stereo vision, structured light, and time of flight – the English term: Time of Flight (ToF). To make things even more complicated, ToF now comes in two types: indirect Time of Flight (iToF) and direct Time of Flight (dToF). iToF measures the phase shift, while dToF measures the direct time of flight (Figure 3.8.2).

Figure 3.9.2 – iToF e dToF



Source: Constantino et al. (2022).

With the launch of the Laser sensor for smartphones, 3D detection has become more detailed with the adoption of a direct time-of-flight sensor. To date, Apple's iPad Pro is the only consumer product that uses dToF. Many smartphone vendors already use iToF to take better photos (ToF can blur the background in photos), but not dToF. The structured light method provides high depth accuracy, but its downside is the complex post-processing required to calculate pattern matching depth. In contrast, the advantage of the dToF method is its ability to offer simple post-processing (CONSTANTINO ET AL., 2022).

Its challenge, however, is thought to be that it requires photodetectors with high sensitivity (such as single-photon avalanche diodes) and a form to measure time of flight with a small number of incident photons in a single measurement. So far, among 3D imaging methods, the iTOF method has been the most common. It provides high depth accuracy, simple post-processing and high spatial resolution using small photodetectors that are widely used in 2D image sensors. It is now using dToF for AR (CONSTANTINO ET AL., 2022).

The developed "LiDAR scanner" sensor consists of an emitter - a vertical cavity surface emission laser (VCSEL) from Lumentum and a receiver - near infrared (NIR)

CMOS image sensor that makes direct measurement of time of flight, developed by Sony.

Costantino et al. (2022) evaluated the performance of smartphone depth sensors (Time of Flight Camera (ToF) and Light Detection and Ranging (LiDAR) from Android (Huawei P30 Pro) and iOS (iPhone 12 Pro and iPad 2021 Pro) to build a cloud of 3D points. The quality of point clouds was evaluated through visual analysis and using three specific characteristics: surface variation, planarity and omnivariance. Based on this approach, some problems with point clouds generated by smartphones were highlighted, such as splitting loss of planarity and drift problems of the inertial navigation system. Furthermore, it can finally be deduced that, in the absence of scanning problems, the accuracies achieved with this type of scanning are ~1 to 3 cm (CONSTANTINO ET AL., 2022).

The authors Constantino et al. (2022) also presented some studies that used LiDAR sensor for different kinds of application. For example, Spreafico et al. (2021) presented research on the large-scale 3D mapping capabilities of the iPad Pro's LiDAR sensor. Focusing on architectural research applications, Spreafico et al. (2021) scanned a scene consisting of an outside emergency escape ladder connected to a building. The point cloud captured with the iPad Pro showed an accuracy of 0.02 m and an accuracy of 0.04 m, which - importantly - is suitable for architectural mapping at a scale of 1:200. Another example is Riquelme et al. (2021) used an iPhone 12 Pro to scan a mechanical excavation of 26 m Cretaceous marlstone and limestone rock face and rock discontinuities extracted from the point cloud.

3.10 EXPERIMENT

As previously mentioned, the orientation sensor is classified as a software sensor (Table 3.1) and serves to measure the degrees of rotation of the device along its three physical axes (x, y and z), as represented in Figure 3.2.1.

From the use of this sensor, it is possible to obtain the orientation angles, and these angles have a correspondence with the horizontal directions (and horizontal angles) and vertical angles measured with a total station. For comparison purposes, and to verify the accuracy of the data obtained with this software sensor, the experiment described below was performed.

Primarily, an application was developed using the software Android studio with the Kotlin programming language. This app allows the smartphone to display the corresponding value of the orientation angles measured with the smartphone. A base for the smartphone was also developed, which can be attached to the telescope of a total station, in order to verify the orientation angles measured with the total station, and the angles measured with the smartphone (Figure 3.9.1).

Figure 3.10.1 – Developed base coupled to the total station



Source: The authors (2022)

To carry out the experiments, a total station Leica TS15 model was used, which presents 1" of angular precision. It was used the smartphone model Xiaomi Redmi 8, which has the sensors necessary to obtain angular information.

The smartphone was attached to the developed base, and angular measurements were taken with the smartphone and with the total station. The total station was rotated along its main axis, and then the total station telescope was rotated to obtain different vertical angles.

In table 3.9.1 is possible to verify the vertical angles (pitch) measured with the total station and with the smartphone. Two series of readings were performed, varying the measured vertical angle between 0° and 75.16°.

Table 3.10-1 – Data from vertical angle measured with total station and App.

SERIES 1				SERIES 2			
Point	Total Station (°)	APP (°)	Diference (°) Diference (°)	Point	Total Station (°)	APP (°)	Diference (°) Diference (°)
1	0.00	2.99	-2.99	1	0.00	3.58	-3.58
2	45.00	51.37	-6.37	2	45.06	52.03	-6.97
3	60.03	62.40	-2.37	3	75.16	82.37	-7.21
4	0.00	2.99	-2.99	4	0.01	3.07	-3.06
5	45.02	51.34	-6.32	5	45.48	51.91	-6.43
6	60.01	66.80	-6.79	6	72.09	79.35	-7.26
Mean			-4.64	Mean			-5.75

Source: The Authors (2022).

It was observed that the average between the observed discrepancies was 4.64° in module in the first series of readings, and 5.75° in the second series of measurements for the vertical angles.

In table 3.9.2 it is possible to verify the horizontal directions measured with the total station and with the smartphone. Two series of readings were performed, varying the measurements between 44.85° and 319.89° .

Table 3.10-2 – Data from horizontal directions measured with total station and App

SERIES 1				SERIES 2			
Point	Total Station (°)	APP (°)	Diference (°) Diference (°)	Point	Total Station (°)	APP (°)	Diference (°) Diference (°)
1	44.85	45.00	0.15	1	45.27	45.00	-0.27
2	82.4	90.00	7.06	2	82.95	90.00	7.05
3	116.11	135.00	18.89	3	115.00	135.00	20.00
4	151.39	180.00	28.61	4	151.71	180.00	28.29
5	210.53	225.00	14.47	5	210.11	225.00	14.89
6	272.33	270.00	-2.33	6	274.75	270.00	-4.75
7	317.14	315.00	-2.14	7	319.89	315.00	-4.89
Mean			10.76	Mean			10.10

Source: The Authors (2022).

In table 3.9.2, it is possible to observe that the average between the observed discrepancies was 10.76° in module in the first series of readings, and 10.10° in the second series of measurements for the horizontal directions.

Although the data in tables 3.9.1 and 3.9.2 refer to angular measurements, it is observed that the discrepancies found are greater in relation to the horizontal directions. This occurs because the horizontal directions corresponding to the yaw

angle are measured from the orientation sensor, which considers a combination of sensors as shown in Table 3.3.2. The gravity and magnetic field sensors are used especially for the determination of horizontal angle. So it is possible to infer that this angle is directly influenced by the magnetic field. Therefore, it presents a greater variation compared to the vertical angle (pitch).

It can be seen that the discrepancies between the values measured by the APP and the total station for the horizontal directions are greater at angles closer to 150° . These discrepancies have a similar behavior in the two series of measurements performed, increasing as the measured direction increases, and decreasing as it approaches the initial measured direction. Due to this, it can be observed that there is a systematic error in the measurements that needs to be treated. However, the causes of this systematic error in the measurements of the horizontal direction measured from this orientation sensor have not yet been investigated.

3.11 FINAL CONSIDERATIONS

With the data from different sensors presented, it is possible to obtain the orientation of the smartphone and it is possible to determine the coordinates and measurements of objects from these sensors. The data obtained still have limitations, but an adequate precision for certain types of application, as seen in detail in the types of sensors presented in this article.

One of the main applications for using these data from sensors is the planning of a monitoring network or a topographic survey. It can be done through applications that help the field survey in loco and can be carried out from a previous visit to the study area, in which are evaluated the physical elements imposed in the place where the field work will be done. The development of tools to verify how and where the points of a monitoring network can be deployed, for example, can be done using mobile applications that use the sensors presented in this research. Thus, it could be analyzed if there is intervisibility between the points, the approximate location of where you want to implement the points of a geodetic monitoring network. Furthermore, it is possible to estimate the approximate values for the observations to be collected, necessary for the application of the concepts of error propagation to perform a pre-analysis of the geodesic network to be implemented.

The possibility of obtaining measurements in loco from mobile applications, planning a topographic survey based on measurements and previous data that can be collected for the purpose of surveying or even monitoring a certain area, facilitates field activities of a professional in the surveying area. It optimizes work, reduces costs and, depending on the purpose of the survey, avoids unnecessary field trips, since the needs for information related to the area under study can be met before carrying out the survey itself.

The gyroscope, accelerometer and magnetometer sensors allow to obtain the roll, pitch and yaw angles, in relation to the equipment axes, presented in item 1 of this article. Using these sensors, is possible to obtain, for example, the angles of rotation, inclination and approximate azimuth for a given positioning of the smartphone. They are sensitive sensors, so they present inconsistencies in the measurements of angles, depending on several factors, such as: the brand and model of the sensor attached to the smartphone; external factors such as the temperature of the environment in which the measurement is being carried out; and the Earth's magnetic field (for the magnetometer).

Another sensor presented was the GNSS. From their development, the GNSS sensors began to receive signals from different constellations and different carrier waves, which increasingly contributed to an improvement in the positional quality provided by the devices. Furthermore, the possibility of obtaining the raw tracking data and performing the post-processing of them, opens a huge field of possibilities for the development of positioning tools. The accuracy of the data measured by these sensors and the possibilities regarding data processing and analysis varies from device to device.

The last sensor presented was the Lidar sensor. This sensor features state-of-the-art technology that allows obtaining, for example, measured distances from the device. Its development for use in smartphones was initially aimed at improving the quality of image sensors present in smartphones, with the possibility of developing augmented reality. The first smartphones coupled with these sensors appeared on the market in 2020, so it is a recent technology.

Research and investigations into the quality of all these types of sensors still need to be deepened. But it is known that they have enormous potential to improve the ability of smartphones to be a practical measurement tool for users.

An example of how orientation sensors can be tested is given in the last topic of this research, in which is possible to verify a comparison between the angles measured from sensors of a smartphone and the angles measured from a full station with high precision. It was verified that for the measurement of the vertical angles, it is possible to obtain discrepancies of the order of 5.2° in module. For the horizontal orientation measures, it was observed a systematic error that still needs to be investigated.

Despite these results, it is known that technological advancement in microelectronics is a process in continuous evolution, allowing the use of MEMS sensors for applications in the field of geosciences. With the development of laser scanner sensors for smartphones, it is an indication that will be possible to measure distances from tools developed for smartphones with sufficient quality for various applications.

REFERENCES

Aggrey, J., Bisnath, S., Naciri, N., Shinghal G. & Yang, S. 2020, 'Multi-GNSS precise point positioning with next-generation smartphone measurements', *Journal of Spatial Science*, vol. 65, no. 1, pp. 79-98, DOI:10.1080/14498596.2019.1664944.

Andrejašic, M. 2008, 'Mems accelerometers', Seminar, University of Ljubljana, Ljubljana, viewed 28 November 2022, <https://faculty.uml.edu/xwang/16.541/2010/MEMS_accelerometers.pdf>.

Android 2022, Visão geral dos sensores, viewed 2 July 2022, <https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_overview?hl=pt-br>.

Aravena, C.A.A. 2018, 'Desenvolvimento de aplicação para posicionamento indoor por meio das redes wifi em ambientes internos', Master Thesis, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, viewed 2 July 2022, <<https://hdl.handle.net/1884/60080>>.

Aroeira, C. 2021, Types of Accelerometers, viewed 28 November 2022, <<https://www.dmc.pt/en/tipos-de-acelerometros>>.

Crestani, T. 2015, 'Desenvolvimento de API para rastreamento híbrido de dispositivos móveis em ambientes internos', Undergraduate Thesis, Instituto Federal Catarinense, Videira.

