

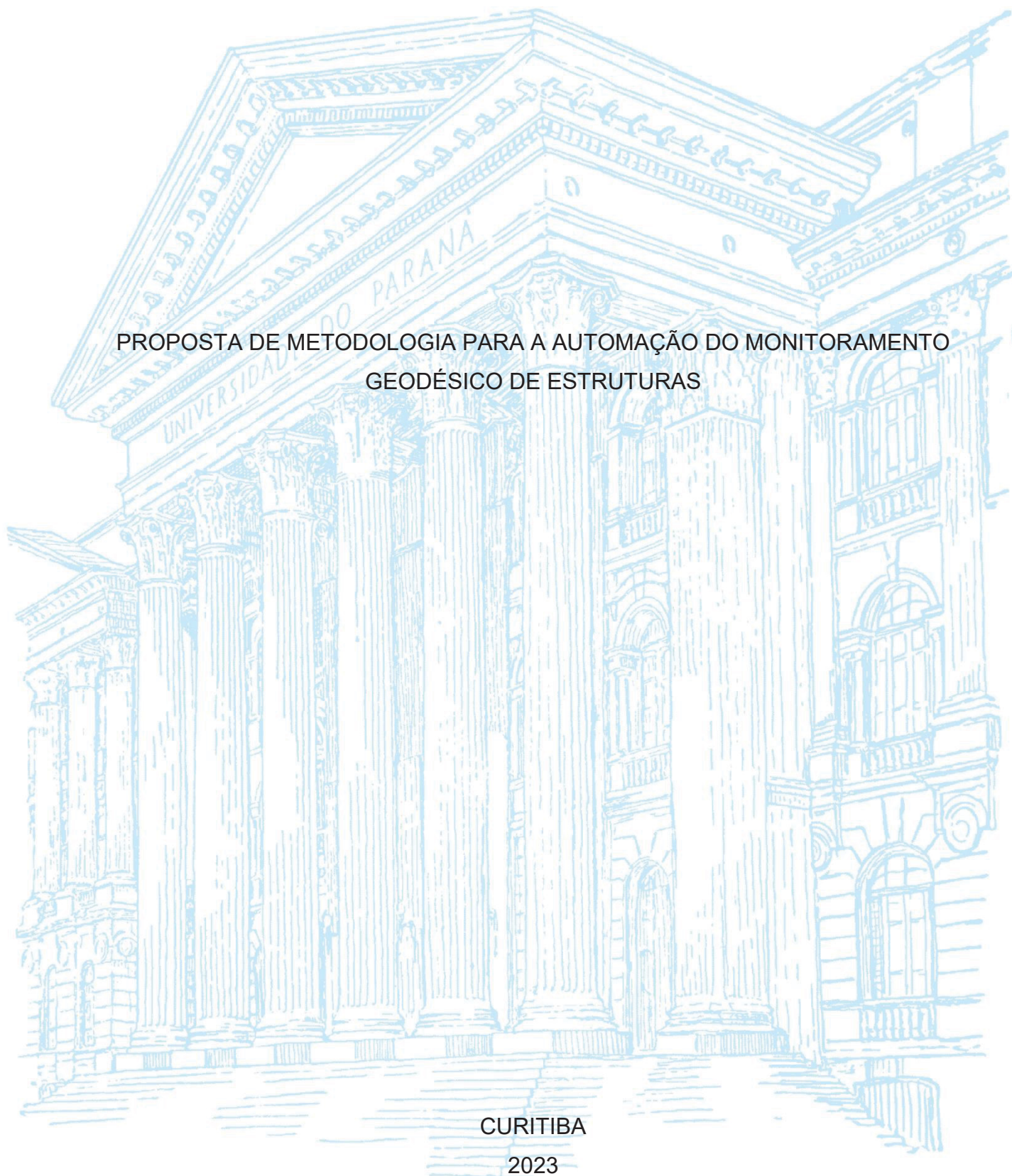
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDREAS JERKE

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA A AUTOMAÇÃO DO MONITORAMENTO
GEODÉSICO DE ESTRUTURAS

CURITIBA

2023



ANDREAS JERKE

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA A AUTOMAÇÃO DO MONITORAMENTO
GEODÉSICO DE ESTRUTURAS

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.

Orientadores: Prof. Dr. Pedro Luis Faggion
Prof. Dr. Wander da Cruz

CURITIBA

2023

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

Jerke, Andreas

Proposta de metodologia para a automação do monitoramento geodésico de estruturas / Andreas Jerke. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

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

Orientador: Pedro Luis Faggion

Coorientador: Wander da Cruz

1. Geodésia – Observações. 2. Observações geodésicas. 3. Geodésia – Processamento de dados. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. III. Faggion, Pedro Luis. IV. Cruz, Wander da. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

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 **ANDREAS JERKE** intitulada: **PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA A AUTOMAÇÃO DO MONITORAMENTO GEODÉSICO DE ESTRUTURAS**, sob orientação do Prof. Dr. PEDRO LUIS FAGGION, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor 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, 31 de Janeiro de 2023.

Assinatura Eletrônica

01/02/2023 14:37:28.0

PEDRO LUIS FAGGION

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

02/02/2023 10:31:45.0

ALESSANDRA SVONKA PALMEIRO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO)

Assinatura Eletrônica

01/02/2023 09:41:29.0

LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

01/02/2023 23:41:47.0

LUIZ GUIMARÃES BARBOSA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO)

Assinatura Eletrônica

01/02/2023 13:25:57.0

ALEX SORIA MEDINA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a Deus pela eterna companhia, saúde e força para trilhar os caminhos da vida e por ter me abençoado a chegar até aqui. A Ele seja dada toda honra, toda glória e todo louvor por esse trabalho.

Gostaria também de agradecer a minha família, pelo carinho, apoio, dedicação e incentivo, lembrando principalmente da minha esposa Raquel e dos meus filhos Calebe e Talita.