Conti, G., Ribeiro, S.R.A. & Dias, A.H. 2015, 'Arquitetura de um sistema de informação geográfica mobile para coleta de dados geográficos baseados em conceitos de cloud computing e banco de dados NoSQL', X Congresso Brasileiro de Agroinformática, 21-23 October, viewed 28 November 2022, <<https://www.>

researchgate.net/publication/324482003_Arquitetura_de_um_sistema_de_informacao_geografica_mobile_para_coleta_de_dados_geograficos_baseados_em_conceitos_de_cloud_computing_e_banco_de_dados_NoSQL>.

Constantino, D., Voza, G., Pepe, M. & Alfio, V.S. 2022, 'Smartphone LiDAR Technologies for Surveying and Reality Modelling in Urban Scenarios: Evaluation Methods, Performance and Challenges', *Applied System Innovation*, vol. 5, no. 4, 63, DOI:10.3390/asi5040063.

Daponte, P., De Vito, L., Picariello, F. & Riccio, M. 2013, 'State of the art and future developments of measurement applications on smartphones', *Measurement*, vol. 46, no. 9, pp. 3291-307, DOI:10.1016/j.measurement.2013.05.006.

D'Elia, M.G., Giudice, A., Graditi, G. & Paciello, V. 2013 'Measurement uncertainty on smart phone', *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications*, pp. 144-9, DOI:10.1109/CIVEMSA.2013.6617411.

Descamps-Vila, L., Pérez, A & Conesa, J. 2013, 'Integración de un sistema de posicionamiento Indoor en aplicaciones SIG para dispositivo móvil', VII Jornada de SIG libre, viewed 25 September 2022, <<https://dugi-doc.udg.edu/bitstream/handle/10256/7651/29Art-Integracion.pdf?sequence=1>>.

Diggelen, F.V. & Khider, M. 2018, *GNSS Analysis Tools from Google*, *Inside GNSS*, viewed 13 December 2022, <<https://insidengss.com/gnss-analysis-tools-from-google>>.

Geekfactory 2022, Geek Factory, viewed 10 August 2022, <<https://www.geekfactory.mx/>>.

Fux, S. 2008, 'Development of a planar low-cost Inertial Measurement Unit for UAVs and MAVs', Master Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich.

Galaxy S10 teardown 2022, Samsung Galaxy S0 teardown, viewed 04 October 2022, <<https://www.chiprebel.com/galaxy-s10-teardown/>>.

Grewal, M. & Andrews, A. 2010, 'How good is your gyro', *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 30, no. 1, pp. 12-86, DOI:10.1109/MCS.2009.935122.

Gomes, A. 2019, 'Avaliação da qualidade posicional de um sensor gnss de dupla frequência presente em um smartphone sob diferentes cenários e métodos de posicionamento', Master Thesis, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, viewed 4 October 2022, <<https://hdl.handle.net/1884/66320>>.

Hwang, J., Yun, H., Suh, Y., Cho, J. & Lee, D. 2012, 'Development of an RTK-GPS positioning application with an improved position error model for smartphones', *Sensors*, vol. 12, no. 10, pp. 12988-300, DOI:10.3390/s121012988.

IDC 2020, *Smartphone Market Share - OS Data Overview*, viewed 15 May 2020, <<https://www.idc.com/promo/smartphonemarket-share/os>>.

Kuhlmann, T., Garaizar, P. & Reips, U. 2021, 'Smartphone sensor accuracy varies from device to device in mobile research: the case of spatial orientation', *Behavior Research Methods*, vol. 53, no. 1, pp. 22-33, DOI:10.3758/s13428-020-01404-5.

Meneguzzi, L., Treis, R.F. & Cendron, M.M. 2016, 'Utilização de giroscópio e acelerômetro para identificação de movimentação em ambientes tridimensionais', *V Feira de iniciação científica e extensão*, 15-16 September, pp. 1-9, viewed 4 October 2022, <<http://videira.ifc.edu.br/fice/wp-content/uploads/sites/27/2016/09/10-Artigo-UTILIZA%C3%87%C3%83ODE-GIROSC%C3%93PIO-E.pdf>>.

MIT 2020, MIT app inventor, viewed 10 November 2020, <<http://appinventor.mit.edu>>.

Odenwald, S. 2019, 'Smartphone sensors for citizen science applications: Radioactivity and magnetism', *Citizen Science: Theory and Practice*, vol. 4, no. 1, 18, DOI:10.5334/cstp.158.

Oh, J. & Kim, M. 2020, 'Method to determine initial aiming azimuth accuracy using acceleration, gyroscope, and geomagnetic sensors', *ICT Express*, vol. 6, no. 2, pp. 117-20, DOI:10.1016/j.icte.2019.10.004.

Oliveira, A.L., Vianna, L.S., Nascimento, B.R., Vita Neto, M.L. & Santos, M.G.A. 2014, 'Um estudo sobre o sistema operacional Android', *Revista de trabalhos acadêmicos-campus Niterói*, no. 7, pp. 1-11, viewed 10 November 2022, <<http://revista.universo.edu.br/index.php?journal=1reta2&page=article&op=view&path%5B%5D=1182&path%5B%5D=886>>.

Passaro, V.M.N., Cuccovillo, A., Vaiani, L., De Carlo, M. & Campanella, C.E. 2017, 'Gyroscope technology and applications: a review in the industrial perspective', *Sensors*, vol. 17, no. 10, pp. 2284-317, DOI:10.3390/s17102284.

Peres, F.F.F., Scheer, S., Faria, É.F. & Vian, D. 2015, 'Realidade aumentada para o acesso à instrumentação da barragem de Itaipu', *XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens*, 12-14 May, Foz do Iguaçu, pp. 1-9, viewed 15 July 2022, <<https://docplayer.com.br/2200630-Realidade-aumentadapara-o-acesso-a-instrumentacao-da-barragem-de-itaipu.html>>.

Qazizada, M.E. & Pivarčiová, E. 2016, 'Mobile robot controlling possibilities of inertial navigation system', *Procedia Engineering*, vol. 149, pp. 404-13, DOI:10.1016/j.proeng.2016.06.685.

Regueiro, C.S. 2014, 'Error en el posicionamiento indoor em dispositivos móviles', *Undergraduate Thesis*, Universitat Oberta de Catalunya, Catalunya, viewed 15 July 2022, <<http://hdl.handle.net/10609/34081>>.

Wikidata 2022, Resonator, viewed 28 November 2022, <<https://www.wikidata.org/wiki/Q349669>>.

Riquelme, A., Tomás, R., Cano, M., Pastor, J.L. & Jordá-Bordehore, L. 2021, 'Extraction of discontinuity sets of rocky slopes using iPhone-12 Derived 3DPC and

Comparison to TLS and SfM Datasets', IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 833, no. 1, 012056, DOI:10.1088/1755-1315/833/1/012056.

Sampaio, L.F., Ito, A.L.B., Veiga, L.A.K., Alves, S.S.O., Carvajal, F.A.R. & Medeiros, L.I.B. 2022, 'Feasibility of using data from sensors embedded in smartphones to measure angles and distances', Revista Brasileira de Cartografia, vol. 74, no.4, pp. 805-18, DOI:10.14393/rbcv74n4-65814.

Shala, U. & Rodriguez, A. 2011, 'Indoor Positioning using Sensor- fusion in Android Devices', Master Thesis, Kristianstad University, Sweden, viewed 4 October 2022, <<http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A475619&dswid=-6119>>.

Spreafico, A., Chiabrando, F., Losè, L.T. & Tonolo, F.G. 2021, 'The Ipad Pro Built-In LIDAR sensor: 3d rapid mapping tests and quality assessment', International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 43, pp. 63-9, DOI:10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2021-63-2021.

Stuhler, J. 2022, 'Utilização de MEMS ((Micro-Electro-Mechanical Systems–sistemas microeletromecânico) para aplicações de circuitos de baixo custo de movimentação e sensoriamento', Metodologias e Aprendizado, vol. 5, pp. 82-91, DOI:10.21166/metapre.v5i.2696.

UFPR Electric / Sensors Operating Principle 2022, Acelerômetros, viewed 4 October 2022, <<http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/1999/joao/index.htm>>.

Weinberg, H. 2011, 'Gyro mechanical performance: the most important parameter', Analog Devices, pp. 1-5, viewed 26 October 2022, <[https://www.analog.com/en/technicalarticles/gyro-mechanical-performance.html#:~:text=The%20most%20significant%20are%20usually,\(or%20g%20sensitivity\)>](https://www.analog.com/en/technicalarticles/gyro-mechanical-performance.html#:~:text=The%20most%20significant%20are%20usually,(or%20g%20sensitivity)>)>.

Watson, J. 2016, Mems gyroscope provides precision inertial sensing in harsh, high temperature environments, viewed 8 May 2021, <<https://www.analog.com/media/en/technicaldocumentation/tech-articles/MEMS-Gyroscope-Provides-Precision-Inertialensing-in-Harsh-High-Temps.pdf>>.

Xia, D., Yu, C. & Kong, L. 2014, 'The development of micromachined gyroscope structure and circuitry technology', Sensors, vol. 14, no. 1, pp. 1394-473, DOI:10.3390/s140101394.

Yoshida, J. 2020, Breaking Down iPad Pro 11's LiDAR Scanner, viewed 28 September 2022, <<https://www.eetimes.com/breaking-down-ipad-pro-11s-lidar-scanner>>.

Capítulo 4

PROPOSTA DE UMA SOLUÇÃO COMPUTACIONAL UTILIZANDO SMARTPHONE PARA AUTOMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE PRÉ-ANÁLISE VISANDO O MONITORAMENTO DE UNIDADES ESTRUTURAIS

O monitoramento de grandes estruturas é realizado por meio de técnicas físicas e geodésicas e busca fornecer informações sobre suas condições para fins de manutenção e controle. Para realizar o monitoramento geodésico é necessário estabelecer uma rede de monitoramento geodésico que deve ser previamente planejada por meio de uma pré-análise, etapa que normalmente é realizada em escritório, com base em plantas e projetos da área. As atividades de levantamentos com objetivo de monitorar estruturas poderiam ser facilitadas se a etapa de pré-análise para a configuração geométrica da rede de monitoramento fosse realizada in loco, uma vez que permitiria analisar as limitações físicas existentes na própria área de estudos. Com isso, essa pesquisa tem como objetivo apresentar uma proposta de automatização para a etapa de planejamento do levantamento de uma rede de monitoramento geodésico utilizando smartphones, de forma que esta possa ser realizada in loco de forma prática, e que permita ao usuário analisar as possibilidades de implantação dos pontos que irão incorporar a rede de monitoramento. As etapas desta pesquisa consistiram no desenvolvimento de uma proposta de aplicativo que engloba o levantamento dos pontos da rede de monitoramento geodésico in loco por meio de sensores de smartphones, e posteriormente o ajuste da rede para análise do usuário. Como resultado, foi apresentado um escopo da aplicação desenvolvida, e como seria realizado o levantamento utilizando o método proposto. Para isso, foram levantados alguns pontos em campo utilizando o aplicativo proposto, e a pré-análise da rede de monitoramento foi simulada através dos dados obtidos com o smartphone.

4.1 INTRODUÇÃO

A automação e a automatização pode ser definida como um conjunto de técnicas por meio das quais são construídos sistemas capazes de atuar de forma eficiente utilizando as informações recebidas (COSTA, LISBOA E SANTOS, 2002). Algumas características principais da automação são: o uso da eletrônica, a possibilidade de utilização de interfaces com equipamentos eletrônicos, além da utilização de novos algoritmos para processamento de dados. A utilização da automação para avaliar e executar algumas funções em levantamentos geodésicos permite aumentar a eficiência, além de garantir que os levantamentos sejam executados de forma otimizada. Modernamente, algumas técnicas de observação podem ser controladas remotamente economizando tempo em atividades repetitivas, além de aumentar a produtividade e garantir a qualidade dos dados coletados (JERKE ET AL., 2022).

A composição final da precisão de um trabalho de posicionamento geodésico, como o monitoramento de estruturas, depende não apenas dos equipamentos, mas também do modelo matemático utilizado para determinar as grandezas de interesse, precisão dos equipamentos empregados e da geometria de observação, e da geometria de observação, aqui entendida como a disposição dos pontos que serão utilizados durante o processo de medição. Uma forma de melhorar a qualidade das observações finais do levantamento é realizar a etapa de planejamento das atividades de campo. Nesta fase, é necessário um conhecimento a priori da precisão das observações, para que se possa inferir o quanto as observações, e conseqüentemente os resultados, serão afetados pelas condições instrumentais e ambientais (SANTOS, 1999).

Para planejar um levantamento voltado ao monitoramento é importante compreender alguns conceitos fundamentais, como o conceito de redes geodésicas. As redes geodésicas consistem num conjunto de pontos materializados no terreno cujas coordenadas são determinadas em relação a uma referência bem definida e estimadas através de observações terrestres ou, num contexto mais moderno, de observações espaciais (KLEIN, 2014). As redes geodésicas possuem diversas aplicações no contexto da engenharia, incluindo: materialização de um sistema de referência para o usuário; suporte para mapeamento e navegação; disponibilização de pontos de apoio para realização de monitoramento; entre outros. Para a aplicação de uma rede voltada ao monitoramento de estruturas é necessário um levantamento de campo para implantação dos pontos que irão compor a rede geodésica de monitoramento, considerando a posição dos pontos de referência e os pontos objetos a serem medidos (SAMPAIO, 2019).

Quando o termo rede geodésica é abordado dentro de um contexto de monitoramento de estruturas, é importante entender que a rede pode ser dividida em uma rede de controle - que normalmente é oriunda de técnicas de posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) ou, como a triangulação e trilateração - e a rede de pontos a serem monitorados (ou seja, a rede de pontos-objeto), que normalmente é levantada usando técnicas, como o método de irradiação tridimensional ou métodos clássicos como interseção (KHAMENEH, 2017; KLEIN 2014; KUANG, 1996). Para realizar o monitoramento é necessário que estas redes estejam conectadas e planejadas de forma integrada para permitir a previsão de erros

envolvendo as técnicas aplicadas, e conseqüentemente garantir que estas técnicas permitam a detecção de deslocamentos na estrutura de forma confiável.

Um planejamento ideal da rede de monitoramento geodésico deve levar em consideração, a rede de controle geodésico, e as técnicas geodésicas de monitoramento da rede de pontos-objeto de forma planejada e automatizada, garantindo principalmente o atendimento aos requisitos delimitados para estruturas de monitoramento. Assim, dentro da região entendida como de interesse para o monitoramento, pode-se variar a posição final dos pontos-objeto de forma a melhorar a configuração geométrica da observação, buscando-se mínimos desvios-padrão propagados (SAMPAIO, 2019). Ter a capacidade de realizar este planejamento diretamente em campo representa um ganho dentro do processo de monitoramento, seja do ponto de vista de melhoria da qualidade dos dados e informações obtidas, seja na rapidez de obter-se uma solução de planejamento em tempo real.

Alguns dos pré-requisitos necessários para se estabelecer em uma etapa de pré-análise são: quais técnicas de levantamento adotar, quais equipamentos (dentro das possibilidades disponíveis), onde instalar o equipamento (considerando as limitações da área de estudo), qual a precisão necessária para a pesquisa, entre outros. Nesse contexto, estabeleceu-se o seguinte problema de pesquisa:

Como automatizar a etapa de pré-análise para que ela possa ser realizada de forma interativa e iterativa, na própria área de estudo, facilitando assim o planejamento da rede de monitoramento geodésico, garantindo que sejam avaliadas as diferentes configurações para a rede de monitoramento geodésico?

O processo de planejamento da rede de monitoramento é iterativo face a necessidade de ajuste do posicionamento definido para os pontos da rede devido às particularidades e limitações encontradas na área onde será implementada. Este processo é realizado na atualidade em escritório, através da definição de cenários possíveis para a configuração dos pontos e aplicação de conceitos de propagação de covariâncias, buscando maximizar a precisão obtida nas coordenadas finais dos pontos da rede de monitoramento.

Existem diversas vantagens para a realização do planejamento do levantamento na própria área de estudos, dentre elas: a possibilidade de verificar se existe intervisibilidade entre os pontos da rede de monitoramento, verificar as condições locais do solo para implantação dos pontos de controle, possibilidade de instalação do equipamento de medição ou do prisma refletor em determinado local,

adequação do levantamento sem necessidade de voltar a campo, redução de tempo e facilidades e geração de diferentes configurações de redes, vantagens estas que trazem economia para a realização do trabalho de levantamento.

Os avanços tecnológicos permitiram o desenvolvimento de ferramentas para automatizar e controlar os processos de medições utilizando dispositivos móveis como tablets e smartphones. A utilização destes dispositivos não substitui equipamentos de alta precisão utilizados em Geodésia, mas tornaram-se ferramentas úteis em atividades que auxiliam, por exemplo, no planejamento e controle das atividades de campo (SAMPAIO et al., 2022).

Daponte et al. (2013) apresentaram alguns aplicativos de medição utilizados em smartphones. Esses autores definem smartphones modernos como sendo equipamentos que contêm diferentes tipos de sensores, para que possam ser utilizados como instrumentos de medição. Além disso, apresentam também uma revisão das aplicações que utilizam sensores inteligentes e as interfaces de comunicação disponíveis nesses dispositivos.

Dentro das ciências geodésicas, já foram apresentados alguns estudos no contexto da utilização de smartphones para diferentes aplicações como: Sistemas de Informação Geográfica (SIG); fotogrametria – como aplicações corporativas para planejamento de voo aerofotogramétrico; monitoramento de estruturas e levantamentos GNSS (CONTI, RIBEIRO & DIAS 2015; HWANG ET AL. 2012; PERES ET AL. 2015; SAMPAIO ET AL. 2022).

Os smartphones possuem sensores instalados desenvolvidos com uma tecnologia conhecida como MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*), ou seja, contêm estruturas microeletrônicas e micromecânicas. A tecnologia MEMS é utilizada para o desenvolvimento de sensores, como o acelerômetro, o giroscópio e o magnetômetro, que possuem três eixos (SAMPAIO, 2023).

Para a maioria dos sensores, o sistema de coordenadas é definido em relação à tela do dispositivo quando o dispositivo é mantido na orientação padrão, ou seja, quando o smartphone está na posição retrato. Neste caso, o eixo “X” é horizontal e aponta para a direita, o eixo “Y” é vertical e aponta para cima e o eixo Z aponta para longe da tela. Neste sistema, as coordenadas atrás da tela possuem valores Z negativos (ANDROID, 2022 apud SAMPAIO, 2023).

Embora a disponibilidade do sensor varie de acordo com o dispositivo, ela também pode variar entre as versões do sistema operacional do dispositivo usado.

Portanto, é importante saber qual sistema operacional e qual versão está sendo utilizada para verificar se é ou não possível utilizar dados de determinados sensores. A maioria dos dispositivos possui sensores integrados que geram dados brutos que são úteis para monitorar movimentos ou posicionamento tridimensional ou para rastrear mudanças no ambiente.

Devido a essa possibilidade de utilização dos sensores internos dos smartphones para se obter posicionamento, o que também pode ser visto nos estudos apresentados por Sampaio et al. (2022 e 2023), verificou-se a possibilidade de realizar a pré-análise utilizando esses dispositivos móveis.

A integração das etapas de planejamento, incluindo o planejamento da rede de monitoramento, composta pela rede de referência e pela rede pontos-objeto, pode ser feita através de aplicativos que auxiliam no planejamento do levantamento de campo in loco, com possibilidade de realizar o planejamento percorrendo a área de estudo e avaliando os elementos físicos impostos no local onde será realizado o trabalho de campo.

Esta pesquisa abrange o levantamento e análise de requisitos para o planejamento de redes de monitoramento e o design do projeto do aplicativo voltado para a verificação em campo de como e onde os pontos da rede de monitoramento podem ser implantados, utilizando um aplicativo móvel. Esta etapa de planejamento é necessária em qualquer projeto de monitoramento.

Na Figura 4.1.1, observa-se uma visita realizada em campo para a definição dos locais dos pontos de controle para o projeto de monitoramento da Hidrelétrica José Richa, localizada entre as cidades de Capitão Leônidas Marques e Nova Prata do Iguçu, no Paraná. Inicialmente os responsáveis pela instalação do marco estão visitando o local do possível ponto e depois o ponto de controle já construído no local.

Figura 4.1.1 – Escolha da posição dos pontos de controle de uma rede de monitoramento



Fonte: FAGGION, et al. (2012)

A ideia é integrar a possibilidade de obtenção de medições in loco com aplicativos móveis, com a possibilidade de planejamento da rede de referência e da rede de pontos-objeto de forma que possibilite uma etapa de planejamento mais prática e eficiente. Assim, o objetivo geral desta pesquisa é propor uma solução automatizada para o processo de pré-análise visando o planejamento da rede de monitoramento de estruturas in loco.

4.2 PLANEJAMENTO DA REDE DE MONITORAMENTO

O conceito de redes geodésicas é um clássico na literatura sobre o assunto. Antes do advento dos sistemas de posicionamento por satélite ou medidores eletrônicos de distância, na clássica divisão da Geodésia em geométrica e física, já existia a figura da rede geodésica (NOAA, 1987; GEMAEL, 1994; KUANG, 1996; GHILANI, 2017; KLEIN, 2014).

De acordo com NOAA (1987) a definição de rede é:

Um conjunto consistindo em: (a) estações para as quais as relações geométricas foram determinadas e que estão relacionadas de forma que a remoção de uma estação do conjunto afetará as relações (distâncias, direções, coordenadas etc.) entre as outras estações; e (b) linhas conectando as estações para mostrar essa interdependência.

Estas linhas representam distâncias, direções ou ângulos ajustados, ou a sequência em que as medições foram feitas. Por exemplo, uma rede de triangulação consiste em estações cujas coordenadas horizontais foram determinadas e linhas que representam, de uma forma geral, as direções entre as estações. As linhas que ligam as estações formam circuitos fechados; todas as linhas conectam pelo menos dois pontos diferentes e cada ponto está em pelo menos duas linhas diferentes. Isto decorre da condição de que os valores das coordenadas de cada estação são interdependentes (NOAA, 1987).

Adicionalmente, NOAA (1987) define rede geodésica (“*geodetic network*”) como uma rede cujos nós são estações de levantamento ou estações de gravidade. Ressalte-se o uso da palavra “nós”, ou junções, dizendo que os mesmos são estações de medida (“*survey stations*”).

Em uma visão clássica as redes geodésicas eram divididas em redes planimétricas e altimétricas. As redes planimétricas eram materializadas a partir de técnicas como triangulação, trilateração e poligonação (GEMAEL, 1994), ou seja, eram baseadas em medidas de direções e/ou distâncias. Já as redes altimétricas eram materializadas/ implantadas a partir da execução de nivelamento geométrico. Atualmente com a evolução da tecnologia de posicionamento GNSS, as redes são estabelecidas a partir do rastreamento contínuo de receptores GNSS instalados em posições estratégicas, permitindo a determinação de uma rede tridimensional.