Ao Prof. Dr. Pedro L. Faggion agradeço por sua paciência, amizade, apoio e incentivo demonstrado ao longo deste trabalho. Mas quero agradecer principalmente pela orientação, conselhos e contribuições prestadas durante todo o decorrer do desenvolvimento deste projeto, onde é detentor de grande porcentagem do sucesso deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Wander da Cruz pela sua amizade, ensinamentos e conselhos transmitidos nestes anos e a Família da Cruz, seus pais senhor Geraldo e senhora Selmira e seus avós senhor Casimiro e senhora Lenir, pelo acolhimento e acomodação em sua casa em Telêmaco Borba onde sempre fui bem recebido.

A Universidade Federal do Paraná, através do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG), por disponibilizar o Laboratório de Geodésia aplicada a Engenharia para a elaboração desta tese, bem como todos os equipamentos e instalações constantes nestes locais.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento à pesquisa desenvolvida e pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos.

Aos meus colegas de laboratório pelo apoio prestado nos momentos difíceis e pela amizade.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os professores e alunos do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, que direta e indiretamente contribuíram para a realização desta tese.

RESUMO

Este trabalho buscou propor uma metodologia para o monitoramento geodésico das estruturas a partir do desenvolvimento de um *software* livre. Para tal, primeiramente foi analisado os fatores que influenciam no monitoramento geodésico de estruturas onde constatou-se que os resultados obtidos com uma das campanhas de levantamento com o vertedor aberto apresentaram valores incompatíveis com as forças exercidas na barragem. Paralelamente, verificou-se que dependendo do marco utilizado para a obtenção das coordenadas à montante, os resultados são significativamente diferentes. Este fato indicou a possibilidade de que a refração atmosférica, causada pelo reservatório de água, influencie no valor das coordenadas dos pontos de monitoramento à montante. Para minimização destes fatores foi desenvolvido um dispositivo que coleta e envia os parâmetros ambientais (temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa do ar) ao sistema em tempo real para realização das devidas correções em tempo real. Com os fatores analisados, explorou-se o entendimento dos princípios de comunicação, transmissão de dados e funcionamento dos equipamentos através do desenvolvimento de um aplicativo de celular que foi capaz de estabelecer a comunicação com o instrumento de medição, comandar a movimentação do instrumento e executar as principais funções da estação total para o levantamento do monitoramento geodésico. Com a verificação da potencialidade de controlar remotamente a estação total robotizada, foi desenvolvido um sistema para computador que permite a automação da coleta e do processamento dos dados oriundos do levantamento por irradiação no monitoramento geodésico de estruturas. Este sistema é capaz de: controlar e operar estações totais robotizadas; medir direções, ângulos zenitais e distâncias inclinadas dos pontos pré-determinados; incluir automaticamente as correções atmosféricas do ambiente no valor da distância inclinada; processar em tempo real os dados coletados; determinar as coordenadas tridimensionais dos pontos; e comparar com as coordenadas de campanhas anteriores. Por fim constatou-se a validação deste sistema com testes estatísticos através da comparação dos resultados com outro *software* comercial já consolidado no mercado de trabalho.

Palavras-chave: Monitoramento geodésico. Automação de levantamentos. *Software* livre.

ABSTRACT

This work sought to propose a methodology for the geodetic monitoring of structures based on the development of free software. To this end, the factors that influence the geodetic monitoring of structures were first analyzed, where it was found that the results obtained with one of the survey campaigns with the open spillway showed values incompatible with the forces exerted on the dam. At the same time, it was found that depending on the frame used to obtain the upstream coordinates, the results are significantly different. This fact indicated the possibility that atmospheric refraction, caused by the water reservoir, influences the value of the coordinates of the upstream monitoring points. To minimize these factors, a device was developed that collects and sends the environmental parameters (temperature, atmospheric pressure and relative humidity) to the system in real time to carry out the necessary corrections in real time. With the factors analyzed, an understanding of the principles of communication, data transmission and equipment operation was explored through the development of a cell phone application that was able to establish communication with the measuring instrument, command the movement of the instrument and execute the main functions of the total station for surveying geodetic monitoring. With the verification of the potential to remotely control the robotic total station, a computer system was developed that allows the automation of the collection and processing of data from the survey by irradiation in the geodetic monitoring of structures. This system is capable of: controlling and operating robotic total stations; measure directions, zenith angles and inclined distances of predetermined points; automatically include ambient atmospheric corrections in the sloped distance value; process the collected data in real time; determine the three-dimensional coordinates of the points; and compare with the coordinates of previous campaigns. Finally, this system was validated with statistical tests by comparing the results with other commercial software already established in the job market.