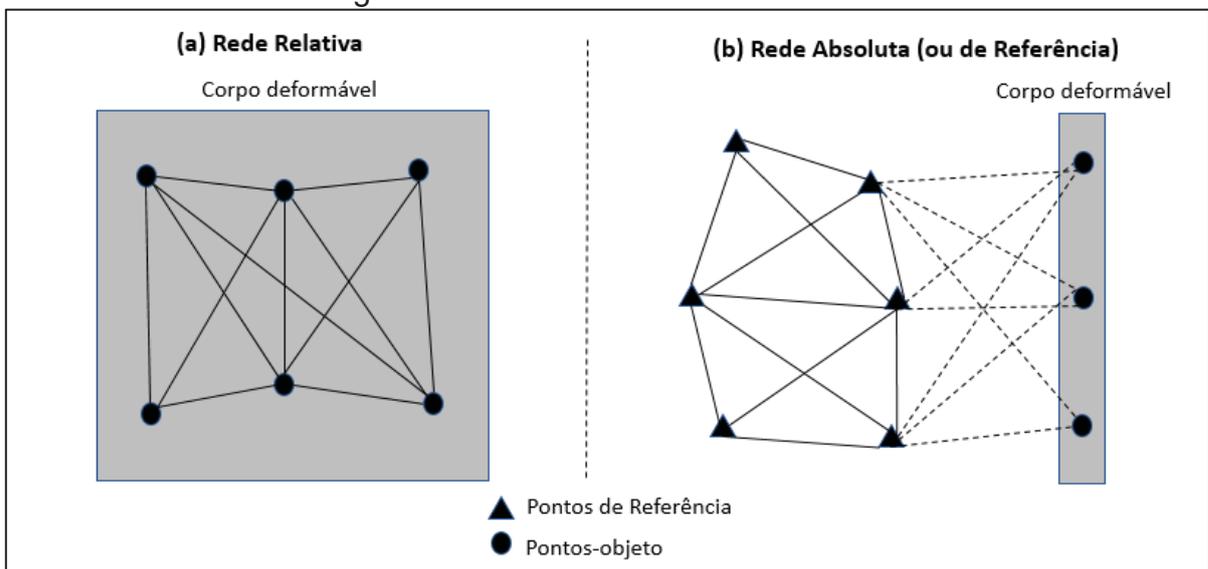
Kuang (1996) trata especificamente de redes de monitoramento de deformações (chamada pelo autor de rede de monitoramento de deformações (nomenclatura utilizada pelo autor). O autor define esta rede de monitoramento como uma rede geodésica acrescida de medições não geodésicas isoladas que podem ou não estar conectadas geometricamente à rede geodésica. Aborda que os estudos apresentados se referem a redes geodésicas estabelecidas especificamente para o monitoramento de deformações.

O Department of the Army (2002), em um tratado sobre monitoramento de estruturas, o conceito genérico de rede também passa a ter um foco local: a aplicação para monitoramento de estruturas. Assim tem-se o termo Rede de Referência (*Reference Network*). Nesta visão são introduzidos dois conceitos, o de pontos monitorados na estrutura (*structural monitoring points*) e estações de controle (*control station*). Também é citado o termo “estações de referência”, subentendidas como

estações de controle. Aqui já se percebe o foco em uma rede voltada ao monitoramento geodésico de pontos.

O autor Chrzanowski (1981) denomina essas redes citadas como sendo: (a) redes relativas, nas quais os pontos que compõem a rede estão situados na região sob deformação, que pode ser modelada através de medições repetidas ao longo do tempo; e (b) redes de referência, nas quais alguns pontos se situam fora da região sob deformação, permitindo a determinação dos deslocamentos absolutos dos pontos na área deformável, conforme ilustra a Figura 4.2.1:

Figura 4.2.1 – Redes de monitoramento



Fonte: Adaptado de Santos (1999) apud Sampaio (2019)

Caspary (2000) no contexto de redes voltadas para o monitoramento, diz que o objeto ou área sob investigação é representado por um número de pontos que são monumentados de forma permanente. O que transforma este grupo de pontos em uma rede geodésica são as observações geodésicas realizadas. Aqui um outro conceito importante, o de pontos-objeto e pontos de referência. Os pontos-objeto são os pontos para os quais deseja-se determinar as coordenadas ao longo do processo de monitoramento, em relação aos pontos de referência.

Assim, nesta pesquisa é utilizado o conceito de rede de monitoramento geodésico, que consiste em um conjunto de pontos de referência ou controle e pontos-objeto. Os pontos-objeto têm suas coordenadas determinadas a partir dos pontos de controle, por técnicas de posicionamento terrestre baseadas em leituras de direções horizontais, ângulos verticais e distâncias inclinadas, além de técnicas espaciais. Ao

abordar o processo de planejamento automatizado da rede em campo, estes dois tipos de pontos serão associados, buscando a flexibilidade de configuração da geometria dos pontos de controle, mas também dos pontos objeto em relação aos pontos de referência.

Para analisar o esquema de configuração e a geometria de uma rede de monitoramento, podem ser utilizadas observações simuladas. Os requisitos para esta análise são:

1. As coordenadas aproximadas das estações (que permitem obter observações simuladas);
2. O tipo de observações propostas (distâncias, direções, azimutes etc.) para o monitoramento dos pontos-objeto e a posição dos mesmos e sua posição na rede;
3. A precisão prevista para cada tipo de observação.

O ajuste da rede de referência, em cada campanha de monitoramento, permite verificar qualquer alteração nas coordenadas das estações de referência. Métodos de posicionamento GNSS isolados ou GNSS combinados com medições eletrônicas de distância de precisão são sugeridos para monitorar a estabilidade da rede de referência. As medições eletrônicas de distância fornecem redundância adicional para a rede como uma verificação externa dos resultados do GNSS.

A precisão dos deslocamento depende da estabilidade da rede de referência. Desta forma, a rede de referência é analisada separadamente para detectar estações de referência instáveis na rede de monitoramento.

Além da rede de referência, é importante planejar a rede de pontos-objeto. A ligação entre estas redes é feita de forma que o levantamento dos pontos-objeto seja realizado a partir dos pontos implantados da rede de referência. Porém, como os pontos-objeto estão instalados na estrutura a ser monitorada, esses pontos geralmente são levantados por meio de técnicas que envolvem medição de direções e distâncias, como o método de irradiação tridimensional. Sampaio (2019) apresentou uma metodologia para seleção de pontos-objeto voltados ao monitoramento de estruturas, baseada no cálculo da propagação do erro para toda a área do objeto a ser monitorado, permitindo a escolha dos pontos objetos, levando em consideração o instrumento e a técnica a ser utilizada para seu levantamento de forma a minimizar o efeito da propagação. Esta mesma metodologia pode ser aplicada como ferramenta para verificar o erro (no sentido de incerteza) esperado para estes pontos para planejar a rede de pontos-objeto.

O processo de automação para a pré-seleção de pontos da rede de monitoramento geodésico passa por diversas etapas. A inicial é estabelecer o propósito da mesma, que naturalmente é o monitoramento de estruturas, o que pode parecer redundante é importante no sentido de diferenciar a rede que será criada de outros tipos de rede geodésicas, como redes fundamentais, de apoio a cadastro e outros.

Grafarend (1974) estabeleceu as seguintes fases para a definição de uma rede geodésica de monitoramento: o projeto de ordem zero, que está ligado à escolha de um sistema de referência. O projeto de primeira ordem que se refere à geometria da rede, e depende da topografia local e da forma da estrutura a ser monitorada.

O projeto de segunda ordem, no qual deve ser feita a escolha dos procedimentos de observação e de medição, ou seja, a escolha da técnica de levantamento a ser utilizada. E por fim, o projeto de terceira ordem que engloba melhorar uma rede pré-existente. Vanícek e Krakiwsky (1986) também consideram os projetos combinados, que consistem em otimizar, simultaneamente, os projetos de primeira ordem e de segunda ordem.

Kuang (1996) define algumas especificações para o projeto de redes de monitoramento, dentre elas:

1. Não existe projeto de ordem zero nas redes de monitoramento. No caso das redes de referência, os deslocamentos são determinados a partir da comparação entre coordenadas determinadas em épocas distintas, com respeito ao mesmo *datum*, definido na época inicial, e cujo movimento nas épocas subsequentes deve ser identificado.

2. Em relação ao projeto de primeira ordem, a forma da rede de monitoramento depende da topografia do local ou da forma da estrutura a ser monitorada. Contudo, sempre é possível que alguns dos pontos que compõem a rede possam ter suas localizações alteradas, melhorando a configuração da rede, seguindo algum critério de otimização. Nas redes de referência, pontos de controle devem se situar fora da área sob deformação, ao passo que os pontos-objeto de estudo devem estar distribuídos dentro da área sujeita à deformação.

3. O projeto de segunda ordem para as redes de monitoramento consiste em encontrar as acurácias das observáveis, isto é, da matriz peso, que conduzam à determinação dos parâmetros o mais perto possível do ideal para o propósito do

monitoramento. A solução do projeto de segunda ordem possibilita a escolha dos procedimentos de medição e observação.

4. A questão do projeto de terceira ordem está ligada à melhoria de uma rede de monitoramento existente. Pode existir, por exemplo, quando as acurácias associadas aos deslocamentos ou parâmetros de deformação não sejam satisfatórias, ou quando a análise das deformações mostrar uma tendência incompatível com a realidade. Nestes casos, a rede de monitoramento deve ser estendida por pontos ou observações adicionais.

No escopo deste trabalho a proposta de automação pode ser aplicada em todos os níveis de projeto, sendo que os projetos de primeira ordem, segunda ordem e terceira ordem podem ser identificados nas etapas do processo de planejamento proposto que será apresenta no item 4.3.

4.3 PROPOSTA DO SISTEMA DE PLANEJAMENTO DA REDE DE MONITORAMENTO GEODÉSICO

As etapas do sistema proposto podem ser verificas na Figura 4.3.1. Nesta figura podem ser verificadas 5 etapas principais.

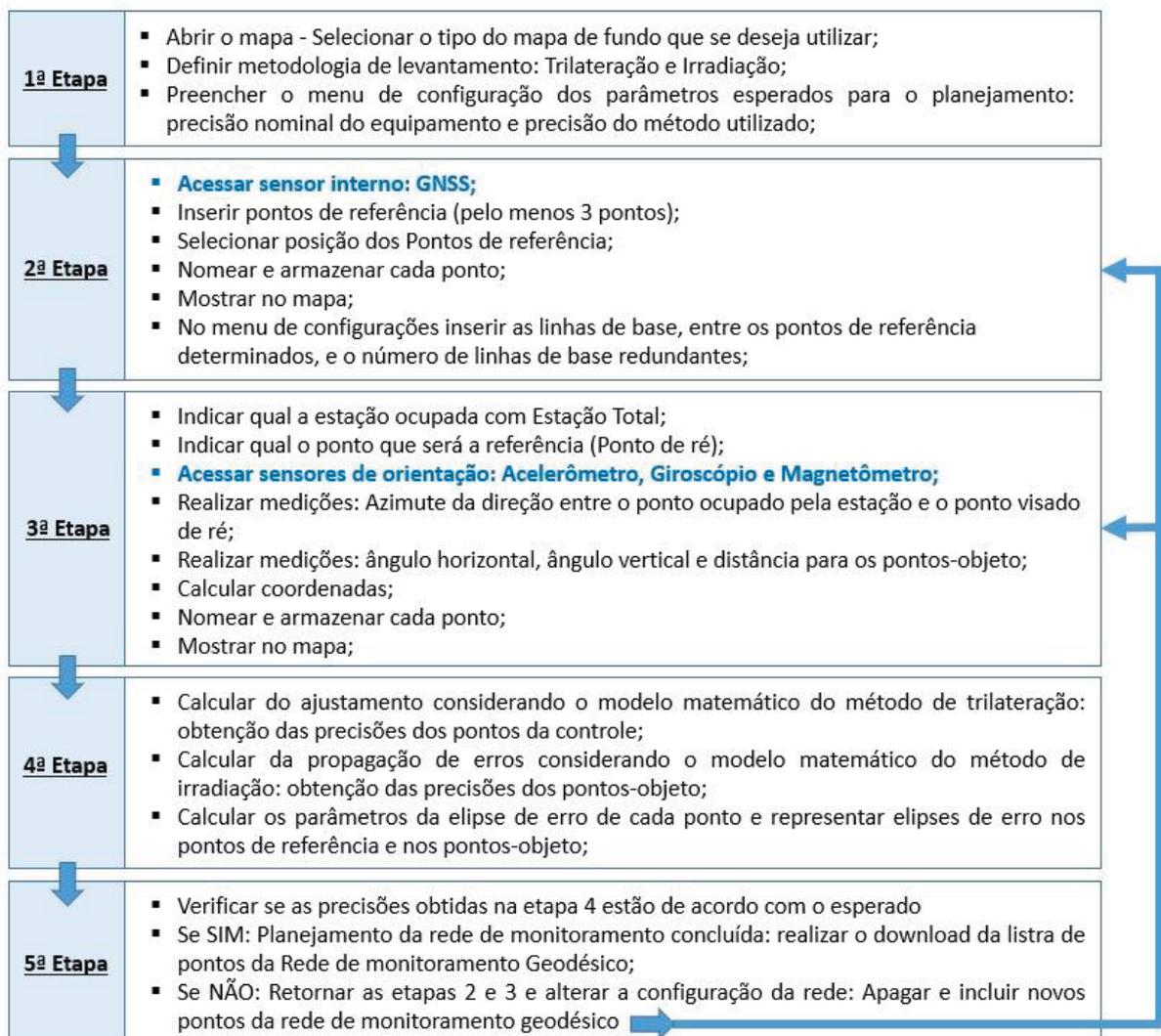
A primeira etapa engloba a definição dos métodos de levantamento que serão aplicados assim como a definição de alguns parâmetros necessários para a realização do planejamento como a precisão nominal do equipamento e do método de levantamento que será utilizado. Na segunda e na terceira etapa ocorre a definição da geometria do problema visando realizar a propagação dos erros. Para a segunda e terceira etapa ocorre a definição da geometria do problema visando realizar a propagação dos erros. A quarta etapa consiste nos cálculos efetivos do ajustamento e da propagação de erros considerando os métodos de irradiação e trilateração propostos. E a última etapa consiste em avaliar se o planejamento realizado está de acordo com o esperado para a proposta ou não.

É possível realizar uma conexão com as etapas de projeto definidas por Kuang (1996). Sendo que o projeto de primeira ordem engloba o design da rede de monitoramento, que será definido nas etapas 2 e 3 do sistema proposto. O design da rede, onde é feito o projeto da rede de monitoramento geodésico, incluindo a definição do posicionamento dos pontos de controle, onde serão estacionados os equipamentos

de medida e os pontos objetos. Neste processo deve-se certificar que a geometria da rede esteja bem distribuída e otimizada para seus objetivos.

No projeto de segunda ordem ocorre a definição de metodologia de levantamento e do processo de coleta de dados. Estas informações são utilizadas no processo de cálculo de propagação de variâncias, que ocorre na quarta etapa do sistema proposto. Já o projeto de terceira ordem está contido na quinta etapa do sistema proposto, no qual podem ser adicionados ou excluídos pontos da rede de monitoramento com o objetivo de melhorar e adequar a rede de monitoramento avaliada.

Figura 4.3.1 – Etapas do sistema proposto para o planejamento da rede de monitoramento



Fonte: Os autores (2023).

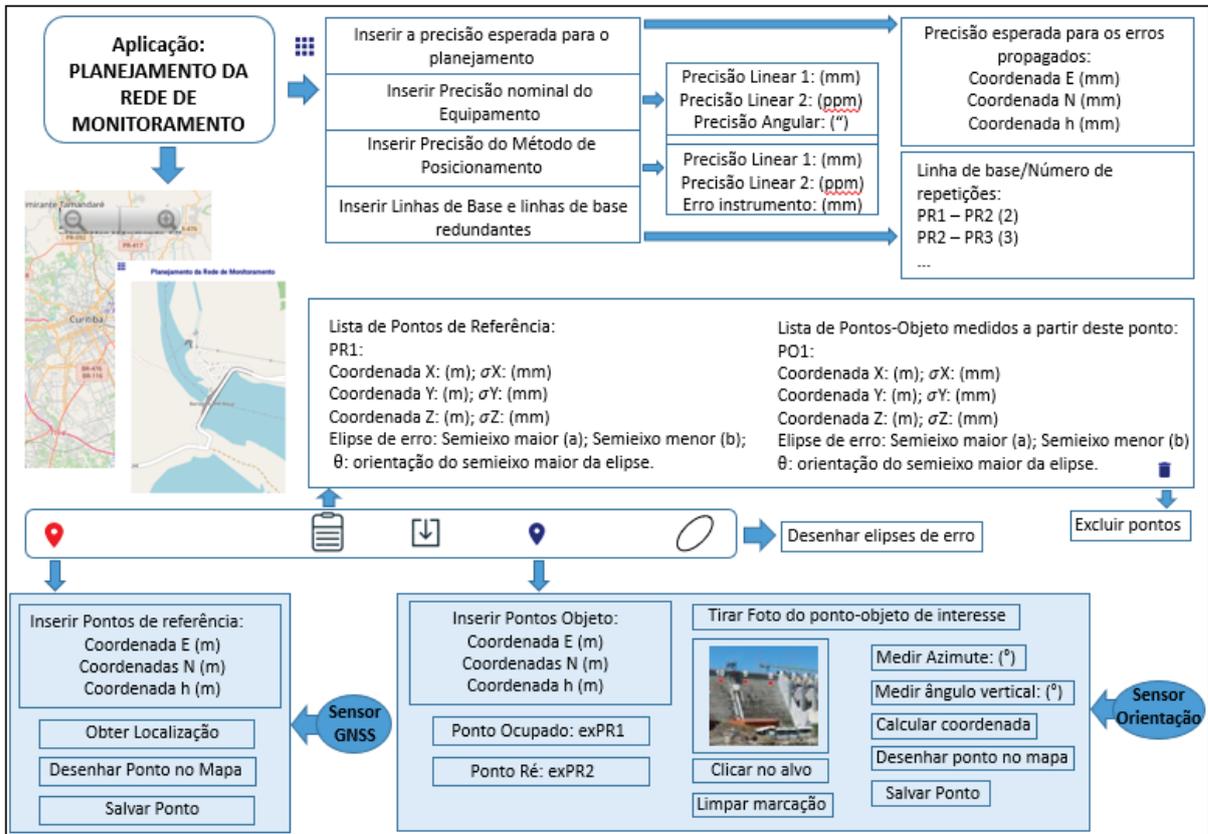
Para facilitar a execução e implementação das etapas apresentadas, na Figura 4.3.1 pode-se verificar um escopo de como essas etapas estarão presentes na aplicação proposta. Verifica-se que a ideia principal é apresentar o mapa de fundo no sistema, onde irão aparecer os pontos da rede de monitoramento após levantados pelos sensores do smartphone. Verifica-se que a ideia principal é apresentar o mapa de fundo no sistema, onde irão aparecer os pontos da rede de monitoramento após levantados destes pontos pelos sensores do smartphone. Dentre os ícones apresentados na Figura 4.3.2 estão dois marcadores. O marcador vermelho corresponde a execução da segunda etapa apresentada na Figura 4.3.1, na qual serão inseridos os pontos da rede que serão levantados com o sensor GNSS.

Já o marcador azul (Figura 4.3.2) corresponde a execução da terceira etapa apresentada na Figura 4.3.1, na qual serão inseridos os pontos levantados a partir dos sensores de orientação, sendo estes o acelerômetro, o giroscópio e o magnetômetro.

Os demais ícones apresentados na Figura 4.3.2 representam: a lista de pontos levantados para a rede de monitoramento com suas respectivas precisões calculadas; o download desses pontos para compartilhamento e utilização em outras plataformas.

A primeira etapa apresentada na Figura 4.3.1 é executada a partir de um menu de configurações que pode ser preenchido no sistema a partir de um ícone apresentado na Figura 4.3.2 na parte superior. Já a última etapa apresentada pode ser executada no sistema a partir do ícone de excluir os pontos que não apresentam a precisão adequada para a rede, ícone esse que pode ser verificado na Figura 4.3.2 dentro da lista de pontos criados, e posteriormente a inclusão de novos pontos utilizando os marcadores vermelho e azul.

Figura 4.3.2 – Interface do sistema proposto para o planejamento da rede de monitoramento



Fonte: Os autores (2023).

4.4 DEFINIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PARA A PRÉ-ANÁLISE

Para a definição do modelo matemático utilizado no sistema proposto, as formulações matemáticas serão apresentadas em duas etapas: na primeira etapa apresenta-se os cálculos para realizar o ajustamento e determinação das precisões dos pontos de controle; e na segunda etapa será apresentado o modelo matemático do método de irradiação tridimensional. o modelo matemático do método de irradiação tridimensional, utilizado para a determinação da precisão dos pontos-objeto.

4.4.1 Determinação das precisões dos pontos de controle

Durante o planejamento dos pontos da rede de monitoramento que se encontram fora da área sob deformação, é importante ressaltar que estes pontos ainda não foram realmente medidos, portanto as linhas de base entre esses pontos ainda não foram determinadas. Dessa forma, é necessário estimar de forma preliminar

os valores dessas linhas de base e suas respectivas precisões antes da realização do ajustamento propriamente dito. A precisão de linha de base estimado pode ser calculado com base nas especificações do fabricante para o método de levantamento utilizado. Como cada receptor em uma linha de base adiciona um erro de centragem (“*setup error*”) (σ_s), o erro em qualquer linha de base observada pode ser estimado como (GHILANI, 2017):

$$\sigma_{\text{linhabase}} = \sqrt{2 * \sigma_s^2 + a^2 + (L * \text{ppm})^2} \quad (4.4.1)$$

Onde “a” é a parte constante de erro específica para uma linha de base observada, L é o comprimento da linha de base observada e ppm expressa o erro em partes por milhão. Por exemplo, a precisão especificada para determinação da linha de base utilizando procedimentos de levantamento pelo método de posicionamento relativo estático é normalmente $\pm (5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$, assim na fórmula 4.4.1 o valor de “a” é 5 mm e o valor de “ppm” é 1/1000000 (GHILANI, 2017).

O Subcomitê Federal de Controle Geodésico dos Estados Unidos (FGCS) desenvolveu um documento intitulado “Padrões e Especificações de Precisão Geométrica Geodésica para Uso de Técnicas de Posicionamento Relativo GPS”. Este subcomitê tem como objetivo determinar diretrizes para planejamento, execução e classificação de levantamentos geodésicos realizados por métodos de posicionamento relativo GNSS. Este documento pode ser consultado para determinar se os valores em ppm são aceitáveis para a ordem de precisão exigida para um determinado tipo de levantamento (HULL, 1989). Além dos requisitos de ppm, as diretrizes do FGCS especificam outros critérios que devem ser atendidos para determinações de precisão para observações com repetições de linha de base (GHILANI, 2017).

Para o cálculo e determinação da matriz variância-covariância (MVC), pode-se realizar um ajustamento utilizando o modelo paramétrico do método dos mínimos quadrados (MMQ). No contexto de pré-análise, o MMQ pode ser utilizado para estimar a precisão dos parâmetros ajustados utilizando uma parte do modelo matemático deste método. Assim, a solução clássica é dada por:

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (4.4.2)$$

Onde a matriz A pode ser interpretada como a geometria da rede. A estrutura da matriz A está relacionada ao modelo funcional das redes. Aqui encontramos duas definições, o modelo linear para redes GNSS e de nivelamento e os modelos não lineares para redes terrestres, definidas por observações de distâncias e ângulos. Para obter mais informações sobre o modelo funcional, pode-se consultar (GHILANI, 2017).