Keywords: Geodetic monitoring; Survey automation; Free software.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.2.1 – Localização da UHE Mauá no estado do Paraná.....	23
Figura 2.2.2 – Rede Geodésica de Referência da UHE Mauá.....	24
Figura 2.2.3 – Geometria de processamento GNSS do PG03.....	25
Figura 2.2.4 – Geometria de processamento dos demais marcos.....	25
Figura 2.2.5 – Transformação de coordenadas para o SB.....	26
Figura 2.2.6 – Localização dos prismas no corpo da barragem.....	28
Figura 2.2.7 – Indicação das linhas de visada.....	28
Figura 2.2.8 – Ponto de monitoramento à montante.....	29
Figura 3.2.1 – Componentes de um sistema de comunicação.....	42
Figura 3.2.2 – Sistema de comunicação entre estação total e smartphone.....	44
Figura 3.2.3 – Estrutura de comunicação GeoCOM.....	46
Figura 3.2.4 – Etapas de desenvolvimento do aplicativo.....	48
Figura 3.2.5 – Esboço do funcionamento lógico do aplicativo.....	49
Figura 3.3.1 – Telas do TS15 Operator.....	51
Figura 3.3.2 – Blocos de comando do joystick.....	52
Figura 4.2.1 – Modelo de entidade.....	63
Figura 4.2.2 – Modelo de tomada de decisão.....	63
Figura 4.2.3 – Modelo de fluxo de dados.....	63
Figura 4.2.4 – Diagrama dividido em etapas.....	64
Figura 4.2.5 – Diagrama da coleta de dados.....	64
Figura 4.2.6 – Diagrama do processamento de dados.....	65
Figura 4.2.7 – Interface gráfica – Aba Início.....	66
Figura 4.2.8 – Interface gráfica – Aba Comunicação.....	68
Figura 4.2.9 – Exemplo de código do protocolo GeoCOM.....	69
Figura 4.2.10 – Interface gráfica – Aba Controle.....	69
Figura 4.2.11 – Interface gráfica – Aba Monitoramento.....	70
Figura 4.2.12 – Sensor BMP280.....	72
Figura 4.2.13 – Conexões do Sensor BMP280 no Arduino Uno.....	73
Figura 4.2.14 – Dispositivo de medição de temperatura e pressão desenvolvido.....	73
Figura 4.2.15 – Disposição dos sensores durante a calibração.....	74
Figura 4.2.16 – Disposição dos sensores durante a calibração externa.....	75
Figura 4.2.17 – Interface gráfica – Aba Sensor de Temperatura.....	76

Figura 4.2.18 – Interface gráfica – Aba Processamento.	77
Figura 4.2.19 – Distribuição dos pontos de monitoramento no laboratório GEENG..	80
Figura 4.2.20 – Rede Geodésica da UHE Mauá.	80
Figura 4.2.21 – Pontos de monitoramento da UHE Mauá levantados.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2.1 – Características das campanhas de monitoramento.....	27
Tabela 2.3.1 – Coordenadas da Rede Geodésica na primeira campanha.....	30
Tabela 2.3.2 – Coordenadas da Rede Geodésica na segunda campanha	30
Tabela 2.3.3 – Diferença de coordenadas da Rede Geodésica entre a primeira e a segunda campanha.....	30
Tabela 2.3.4 – Diferença média de coordenadas dos 62 pontos de monitoramento entre a primeira e a segunda campanha.....	31
Tabela 2.3.5 – Diferença média de coordenadas dos 62 pontos de monitoramento entre a segunda e a terceira campanha.....	31
Tabela 2.3.6 – Diferença média de coordenadas dos 62 pontos de monitoramento entre a primeira e a terceira campanha	32
Tabela 2.3.7 – Diferença de coordenadas dos pilares de montante entre PG01 e PG02.....	33
Tabela 2.3.8 – Diferença de coordenadas do pilar de montante PG01 em relação aos marcos CG01 e CG02.....	34
Tabela 2.3.9 – Diferença de coordenadas do pilar de montante PG02 em relação aos marcos CG01 e CG02.....	34
Tabela 3.2.1 – Exemplo de sintaxes de algumas funções	47
Tabela 4.3.1 – Coordenadas da primeira campanha do GEENG.....	82
Tabela 4.3.2 – Coordenadas da segunda campanha do GEENG.....	82
Tabela 4.3.3 – Diferença de coordenadas entre a primeira e a segunda campanha	82
Tabela 4.3.4 – Coordenadas da terceira campanha do GEENG.....	83
Tabela 4.3.5 – Diferença de coordenadas entre a primeira e a terceira campanha. .	83
Tabela 4.3.6 – Coordenadas obtidas pelo MGEO.....	84
Tabela 4.3.7 – Coordenadas obtidas pelo GeoMos	84
Tabela 4.3.8 – Diferença de coordenadas entre os <i>softwares</i>	85
Tabela 4.3.9 – Valores de t de Student dos pontos levantados pelos <i>softwares</i>	86

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	HIPÓTESE	14
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivos específicos.....	15
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
	REFERÊNCIAS	18
2	FATORES QUE INFLUENCIAM NO MONITORAMENTO GEODÉSICO DE BARRAGENS UTILIZANDO ESTAÇÃO TOTAL.....	20
2.1	INTRODUÇÃO.....	20
2.2	METODOLOGIA.....	23
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
	REFERÊNCIAS	37
3	DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO PARA O CONTROLE E OPERAÇÃO REMOTA DE ESTAÇÕES TOTAIS.....	38
3.1	INTRODUÇÃO.....	38
3.2	METODOLOGIA.....	42
3.2.1	Processo de Comunicação	42
3.2.2	Protocolo de Comunicação.....	45
3.2.2.1	Protocolo GeoCOM	45
3.2.3	Desenvolvimento do aplicativo	48
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
3.3.1	Resultados.....	51
3.3.2	Discussão	52
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
	REFERÊNCIAS	56
4	PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA AUTOMAÇÃO DO MONITORAMENTO GEODÉSICO DE ESTRUTURAS POR MEIO DE SOFTWARE LIVRE.....	59
4.1	INTRODUÇÃO.....	59
4.2	METODOLOGIA.....	63

4.2.1	Implementação do sistema MGEO	66
4.2.1.1	Comunicação	67
4.2.1.2	Controle	68
4.2.1.3	Monitoramento	70
4.2.1.4	Sensor de temperatura e pressão	72
4.2.1.5	Comunicação do sensor de temperatura e pressão	76
4.2.1.6	Processamento	77
4.2.2	Levantamentos realizados	79
4.2.2.1	GEENG	79
4.2.2.2	UHE Mauá	80
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
4.3.1	Resultados no GEENG	81
4.3.2	Resultados na UHE Mauá	84
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
	REFERÊNCIAS	88
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
	REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de engenharia de grande porte, como tanques, pontes e barragens desempenham papel importante na sociedade, porém falhas e colapsos nas mesmas podem ser responsáveis por impactos significativos nos âmbitos sociais, econômicos e ambientais.

Estrutura é a parte da edificação responsável por manter a forma e sustentação da mesma, devendo ser capaz de suportar e resistir a todos os esforços produzidos nela, tanto pelo peso próprio quanto por fatores externos como água, ventos e sobrecargas. Um fator importante é a segurança, uma vez que problemas mal conduzidos ou mesmo ignorados podem levar à ruína da estrutura, colocando em risco vidas humanas (Mello, 2013).

Para garantir as necessárias condições de segurança das estruturas ao longo da sua vida útil, devem ser adotadas medidas de prevenção e controle. Essas asseguram uma probabilidade de ocorrência de acidente reduzida ou praticamente nula. Porém, devem ser periodicamente monitoradas levando-se em consideração eventuais alterações resultantes do envelhecimento e deterioração das estruturas (ANA, 2015). Dentro deste contexto, uma das medidas de prevenção e controle envolve o monitoramento contínuo das mesmas. Este monitoramento pode ser apenas visual ou empregando-se técnicas físicas e geodésicas. Neste último caso, busca-se determinar variações da geometria destas estruturas.

De acordo com Lovas et al. (2008), a Geodésia viabiliza a detecção de deslocamentos e deformações por meio de métodos de levantamentos, nos quais empregam-se equipamentos como estações totais, níveis e receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

Monitorar uma estrutura do ponto de vista do posicionamento geodésico significa determinar e comparar as coordenadas de pontos estratégicos em épocas distintas, verificando se houve, ou não, variações significativas nestas coordenadas (Silveira, 2003). O monitoramento geodésico de grandes barragens e seus arredores sempre foi reconhecido como uma ferramenta importante no fornecimento de informações sobre a estabilidade e integridade das mesmas.

Segundo o U.S. Army Corps of Engineers (2018), os levantamentos geodésicos terrestres exigem trabalho intensivo e requerem observações ágeis. Com o desenvolvimento tecnológico é possível utilizar alguns modelos de

equipamento digitais que melhoram a precisão das observações e minimizam a influência do observador, tornando este tipo de levantamento mais ágil, pois melhora o rendimento em campo e facilita a operação do instrumental utilizado.

Com a evolução do instrumental utilizado em levantamentos geodésicos, especialmente no que diz respeito a robotização de estações totais, a automatização no monitoramento geodésico em estruturas de grande porte é realizada com a comunicação e controle destes instrumentos de medição por meio do desenvolvimento de *softwares* que permitem o envio e o recebimento de dados, em uma comunicação entre a estação total robotizada e computador (Nadal, 2008).

U.S. Army Corps of Engineers (2018) considera os *hardwares* do instrumento e o *software* de processamento como fatores que interferem diretamente na acurácia dos dados. De acordo com Rusu et al. (2008), erros podem resultar em distorções nas informações extraídas dos dados ou em etapas do processamento, como as falhas no registro dos pontos.

Estes fatores fomentam a necessidade de contínuas investigações e o desenvolvimento de abordagens que proporcionem o aumento da confiabilidade dos dados adquiridos, minimizando-se os erros. Conforme Lindenbergh e Pietrzyk (2015), os desafios do monitoramento de estruturas estão vinculados às grandezas relativas ao deslocamento que se deseja investigar com a devida precisão requerida.

Atualmente, os *softwares* utilizados para o monitoramento geodésico de estruturas estão mais presentes no meio comercial e são de código fechado, ou seja, o usuário não tem acesso ao código-fonte, somente os criadores do mesmo. Isso é feito principalmente com o objetivo de manter a exclusividade da empresa sobre a tecnologia utilizada.

Uma das desvantagens dos *softwares* de código fechado é o custo e a indisponibilidade do código-fonte. Já nos *softwares* livres, o código-fonte pode ser visualizado pelos usuários, que podem consultá-lo para: sugerir novas funcionalidades; sugerir customizações; estudar como funciona, etc.

Apesar do progresso em termos de sensores e dispositivos de *hardware* para controle remoto, uma plataforma de *software* livre para monitoramento geodésico ainda não está difundida na comunidade acadêmica. Por essa razão, esforços estão sendo feitos para desenvolver uma solução universal gratuita de monitoramento com independência de plataforma, funções seguras de controle

remoto usando interfaces padronizadas para troca de dados e compatibilidade com ambientes de computação em nuvem (Engel & Schweimler, 2016).

No âmbito acadêmico, o número de trabalhos relacionados a automação do monitoramento de estruturas vem aumentando nos últimos anos. Neste contexto, a equipe de pesquisadores vinculados ao grupo de Geodésia aplicada a Engenharia (GEENG), do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (PPGCG), da Universidade Federal do Paraná (UFPR), desenvolve atividades de pesquisa no monitoramento de estruturas, com destaque para barragens, há um longo período.

Veiga (2000) desenvolveu um programa protótipo para ilustrar e aplicar o sistema para mapeamento automatizado em campo, onde os dados do levantamento são processados em campo, durante a coleta de dados, fazendo com que o desenho final fosse sendo gerado automaticamente a partir destes dados.

Nadal (2008) desenvolveu um sistema computacional que permitiu o controle e a operação remota de estações totais robotizadas, realizando então a automatização da coleta de dados do monitoramento geodésico de estruturas.

Da Cruz (2015) elaborou um *software* que integra as observações derivadas do monitoramento geodésico, efetivando a análise e a representação de deslocamentos, utilizando vetores e elipses de erro. Contribuindo para a automatização do processamento dos dados.

No ano de 2019, o autor analisa o monitoramento geodésico de estrutura com diferentes *softwares* de processamento, onde o processamento dos dados foi realizado com dois *softwares*. Um comercial de monitoramento em tempo real (com código fechado) e o outro pós-processado desenvolvido por Da Cruz (2015). Nesta pesquisa concluiu-se que não houve diferenças significativas nos resultados dos *softwares*.