No caso da matriz P esta contém a qualidade das observações. Finalmente, o vetor L representa as observações. Segundo Gemael, 2015, o termo $A^T P A$ define a matriz de equações normais (N) e $A^T P L$ o vetor de termos independentes (u). Assim, a equação 4.4.3 torna-se:

$$X = (N)^{-1}u \quad (4.4.3)$$

Da equação 4.4.3 para o cálculo das equações da matriz normal, o vetor de observações (L) não é utilizado e a estrutura da matriz A e da matriz P pode ser estimada. Para estimar a precisão dos parâmetros do ajustamento, deve-se utilizar a matriz de cofatores Q_x . Os parâmetros envolvidos nesta matriz são apresentados a seguir:

$$Q_x = (N)^{-1} \quad (4.4.4)$$

Da equação 4.4.4 a diagonal da matriz de cofatores contém as variâncias dos parâmetros ajustados. Assim, pode-se estimar a precisão das coordenadas de diversas configurações da rede a partir da qualidade das observações. Aqui os critérios de ordem de projeto de redes geodésicas podem ser usados (SCHMITT, 2013, KUANG, 1995)

De acordo com Aydin (2014), a eq. 4.4.1 pode ser resolvida por uma abordagem de ajustamento livre, ou seja, sem pontos de controle. Para isso, pode-se utilizar a abordagem das restrições internas ou a abordagem das inversas generalizadas (RODRÍGUEZ, et al. 2020). Para o último caso, a equação 4.4.4 torna-se:

$$Q_x = (N)^+ \quad (4.4.5)$$

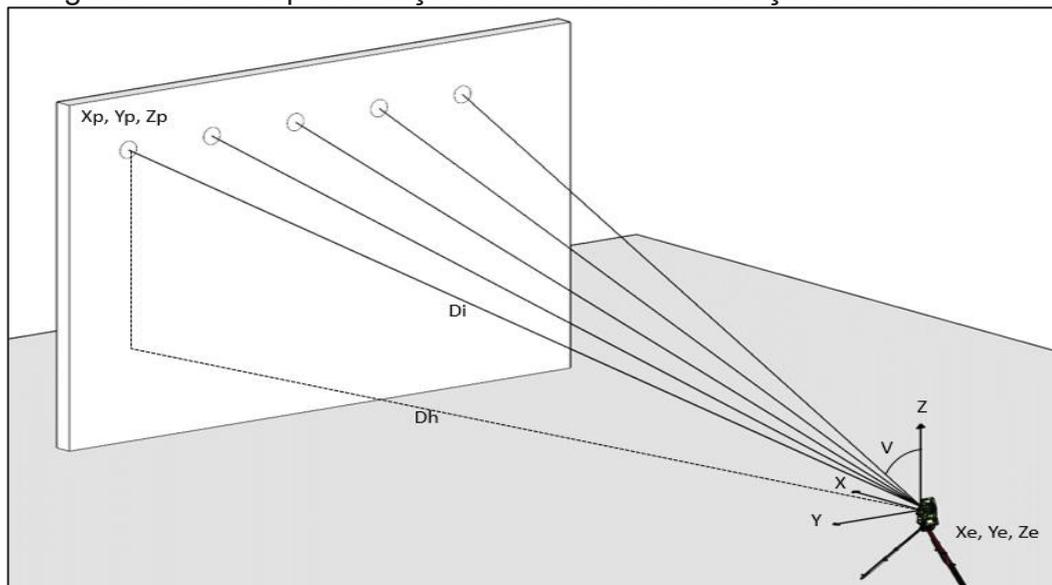
Onde $(N)^+$ corresponde ao inverso generalizado da matriz da equação normal.

Um aspecto importante surge para definir a qualidade das observações devido ao impacto que estas têm na precisão dos parâmetros através da sua propagação de erros (GEMAEL, 2015, GHILANI, 2018). Os modelos estocásticos estão relacionados com as relações das observações, nomeadamente, a covariância. Assim, temos observações independentes comuns nas redes sendo estas: direções, distâncias ou diferenças de nível (encontradas nas redes terrestres), e observações correlacionadas encontradas nas redes GNSS. Para obter mais informações sobre modelos estocásticos em redes geodésicas, consulte (OGUNDARE, 2019).

4.4.2 Determinação das precisões dos pontos-objeto

Para a determinação das precisões dos pontos-objetos, considerou-se que o método de levantamento utilizado foi o método de irradiação. Este método permite a determinação de coordenadas tridimensionais de um ponto, a partir da medição de direções horizontais, ângulos verticais e distâncias inclinadas entre a estação e o ponto a ser medido (SILVA e SEGANTINI, 2015). São consideradas as medidas tomadas entre: a) os pontos com as coordenadas a serem monitoradas, e b) o ponto correspondente à posição da estação ocupada com o instrumento de medida (SAMPAIO, 2019).

Figura 4.4.1 – Representação do método de irradiação tridimensional



Fonte: Sampaio (2019)

Considerando o sistema de coordenadas representado na Figura 4.4.1, tem-se que as coordenadas dos pontos monitorados são obtidas a partir das equações de posicionamento neste sistema, que são:

$$X_{Pi} = d_{EPi} \operatorname{sen}V_{EPi} \operatorname{sen}A_{EPi} + X_E \quad (4.4.6)$$

$$Y_{Pi} = d_{EPi} \operatorname{sen}V_{EPi} \operatorname{cos}A_{EPi} + Y_E \quad (4.4.7)$$

$$Z_{Pi} = h_i - h_s + d_{iEPi} \operatorname{cos}V_{EPi} + Z_E \quad (4.4.8)$$

onde:

X_{Pi}, Y_{Pi}, Z_{Pi} : coordenadas dos pontos a serem monitorados;

d_{EPi} : distância entre os pontos a serem monitorados e a estação total;

V_{EPi} : ângulo zenital entre a estação e os pontos a serem monitorados;

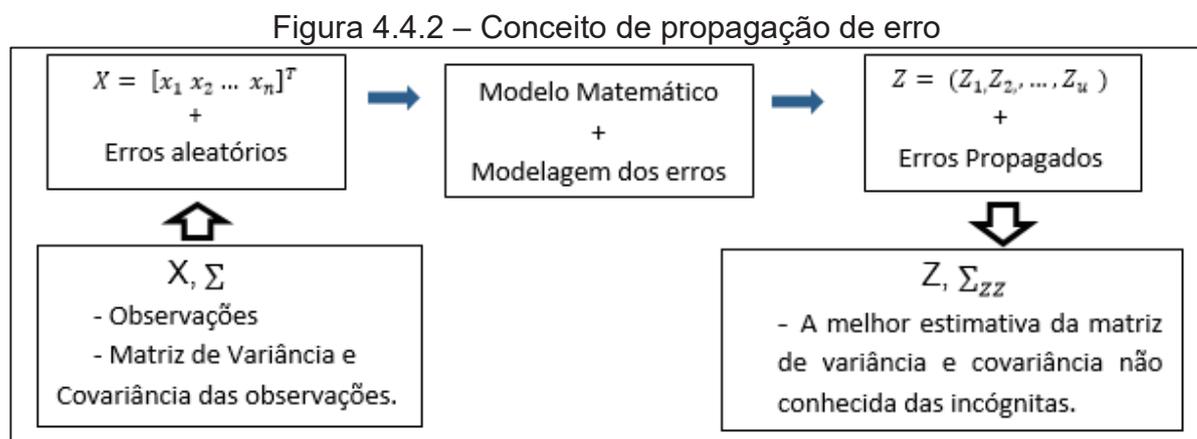
A_{EPi} : azimute calculado para a direção formada entre a estação total e os pontos a serem monitorados;

X_E, Y_E, Z_E : coordenadas do ponto ocupado pela estação total;

h_i : altura do instrumento;

h_s : altura do sinal

Uma vez definido o modelo matemático que será utilizado, realiza-se a propagação de erros que consiste no processo de avaliação dos erros nas quantidades estimadas (Z) como função dos erros nas medidas ou observações (X). A Figura 4.4.2 ilustra este conceito.



Fonte: EL-SHEIMY (2000) apud Sampaio (2019)

Na pré-análise normalmente são feitas estimativas de valores para as observações e suas respectivas variâncias (ou o próprio valor do desvio-padrão) são

obtidos a partir da escolha do instrumental a ser utilizado em campo, permitindo assim a montagem da matriz de variância e covariância das observações. É requerida/calculada a matriz de variância e covariância das incógnitas (Σ_{ZZ}). Para o cálculo de propagação de erros, assume-se que todos os erros sistemáticos são eliminados, então apenas os erros aleatórios são considerados nas observações diretas.

A equação 4.4.8 é conhecida como lei de propagação das covariâncias para equações lineares e não lineares (GHILANI, 2017): A equação 4.4.8 de é conhecida como lei de propagação das covariâncias para equações lineares e não lineares (GHILANI, 2017):

$$\Sigma_{ZZ} = A\Sigma A^T \quad (4.4.9)$$

onde Σ_{ZZ} é a matriz de covariância da função Z. O coeficiente matricial A é chamado de matriz Jacobiana, que é a matriz das derivadas parciais do modelo matemático em relação às observações.

A matriz A, para o modelo matemático aplicado no método de irradiação tridimensional, é determinada da seguinte forma:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial d} & \frac{\partial X}{\partial V} & \frac{\partial X}{\partial A} & \frac{\partial X}{\partial X_E} & \frac{\partial X}{\partial Y_E} & \frac{\partial X}{\partial Z_E} \\ \frac{\partial Y}{\partial d} & \frac{\partial Y}{\partial V} & \frac{\partial Y}{\partial A} & \frac{\partial Y}{\partial X_E} & \frac{\partial Y}{\partial Y_E} & \frac{\partial Y}{\partial Z_E} \\ \frac{\partial Z}{\partial d} & \frac{\partial Z}{\partial V} & \frac{\partial Z}{\partial A} & \frac{\partial Z}{\partial X_E} & \frac{\partial Z}{\partial Y_E} & \frac{\partial Z}{\partial Z_E} \end{bmatrix} \quad (4.4.10)$$

onde:

$\frac{\partial X}{\partial d}, \frac{\partial Y}{\partial d}, \frac{\partial Z}{\partial d}$: são as derivadas parciais do modelo matemático (das coordenadas

X, Y e Z dos pontos monitorados) em relação à distância;

$\frac{\partial X}{\partial V}, \frac{\partial Y}{\partial V}, \frac{\partial Z}{\partial V}$: são as derivadas parciais do modelo matemático (das coordenadas

X, Y e Z dos pontos monitorados) em relação ao ângulo zenital;

$\frac{\partial X}{\partial A}, \frac{\partial Y}{\partial A}, \frac{\partial Z}{\partial A}$: são as derivadas parciais do modelo matemático (das coordenadas

X, Y e Z dos pontos monitorados) em relação ao azimute;

$\frac{\partial X}{\partial X_E}, \frac{\partial Y}{\partial X_E}, \frac{\partial Z}{\partial X_E}$: são as derivadas parciais do modelo matemático (das coordenadas X, Y e Z dos pontos monitorados) em relação à coordenada X_E do ponto ocupado pela estação total;

$\frac{\partial X}{\partial Y_E}, \frac{\partial Y}{\partial Y_E}, \frac{\partial Z}{\partial Y_E}$: são as derivadas parciais do modelo matemático (das coordenadas X, Y e Z dos pontos monitorados) em relação à coordenada Y_E do ponto ocupado pela estação total;

$\frac{\partial X}{\partial Z_E}, \frac{\partial Y}{\partial Z_E}, \frac{\partial Z}{\partial Z_E}$: são as derivadas parciais do modelo matemático (das coordenadas X, Y e Z dos pontos monitorados) em relação à coordenada Z_E do ponto ocupado pela estação total.

A fórmula da propagação de covariância apresenta também a matriz de variância-covariância (MVC) das observações estimadas, que para o caso da aplicação em questão será:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma d^2 & 0 & 0 & & & \\ 0 & \sigma V^2 & 0 & & & \\ 0 & 0 & \sigma A^2 & & & \\ & & & \sigma X_E^2 & \sigma_{x_e y_e} & \sigma_{x_e z_e} \\ & & & \sigma_{y_e x_e} & \sigma Y_E^2 & \sigma_{y_e z_e} \\ & & & \sigma_{z_e x_e} & \sigma_{z_e y_e} & \sigma Z_E^2 \end{bmatrix} \quad (4.4.11)$$

onde:

σd : é a precisão das distâncias;

σV : é a precisão dos ângulos zenitais;

σA : é a precisão dos azimutes;

σX_E : é a precisão da coordenada X_E da posição da estação total;

σY_E : é a precisão da coordenada Y_E da posição da estação total;

σZ_E : é a precisão da coordenada Z_E da posição da estação total;

$\sigma_{x_e y_e}$: é a covariância calculada para as coordenadas X_E , Y_E e Z_E .

A MVC das observações é obtida da seguinte forma: Para calcular a precisão da distância medida será utilizada a equação (4.3.4) descrita em Ghilani (2017), que permite estimar o erro de uma distância medida com um MED (medidor de distância eletrônico):

A MVC das observações é obtida da seguinte forma: Para calcular a precisão da distância medida será utilizada a equação (4.3.4) descrita em Ghilani (2017), que permite estimar o erro de uma distância medida com um MED (medidor de distância eletrônico):

$$\sigma_D = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_t^2 + a^2 + (Db)^2} \quad (4.4.12)$$

onde:

σ_D : é o erro na distância medida;

σ_i : é o erro de centragem do instrumento;

σ_t : é o erro de centragem do refletor;

a : é a parte constante da precisão nominal do equipamento;

b : é a parte variável da precisão nominal do equipamento indicada em *ppm*;

D : é a distância medida;

Como se deseja calcular o erro propagado apenas em função do equipamento utilizado, considerou-se o erro de centragem do equipamento igual a zero. E como as medições são realizadas em refletores fixos à estrutura, o erro de centragem do refletor também foi considerado igual a zero.