Carvajal (2019) realizou a automação da correção da primeira velocidade em Medida Eletrônica de Distância (MED) com base em rede de observação de parâmetros ambientais de multi-estações. Esta pesquisa automatizou a correção dos dados ambientais na medição de distâncias realizadas com MED.

Conforme o contexto apresentado, considerando a necessidade de um *software* que visa entender e reagir rapidamente às demandas dos projetos atuais do monitoramento geodésico de estruturas, este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia para o monitoramento geodésico das estruturas a partir do desenvolvimento de um *software* livre. Para tal, primeiramente foi analisado os

fatores que influenciam no monitoramento geodésico de estruturas e em seguida foi desenvolvido um protótipo de aplicativo de celular para verificar a potencialidade da integração Bluetooth entre dispositivo/estação total na transmissão de dados para o controle e operação remota de estações totais robotizadas. A partir disso, esta pesquisa buscou o desenvolvimento de um *software* livre que permite a automação da coleta e do processamento dos dados do monitoramento geodésico de estruturas, realizando os seguintes procedimentos:

- a) controle e operação de estações totais robotizadas;
- b) medição dos pontos pré-determinados com a inclusão automática das correções atmosféricas;
- c) processamento em tempo real dos dados coletados com a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos;
- d) verificação das diferenças das coordenadas com campanhas anteriores por meio de valores e por meio de gráficos.

1.1 HIPÓTESE

Se a verificação prévia dos fatores que influenciam no monitoramento geodésico e a automação do controle e operação remota de uma estação total robotizada utilizando um aplicativo permitem a obtenção de informações precisas para o monitoramento geodésico de estruturas, então sugere-se uma proposta de metodologia para a automação nos levantamentos por irradiação por meio do desenvolvimento de um sistema de monitoramento de acesso livre.

1.2 OBJETIVOS

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

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um *software* livre que permite a automação da coleta e do processamento dos dados dos levantamentos realizados por irradiação no monitoramento geodésico de estruturas.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral foi estabelecido os seguintes objetivos específicos:

- a) analisar os fatores que influenciam no monitoramento geodésico de estruturas;
- b) desenvolver um aplicativo para verificar as potencialidades da interação entre dispositivo e estação total durante a automação da coleta de dados;
- c) desenvolver um dispositivo que envie em tempo real os dados ambientais de temperatura e pressão atmosférica para as correções de distâncias;
- d) automatizar a medição de pontos pré-determinados com a inclusão automática das correções atmosféricas;
- e) automatizar o processamento dos dados coletados com a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos e verificar as diferenças com as coordenadas de campanhas anteriores.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta tese foi estruturada em cinco capítulos, os quais contemplam a pesquisa por meio do desenvolvimento de três artigos que permeiam a proposta indicada.

Preliminarmente, no capítulo 1 é apresentado a introdução do trabalho que contempla a hipótese e os objetivos da pesquisa.

Considerando os fatores envolvidos no monitoramento geodésico de barragens que podem de alguma maneira afetar nos resultados encontrados, no capítulo 2 foi apresentado o artigo publicado: Fatores que influenciam no monitoramento geodésico de barragens utilizando estação total, na Revista de Geociências do Nordeste (REGNE) em 2022 (Jerke et al., 2022). Neste artigo, analisou-se a influência de agentes externos durante o monitoramento geodésico de estruturas, estudo de caso na barragem da Usina Hidrelétrica (UHE) de Mauá-PR. A partir dele, verificou-se que pelo fato da barragem estar com o vertedor aberto, este fenômeno afetou a precisão das coordenadas no corpo da barragem à jusante apresentando valores diferentes das coordenadas com o vertedor aberto ou

fechado, mesmo com a inclusão das correções atmosféricas no cálculo das distâncias. Adicionalmente, realizou-se o monitoramento de pontos engastados na crista da barragem à montante onde observou-se que dependendo do ponto da rede geodésica utilizado para a determinação das coordenadas dos pontos na crista da barragem, margem direita, esquerda ou sobre a barragem, os resultados das coordenadas levantadas são diferentes em cada marco utilizado para realizar a medição, chegando na ordem do decímetro na coordenada Z.

O Capítulo 3 corresponde ao 2º artigo, denominado Desenvolvimento de aplicativo para o controle e operação remota de estação total, também publicado pela Revista de Geociências do Nordeste (REGNE) em 2022 (Jerke et al., 2022). Com base nos fatos levantados, através do 1º artigo, pode-se inferir que a influência do operador também é um dos fatores que pode afetar o levantamento do monitoramento geodésico de estruturas. Assim, desenvolveu-se um aplicativo de celular com a estratégia de reduzir o contato direto entre o operador e o instrumento. Com isso, pode-se automatizar o levantamento com a obtenção de dados através de funções pré-programadas como: medição de distância, medições angulares, busca automática do prisma, etc. Uma das etapas cruciais no controle e operação remota de uma estação total robotizada, presente no 2º artigo, consistiu na potencialidade demonstrada na integração Bluetooth-Dispositivo-Estação na qual foi realizada pela plataforma Web gratuita *MIT App Inventor*. Como resultado foi desenvolvido um aplicativo de celular capaz de operar a estação total robotizada utilizada neste artigo, permitindo o controle da operação de forma remota através da conexão via Bluetooth para o envio de comandos e recebimento de dados.

Considerando a automatização do controle e operação de estações totais robotizadas com o envio de comandos e recebimento de dados, no Capítulo 4 foi apresentado o 3º artigo, intitulado: Proposta de metodologia para a automação do Monitoramento Geodésico de Estruturas. Com base nas potencialidades encontradas na comunicação entre dispositivo e estação total robotizada mencionado no 2º artigo e apoiado nos fatores que influenciam o monitoramento geodésico de estruturas no 1º artigo, no último capítulo foi proposto uma metodologia visando o desenvolvimento de um *software* que automatiza o controle de estações totais robotizadas e o processamento de dados em tempo real no monitoramento geodésico de estruturas. Para atingir tal objetivo necessitou-se desenvolver também um dispositivo que realiza a medição de temperatura e pressão

atmosférica no local e que envie esses dados em tempo real para o *software* realizar a correção das distâncias medidas pelo instrumento instantaneamente. Com a finalidade de efetuar a análise da estrutura ao longo do tempo, o sistema desenvolvido disponibiliza uma ferramenta que compara diversas campanhas realizadas em épocas distintas através da diferença de coordenadas obtidas. Esta análise pode ser feita através de valores dispostos por meio de tabelas ou por meio de gráficos.

No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais da presente pesquisa contemplando as conclusões encontradas e as recomendações para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ANA. **Manual do Empreendedor – Volume VI - Guia para a Construção de Barragens**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2015.

CARVAJAL, F. A. R. **Automação da correção da primeira velocidade em medidas eletrônicas de distância com base em rede de observação de parâmetros ambientais Multi-estações**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2019.

DA CRUZ, W. **Integração de dados de monitoramento de estruturas antrópicas. Estudo de caso: UHE Mauá**. Tese de Doutorado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2015.

ENGEL, P.; SCHWEIMLER, B. **Design and Implementation of a modern Automatic Deformation Monitoring System**. Journal of Applied Geodesy, Neubrandenburg, Germany, 2016.

JERKE, A. **Análise do monitoramento geodésico da barragem da usina hidrelétrica Mauá com equipamentos de diferentes precisões e diferentes softwares de processamento**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2019.

JERKE, A.; FAGGION, P. L.; DA CRUZ, W. **Fatores que influenciam no monitoramento geodésico de barragens utilizando estação total**. Revista de Geociências do Nordeste, v. 8, n. 1, p. 47–59, 2022.

JERKE, A.; RODRIGUEZ, F. A. C.; MEDEIROS, L. I. B. de; SAMPAIO, L. F.; ALVES, S. de 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, v. 8, n. 2, p. 102–113, 2022.

LINDENBERGH, Roderik; PIETRZYK, Peter. Change detection and deformation analysis using static and mobile laser scanning. **Applied Geomatics**, v. 7, n. 2, p.65-74, 9 jan. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12518-014-0151-y>.

LOVAS, T., et. al. **Terrestrial laser scanning in deformation measurements of structures**. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, 37., 2008, Beijing, p. 527–532.

MELLO, F. M. **A importância dos reservatórios formados por barragens**. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2013.

NADAL, M. A. D. **Controle e operação remota de Estações Totais robotizadas voltado à auscultação geodésica**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2008.

RUSU, Radu Bogdan *et al.* Towards 3D Point cloud based object maps for household environments. **Robotics And Autonomous Systems**, Garching Bei München, v. 11, n. 56, p. 927-941, ago. 2008.

SILVEIRA, João F. A. **Instrumentação e comportamento de Fundações de Barragens de concreto**. São Paulo: Oficina de textos, 2003.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Structure Deformation Surveying**: Engineering Manual. Washington, 2018.

VEIGA, L. A. K. **Sistema para mapeamento automatizado em campo: conceitos, metodologia e implantação de um protótipo**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

2 FATORES QUE INFLUENCIAM NO MONITORAMENTO GEODÉSICO DE BARRAGENS UTILIZANDO ESTAÇÃO TOTAL

Este artigo analisa a influência de agentes externos durante o monitoramento geodésico de estruturas, estudo de caso na barragem da Usina Hidrelétrica (UHE) de Mauá-PR, combinando o método de posicionamento por satélite utilizando GNSS com o método da irradiação utilizando Estação Total robotizada para determinar eventuais movimentos de pontos de monitoramento da barragem. Os procedimentos adotados consistem em comparar os resultados do monitoramento realizado com as comportas do vertedor abertas com os resultados do mesmo monitoramento realizado com as comportas do vertedor fechadas e, conseqüentemente, analisar se a abertura do vertedor interfere na precisão do monitoramento geodésico, uma vez que o vertedor se localiza no centro da barragem. Após o processamento dos dados foram feitas análises onde verificou-se que o fato da barragem estar com o vertedor aberto, afeta a precisão das coordenadas no corpo da barragem à jusante apresentando valores significativamente diferentes das coordenadas com o vertedor aberto ou fechado. Paralelamente, com o mesmo equipamento, realizou-se o monitoramento de pontos engastados na crista da barragem à montante onde observou-se que dependendo do ponto da rede geodésica utilizado para a determinação das coordenadas dos pontos na crista da barragem, margem direita, esquerda ou sobre a barragem as coordenadas também apresentam variações significativas.

2.1 INTRODUÇÃO

Para garantir as necessárias condições de segurança das barragens ao longo da sua vida útil, devem ser adotadas medidas de prevenção e controle. Essas medidas asseguram uma probabilidade de ocorrência de acidente reduzida ou praticamente nula. Porém, devem ser periodicamente revisadas levando-se em consideração eventuais alterações resultantes do envelhecimento e deterioração das estruturas (ANA, 2018).

Para se estabelecer um controle do uso e da segurança da barragem são necessários diversos procedimentos visando à gestão e o controle do sistema da barragem para que novos desastres sejam evitados. O monitoramento contínuo voltado para a segurança e integridade de sua estrutura utilizando medições geodésicas têm sido eficientes para controle.

Monitorar uma estrutura do ponto de vista do posicionamento geodésico significa determinar e comparar as coordenadas de pontos de monitoramento em duas épocas distintas, verificando e analisando se houveram variações, dentro de um nível de significância, nestas coordenadas (Silveira, 2006).

O primeiro registro de monitoramento de barragens foi em Cantaria de Grosbois, na França. Em 1853, medições geodésicas foram realizadas nesta barragem para a observação dos deslocamentos da crista. Essa barragem havia apresentado inúmeros problemas desde o início do enchimento do reservatório em 1838 e teve que ser reforçada em mais de uma ocasião. Sendo assim, a partir de 1853, medições geodésicas tornaram-se prática comum em barragens (Silveira, 2006; da Cruz, 2015; Jerke, 2019).