Para o cálculo da precisão angular, os ângulos são obtidos a partir da leitura de pares conjugados, sendo que a diferença entre as duas direções observadas permite a obtenção do ângulo. A precisão deste ângulo será função da precisão nominal angular da estação total. Normalmente, para uma estação total, a precisão nominal angular é definida para um par de leituras conjugadas de uma direção. Assim, para uma estação total com precisão de $\pm 5''$, ao se efetuar a leitura da direção horizontal em um alvo em pontaria direta e depois em pontaria invertida, este valor indica que o desvio-padrão da média das duas direções será de $5''$ (GIAA, 2002). Para um ângulo (diferença entre a leitura de duas direções efetuadas em pontaria direta e invertida) a precisão será de $7''$ ($5''\sqrt{2}$). Os valores calculados para a precisão angular foram considerados na MVC para os valores de σ_V e de σ_A .

Após montar a matriz MVC com os valores de precisão das distâncias, dos ângulos zenitais, dos azimutes a segunda parte da MVC apresenta os valores de precisão das coordenadas X_E , Y_E , Z_E referentes a posição da estação total; e a covariância calculada para as coordenadas X_E , Y_E e Z_E . Esses valores são determinados conforme explicado no item 4.11. Finalmente, aplica-se a lei de

propagação das covariâncias e obtêm-se os valores de precisão $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$ de cada ponto a ser monitorado.

4.5 DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DO SISTEMA PROPOSTO

Nesta etapa iniciou-se o processo de programação e desenvolvimento do sistema proposto com o desenvolvimento do aplicativo denominado *PLANEJAMENTO*. Para isso, utilizou-se um software livre denominado *Android Studio*, com a linguagem de programação para *Android* denominada *Kotlin*. Esta linguagem e este sistema operacional foram escolhidos devido à facilidade de acesso aos dados através de uma plataforma de acesso aberto.

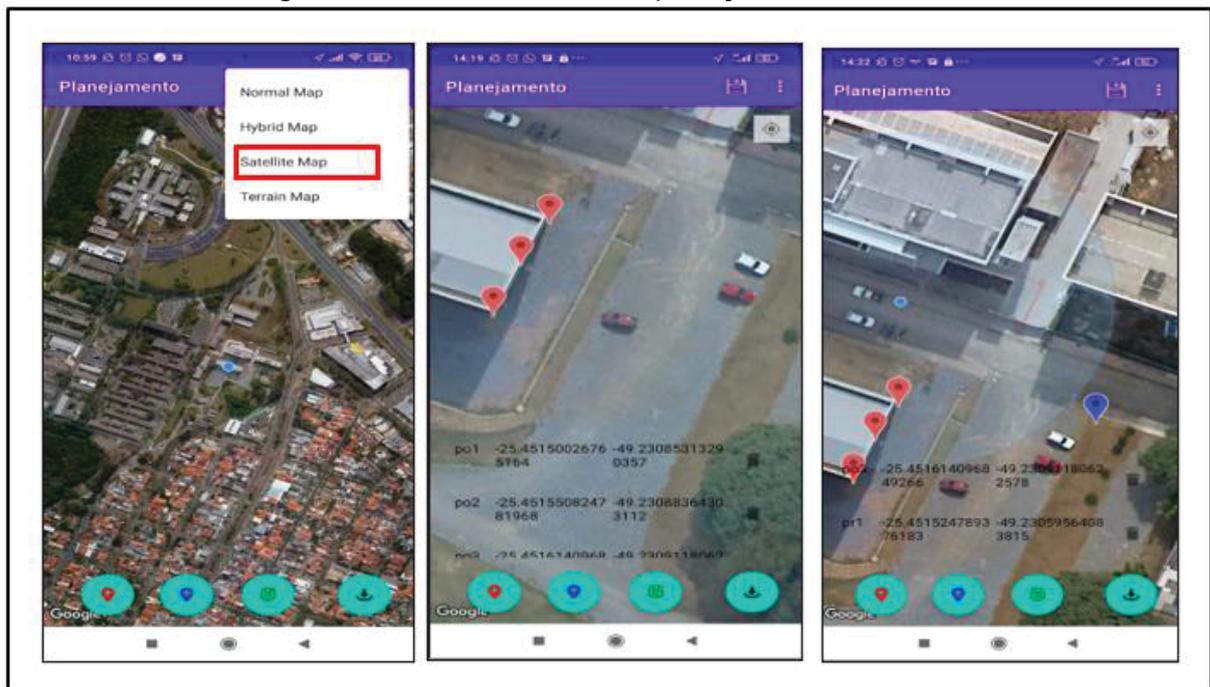
Nesta etapa iniciou-se o processo de programação e desenvolvimento do sistema proposto com o desenvolvimento do aplicativo denominado *PLANEJAMENTO*. Para isso, utilizou-se um software livre denominado *Android Studio*, com a linguagem de programação para *Android* denominada *Kotlin*. Esta linguagem e este sistema operacional foram escolhidos devido à facilidade de acesso aos dados através de uma plataforma de acesso aberto.

Esta aplicação permite o acesso a uma localização aproximada do usuário em campo e permite ao usuário inserir pontos de referência nas posições onde se pretende implementar a rede de monitoramento.

Na Figura 4.3.2 pode-se verificar a interface gráfica da aplicação. Nela é possível escolher qual tipo de mapa o usuário deseja visualizar na região de trabalho (as opções são: Mapa Normal; Mapa Híbrido; Mapa Satélite; Mapa de Terreno). Além disso, o aplicativo permite marcar a posição aproximada para os pontos de controle/referência e para os pontos objeto, possibilitando o planejamento da rede de monitoramento. Além disso, o aplicativo permite o download e compartilhamento dos dados referentes a esses pontos inseridos.

Pode-se verificar na Figura 4.5.1 alguns pontos que foram projetados utilizando o aplicativo em uma área teste no Campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná.

Figura 4.5.1 – Interface da aplicação desenvolvida



Fonte: Os autores (2023)

O sistema proposto deve apresentar as etapas definidas na Figura 4.3.2, e a realização dos cálculos das precisões dos pontos que compõe a rede de monitoramento deve seguir a modelagem matemática no item 4.4 (da definição do modelo matemático).

Inicialmente o processamento dos dados foi realizado no software *MATLAB*, pela facilidade de implementação de cálculos matriciais. Os cálculos realizados para o planejamento da rede de monitoramento apresentam como resultado a determinação da precisão das coordenadas de todos os pontos que fazem parte da rede.

O arquivo desenvolvido contendo o código do aplicativo *PLANEJAMENTO* pode ser acessado em: <https://github.com/liviafariasampaio/Planejamento.git>.

4.6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando as definições impostas pela superfície física onde serão realizados os trabalhos de monitoramento, é importante que seja realizada uma fase de planejamento in loco, permitindo assim a verificação da intervisibilidade entre os pontos da rede, e a possibilidade de instalação de um marco em um determinado local. Portanto, a partir do desenvolvimento da aplicação apresentada nesta pesquisa,

espera-se que o usuário do sistema proposto consiga planejar uma rede de monitoramento de forma mais ágil e prática. É essencial tratar a rede de monitoramento como sendo um conjunto de pontos de referência (pontos de controle fora da área sob deformação) mais um conjunto de pontos objeto (pontos dentro da área de deformação).

Com o tratamento da rede de monitoramento com base nas formulações matemáticas apresentadas, e a aquisição de dados *in loco*, dentro da área a ser monitorada, há uma otimização do trabalho de campo voltado ao monitoramento de estruturas. Como resultado do planejamento da rede, as precisões calculadas para cada ponto podem ser verificadas. Isto permite também que sejam feitas alterações necessárias na configuração desta rede, ou mesmo nos instrumentos de medição propostos para o projeto, para que se possa atender à precisão especificada para o trabalho em questão.

Como a ideia de automação é um processo contínuo, propõe-se como recomendações futuras que este sistema continue a ser desenvolvido para que as etapas de cálculo das precisões esperadas para os pontos da rede de monitoramento sejam realizadas dentro da própria aplicação de planejamento. Além disso, com o advento dos avanços tecnológicos em torno dos sensores acoplados aos smartphones, outra etapa que pode ser agregada é a obtenção de observações de distância e ângulo entre os pontos da rede de monitoramento por meio do próprio aplicativo de planejamento (SAMPAIO et al. 2023; SAMPAIO et al., 2022). Desta forma, o sistema torna-se cada vez mais iterativo e interativo tornando a etapa de pré-análise cada vez mais automatizada.

REFERÊNCIAS

ANDROID 2022, Visão geral dos sensores, viewed 02 July 2022, <https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_overview?hl=pt-br>.

AYDIN, Cüneyt. Geodetic Deformation Analysis. **Short Lecture Notes for Graduate Students, YTU-Geodesy Division**, 2014.

CASPARY, W. F. Concepts of network and deformation analysis, 3rd corrected impression. University of New South Wales, School of Geomatic Engineering, 2000.

CHRZANOWSKI, A. A comparison of different approaches into the analyses of deformation measurements. Proceedings of XVI International Congress of the Federation of Surveyors, Montreux, August 9-18, 1981.

CONTI, G.; RIBEIRO, S. R. A.; DIAS, A. H. Arquitetura de um sistema de informação geográfica mobile para coleta de dados geográficos baseados em conceitos de cloud computing e banco de dados NoSQL. In: **Congresso brasileiro de agro informática**, 10, 2015, Ponta Grossa. Anais... Ponta Grossa: SBIAgro, 2015.

COSTA, I. M.; LISBOA, S. N. D.; SANTOS, T. P. Automação industrial. Natal: UFRN, 2002.

DAPONTE, P. et al. State of the art and future developments of measurement applications on smartphones. *Measurement*, v. 46, n. 9, p. 3291-3307, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.05.006>, 2013.

DEPARTMENT OF THE ARMY. – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Manual 1110- 2 - 2002 Evaluation and Repair of Concrete Structures. Washington, DC, 2002.

EL-SHEIMY N., **Adjustment of Observations**. University of Calgary, 2000.

FAGGION, P. L.; NADAL, C. A.; VEIGA, L. A. K. Relatório Técnico 01-2012 Projeto PD6491-0227/2011 - Monitoramento Geodésico - Projeto e Implantação da rede de Auscultação Geodésica da UHE Mauá. Departamento de Geomática – Universidade Federal do Paraná, 2012.

GEMAEL, C. Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas. Curitiba: Ed. UFPR, 1994.

GEMAEL C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN R., **Introdução ao Ajustamento de Observações**. Curitiba: Ed. UFPR, 2015.

GHILANI, C. D. Adjustment computations: spatial data analysis. Ed. John Wiley & Sons, 2017.

GIAA, Geomatics Industry Association of America, 2002. DIN 18723 Specification for Theodolite Accuracy. Professional Surveyor Magazine. 2002.

GRAFAREND E. W. Optimization of Geodetic Networks, **Bolletino di Geodesia e Science Affini**, v. 33, n.4, p. 351-406, 1974.

HULL, W. V. Geometric geodetic accuracy standards and specifications for using GPS relative positioning techniques. National Geodetic Survey, NOAA, 1989.

HWANG, J. et al. Development of an RTK-GPS positioning application with an improved position error model for smartphones. **Sensors**, v. 12, n. 10, p. 12988-13001, 2012.

JERKE, A., RODRIGUEZ, F. A. C., DE MEDEIROS, L. Í. B., SAMPAIO, L. F., ALVES, S. D. S. O., VEIGA, L. A. K., & FAGGION, P. L. Desenvolvimento de aplicativo para o

controle e operação remota de estações totais. *Revista de Geociências do Nordeste*, 8(2), 102-113, 2022.

KHAMENEH, Mohammad Amin Alizadeh. *Optimal Design in Geodetic GNSS-based Networks*. KTH Royal Institut of Technology, 2017.

KLEIN, I. Proposta de um novo método para o planejamento de redes geodésicas. Tese de doutorado, Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

KUANG, S. L. *Geodetic Network Analysis and Optimal Design: concepts and application*, Ann Arbor Press, Michigan, USA, 1996.