No âmbito acadêmico, o número de trabalhos relacionados ao monitoramento de grandes estruturas antrópicas (construídas pelo homem) vem aumentando nos últimos anos.

Na China, Jingzhan (2002) comparou o resultado do monitoramento de deformação da barragem da UHE Ertan entre a Estação Total TCA2003, T3000 *Electronic Weiwei* e DI2002 *Range Finder*, todas com a mesma precisão no mesmo conteúdo de trabalho, no mesmo plano de observação, no mesmo período de observação e realizado sob as mesmas condições da área de teste. Jingzhan (2002) concluiu que as observações da Estação Total TCA2003, T3000 e DI2002 são diferentes em termos de eficiência de observação, indicando que a estação total TCA2003 apresentou melhores resultados do que outros instrumentos de mesma precisão.

Na *University of New Brunswick* - Canadá, Chrzanowski e Szostak-Chrzanowski (2009) realizaram um estudo sobre os velhos problemas e as novas soluções no monitoramento de estruturas, concluindo que os efeitos das condições atmosféricas modificáveis nas medições geodésicas e os efeitos da baixa confiabilidade da instrumentação utilizada ainda permanecem como os principais problemas dos sistemas de monitoramento atuais. Com base nas conclusões desta pesquisa, estes efeitos foram tratados durante o monitoramento da barragem da UHE Mauá.

Chen et al. (2013) realizaram um estudo sobre a aplicação do GeoMos no monitoramento automático da área protegida de um metrô onde os resultados mostraram que o GeoMos trabalhando em conjunto com o Estação Total TM30 atende aos requisitos de precisão no monitoramento de deformação da área protegida do metrô e fornece referências técnicas para monitoramento de deformação de projetos similares.

Ainda na China, Wenchun e Zhengyuan (2018) pesquisaram sobre a aplicação do *software* de monitoramento automático GeoMos no monitoramento de assentamentos do túnel do metrô de Shenyang, avaliando a precisão dos dados coletados e realizando análises de viabilidade desse sistema no projeto de monitoramento de assentamentos. Esta pesquisa estabeleceu a importância teórica e o valor prático do GeoMos para projetos de monitoramento de engenharia de trânsito ferroviário urbano.

No Brasil, pesquisadores do grupo Geodésia Aplicada a Engenharia do PPGCG da UFPR, vinculado ao CNPq desenvolve atividades de pesquisa em barragens desde o final da década de 70, com ênfase em auscultação geodésica para verificar o movimento da crosta terrestre. Sendo que a partir do ano de 2003 também se desenvolveram pesquisas voltadas para o monitoramento de barragens.

Da Cruz (2015) integrou as observações derivadas do monitoramento de barragens no estudo de caso da UHE Mauá, efetivando a análise e a representação de deslocamentos, utilizando vetores e elipses de erro, a partir de um sistema computacional especialmente desenvolvido para este fim.

Jerke (2019) realizou o monitoramento da UHE Mauá, integrando técnicas espaciais GNSS e de levantamentos terrestres para determinação de coordenadas e analisou o resultado do monitoramento feito com equipamentos, com precisões de 1" e de 5", e com diferentes *softwares* de processamento, um comercial para monitoramento em tempo real e outro desenvolvido por Da Cruz (2015), concluindo que tanto o processamento feito com o *software* comercial quanto o processamento realizado com o *software* desenvolvido por Da Cruz apresentaram resultados significativamente iguais em ambos equipamentos analisados.

Neste contexto, esta pesquisa visa analisar a influência do vertedor aberto, no resultado do monitoramento geodésico, para os pontos de jusante e a influência da posição da estação à montante, para os pontos localizados na crista da barragem da UHE Mauá. Cabe salientar que para garantir a estabilidade dos pontos da rede geodésica de referência, os vértices da mesma foram rastreados durante três seções de 8 horas contínuas utilizando receptores GNSS. Este posicionamento geodésico serviu para garantir a estabilidade da rede que será utilizada como referência para o monitoramento dos pontos irradiados no corpo da barragem utilizando estação total robotizada.

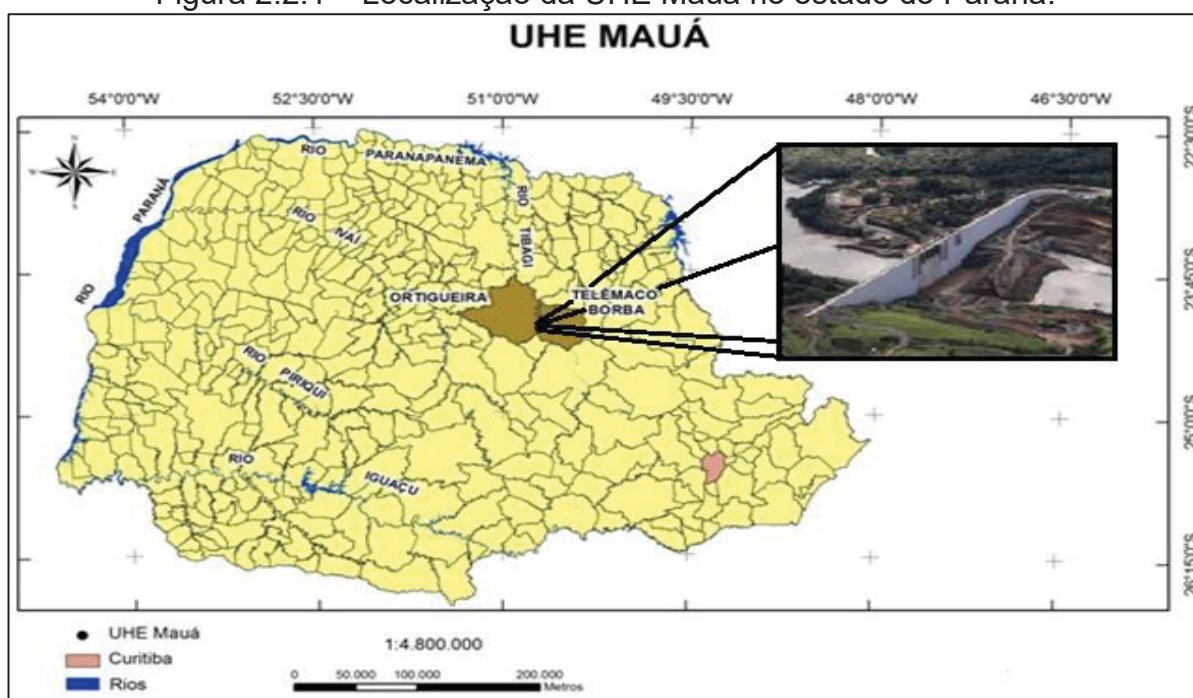
Os resultados encontrados mostram diferenças significativas nas coordenadas tanto à jusante como à montante da barragem.