NOAA, NATIONAL GEODETIC SURVEY (US). et al. *Geodetic glossary*. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Chartin, 1987.

OGUNDARE, J. O. (2019). *Understanding least squares estimation and geomatics data analysis*. Wiley

PERES, F. F. F. et al. Realidade aumentada para o acesso à instrumentação da barragem de Itaipu. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 30, 2015, Foz de Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: CBDB, 2015. p. 1-9.

RODRÍGUEZ, Felipe Andrés Carvajal et al. Free network adjustment: Minimum inner constraints and Pseudo-inverse approaches. *UD y la geomática*, n. 15, 2020.

SAMPAIO, L. F.; DALAZOANA, R.; VEIGA, L. A. K. Seleção de pontos-objeto visando o monitoramento de estruturas a partir da propagação de erros por simulação. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 71, n. 2, p. 570-597, 2019. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv71n2-47891>, 2019.

SAMPAIO, L. F.; Seleção de pontos-objeto visando o monitoramento de estruturas a partir da propagação de erros por simulação. Dissertação de mestrado, Curso de pós-graduação em ciências geodésicas, Universidade federal do Paraná, Curitiba, 2019.

SAMPAIO, Livia faria et al. Análise da viabilidade do uso de dados provenientes de sensores presentes em smartphones visando a mensuração de ângulos e distâncias. *Revista Brasileira de Cartografia*, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv74n4-65814>.

SAMPAIO, Livia Faria; VEIGA, Luís Augusto Koenig; ALVES, Samir de Souza Oliveira. Using Smartphones as a Measurement Platform in Geoscience Applications. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 46, Rio de Janeiro, 2023. DOI: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2023_46_56179

SANTOS, M. C. dos. *Estabilidade das Estruturas Geodésicas*. Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1999.

SCHMITT, G (2013). *Zero Order Design of Geodetic Networks*. Curitiba, Brazil.

SILVA, I.; SEGANTINI, PCL. **Topografia para Engenharia** -Teoria e Prática de Geomática. Rio de Janeiro, 2015.

VANÍCEK. P.; KRAKIWSKY, E. J. **Geodesy: The Concepts**, 2. Ed. Amsterdam: North Holland/Elsevier, 1986.

Capítulo 5

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa desenvolvida visou a elaboração de uma proposta para a automação da etapa de pré-análise para o monitoramento de estruturas, a partir de uma rede de monitoramento geodésico planejada in loco com a utilização de sensores presentes em *smartphones*. Importante ressaltar que a rede de monitoramento foi tratada nesta pesquisa como uma rede única composta tanto dos pontos situados na área sujeita à deformação, ou seja, os pontos-objeto, quanto dos pontos que se situam fora da área sujeita à deformação, ou seja, dos pontos de controle.

Para a utilização dos *smartphones* foi necessário realizar uma investigação da qualidade dos sensores presentes nestes dispositivos, com o objetivo de verificar a possibilidade de se realizar mensurações de distâncias e ângulos. Verificou-se que existem diferentes tipos de sensores presentes nesses dispositivos, e a forma e a qualidade do sensor presente interfere de maneira direta nos dados e nas observações adquiridas com esses aparelhos. Por exemplo, dependendo da marca ou do modelo do aparelho, alguns sensores estarão presentes e outros não, logo a qualidade e a forma de obtenção dos dados serão diferentes. Existem dispositivos com a presença de um maior número de sensores, e, assim, a forma de obtenção dos dados angulares será feita a partir da combinação de mais de um tipo de sensor, o que interfere de forma direta na qualidade dos dados levantados. Devido à essa heterogeneidade da forma de obtenção dos dados, nos capítulos 2 e 3 desta Tese pode-se verificar uma pesquisa que apresenta uma revisão bibliográfica com estudos relacionados à qualidade dos sensores presentes nos *smartphones*.

Nestas pesquisas, pode-se verificar que existe uma tendência na evolução dos dispositivos móveis de apresentar um sensor denominado de *Lidar* que facilitará e melhorará de forma significativa a obtenção dos valores de mensuração de distância. Em relação aos sensores ligados ao posicionamento angular, normalmente utiliza-se o giroscópio, o acelerômetro e o magnetômetro. Para esses sensores, são diversos os cuidados e as ressalvas que devem ser tomados quando se utiliza dados provenientes deles. O primeiro fator importante é considerar como funciona o sistema de eixos destes sensores, e se os dados obtidos destes ângulos de orientação são

provenientes de apenas um sensor ou de uma combinação destes sensores. Apesar dos *smartphones* variarem o tipo de modelo e de fabricante destes sensores, as considerações referentes ao sistema de eixos e obtenção dos valores angulares (*pitch*, *roll* e *yall*) são os mesmos.

Com o objetivo de verificar a qualidade destes sensores para obtenção de valores angulares, desenvolveu-se uma metodologia, na qual comparou-se valores angulares medidos com os sensores e os mesmos valores mensurados com equipamento de topografia considerados de alta precisão angular (uma estação total de precisão angular de 1"). Para isso, em cada um desses estudos desenvolveu-se um suporte para o celular de forma que ele permitisse a instalação da estação total na mesma posição em que o celular tinha sido instalado. Em ambas as pesquisas, as maiores discrepâncias encontradas foram em relação às medidas dos ângulos horizontais realizadas com o smartphone e a estação total.

Esse suporte foi projetado e confeccionado para instalação do smartphone no tripé, incluindo uma base nivelante que permitiu a instalação da estação total na mesma posição em que o celular foi instalado. Estimou-se o posicionamento dos sensores em relação ao smartphone, considerando que estes estariam em uma posição centralizada no celular. Os dados obtidos em relação às mensurações angulares foram levantados utilizando sensor de *software*, uma vez que o desenvolvimento do aplicativo para obtenção das medidas foi programado utilizando a plataforma MIT que fornece esses valores a partir de uma combinação dos sensores presentes no smartphone. Como pode-se verificar na pesquisa, os valores de discrepância angular para os ângulos horizontais apresentaram valores com um provável erro sistemático que precisa ser investigado.

Já na pesquisa apresentada no capítulo 3, o suporte foi projetado e confeccionado para ser acoplado na luneta da estação total, visando minimizar ainda mais as diferenças no posicionamento dos sensores presentes no smartphone. Os dados foram obtidos também utilizando sensor de *software*, porém a plataforma de programação utilizada foi o *Android Studio* e a linguagem de programação foi *kotlin*. A vantagem de programar dessa forma é a possibilidade de visualizar os dados brutos provenientes de cada sensor de forma separada. No estudo, as discrepâncias obtidas apresentaram um comportamento semelhante às discrepâncias encontradas na pesquisa realizada no capítulo 2.

Em ambos os estudos apresentados no capítulo 2 e 3 verificou-se que as maiores discrepâncias encontradas foram em relação à mensuração dos ângulos horizontais, e em ambos os casos, as maiores discrepâncias foram em relação aos ângulos em que a rotação do equipamento em relação ao eixo principal da estação foi maior. Como pode ser verificado nas análises da pesquisa apresentada no capítulo 2, supõe-se que, quanto maior a movimentação do sensor para obtenção de determinada medida, maior as discrepâncias apresentadas. Mesmo com um intervalo de tempo maior entre as medidas realizadas, não se conseguiu diminuir essa interferência e diferença nos valores avaliados.

Apesar de ambas as pesquisas terem tido o viés de apresentar uma metodologia para obtenção da qualidade dos ângulos medidos com sensores, a pesquisa apresentada no capítulo 2 buscou apresentar uma forma de obtenção também do posicionamento tridimensional a partir da utilização do smartphone. A pesquisa apresentada no capítulo 3, por sua vez, buscou apresentar um estado da arte das pesquisas realizadas no âmbito de investigação da qualidade de diferentes sensores presentes nos smartphones, juntamente com a aplicabilidade do uso desses sensores dentro das ciências geodésicas.

Como visto, existem sensores com qualidade em termos de precisão que, podem ser utilizados para diferentes finalidades dentro das ciências geodésicas. Entre estas aplicações está o planejamento da rede de monitoramento geodésico. No capítulo 4 desta pesquisa é apresentada uma proposta de automação do processo de planejamento das redes de monitoramento utilizando smartphones. Dentro dessa pesquisa é possível ressaltar a importância da realização da etapa de planejamento in loco, ou seja, na própria área de estudos. Dessa forma, é possível verificar quais as possíveis limitações impostas pela localização na área em torno da estrutura a ser monitorada. Por exemplo, limitações ligadas à visibilidade entre os pontos da rede, e instalação dos marcos que servirão de apoio ao levantamento.

A utilização dos smartphones possibilita a obtenção de dados provenientes dos sensores que auxiliam na simulação do levantamento a ser realizado. O uso de um mapa base, dentro do smartphone, e do sensor GNSS, permite ao usuário encontrar de forma ágil a localização aproximada do ponto a ser implantado. O uso dos sensores de orientação, como o magnetômetro, o acelerômetro e o giroscópio, permitem que as possíveis mensurações de ângulos horizontais e verticais sejam simuladas. Como apresentado na revisão bibliográfica dos capítulos 2 e 3, a crescente

utilização dos sensores e sua evolução, tendem a melhorar cada vez mais a qualidade dos dados gerados. Como será o caso da obtenção de distâncias com utilização do sensor *Lidar*.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para realização de trabalhos futuros, recomenda-se:

- Continuar as investigações em termos de qualidade dos dados provenientes dos diferentes sensores presentes nos smartphones;
- Implementar no aplicativo visando automação da etapa de planejamento, a utilização de dados de outros sensores, como o *Lidar*;
- Realizar a implementação dos cálculos necessários para a determinação das precisões relativas aos pontos da rede de monitoramento simulada;
- Implementar rotinas de programação para automação do processo de pré-análise considerando diferentes métodos de levantamento da rede de monitoramento geodésico.

Capítulo 6

REFERÊNCIAS

BESHR, Ashraf Abd El-Wanis et al. Structural deformation monitoring and analysis of highway bridge using accurate geodetic techniques. **Engineering**, v. 7, n. 08, p. 488, 2015.

CAPRA, Alessandro et al. Recent approaches in geodesy and geomatics for structures monitoring. *Rendiconti Lincei*, v. 26, n. 1, p. 53-61, 2015.

DALAZOANA, R. Introdução à Pré-análise. In: Camil Gemael; Álvaro Muriel Lima Machado; Romualdo Wandresen. (Org.). **Introdução ao ajustamento de observações - aplicações geodésicas**. 2ed. Curitiba: Editora UFPR, p. 345-365, 2015.

GUZZATO, M. P., **Planejamento de redes horizontais por simulação numérica**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

KLEIN, I. **Proposta de um novo método para o planejamento de redes geodésicas**. Tese de doutorado, Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

OGUNDARE, J. O. **Precision Surveying: The Principles and Geomatics Practice**. John Wiley & Sons, 2015.

SAMPAIO, L. F.; DALAZOANA, R.; VEIGA, L. A. K. Seleção de pontos-objeto visando o monitoramento de estruturas a partir da propagação de erros por simulação. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 2, p. 570-597, 2019.

SAMPAIO, L. F.; **Seleção de pontos-objeto visando o monitoramento de estruturas a partir da propagação de erros por simulação**. Dissertação de mestrado, Curso de pós-graduação em ciências geodésicas, Universidade federal do Paraná, Curitiba, 2019.

SAMPAIO, Livia faria et al. **Análise da viabilidade do uso de dados provenientes de sensores presentes em smartphones visando a mensuração de ângulos e distâncias**. *Revista Brasileira de Cartografia*, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv74n4-65814>.

SAMPAIO, Livia Faria; VEIGA, Luís Augusto Koenig; ALVES, Samir de Souza Oliveira. **Using Smartphones as a Measurement Platform in Geoscience Applications**. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 46, Rio de Janeiro, 2023. DOI: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2023_46_56179

SANTOS, M. C. dos. **Estabilidade das Estruturas Geodésicas**. Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1999.

YUWONO, B. D.; PRASETYO, Y. Analysis Deformation Monitoring Techniques Using GNSS Survey and Terrestrial Survey (Case Studi: Diponegoro University Dam, Semarang, Indonesia). In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2019. p. 012045.