2.2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desta pesquisa realizou-se como estudo de caso o monitoramento geodésico da barragem da UHE Mauá.

A UHE Mauá situa-se na região centro-oeste do Paraná, posicionada nas coordenadas $24^{\circ}02'24''$ de latitude Sul e $50^{\circ}41'33''$ de longitude Oeste, como mostra a Figura 2.2.1. Está construída na região do Salto Mauá do rio Tibagi, na divisa entre os municípios de Telêmaco Borba e Ortigueira (LACTEC, 2018).

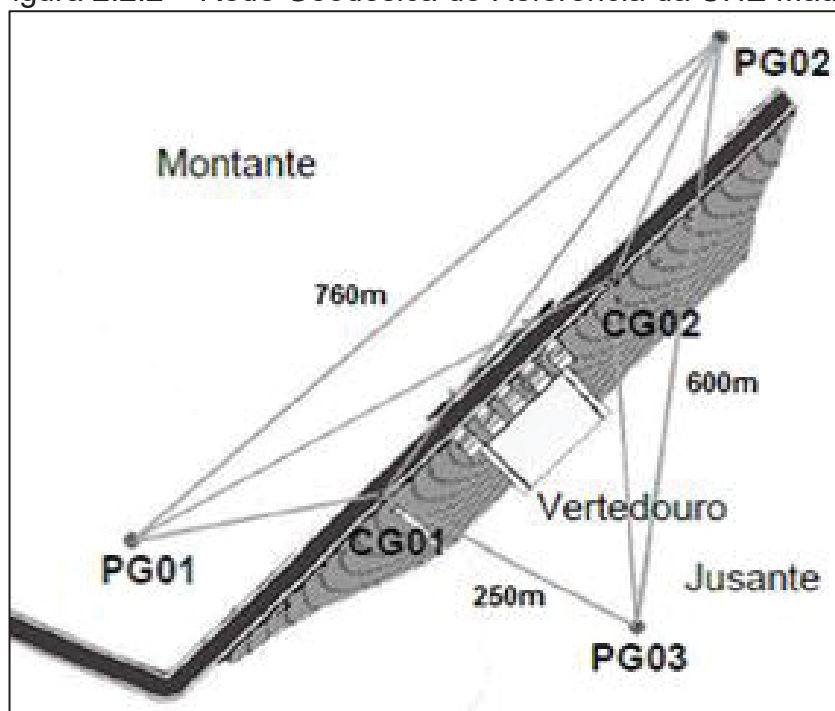
Figura 2.2.1 – Localização da UHE Mauá no estado do Paraná.



Fonte: Siguel (2013).

A rede geodésica de referência da UHE Mauá é composta por dois pilares geodésicos à montante PG01 e PG02 e um pilar à jusante PG03. Estes têm suas posições materializadas através de sistemas de centragem forçada. Além disso, dois dispositivos de centragem forçada são instalados na crista da barragem CG01 e CG02 permitindo uma ligação entre os pontos à montante e à jusante, conforme ilustra a Figura 2.2.2.

Figura 2.2.2 – Rede Geodésica de Referência da UHE Mauá.



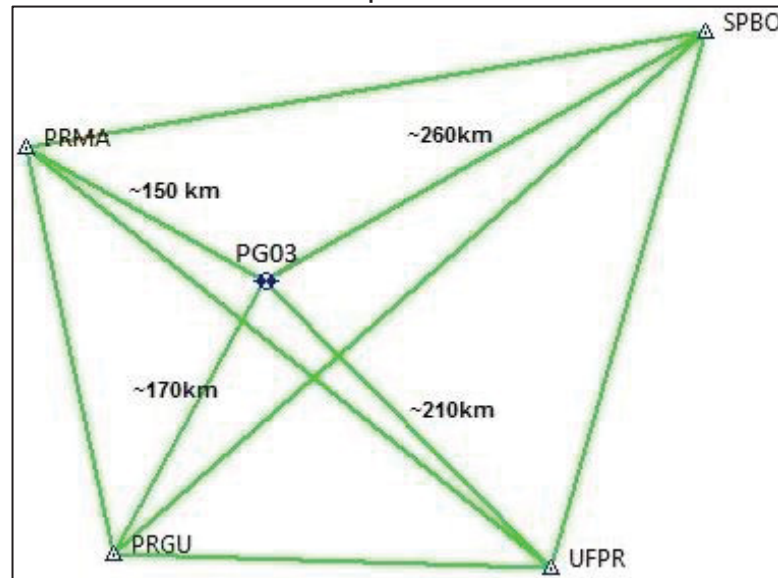
Fonte: Siguel (2013).

Os cinco marcos geodésicos da rede são ocupados simultaneamente por receptores GNSS com tempo mínimo de rastreamento de 6 horas. Os receptores são identificados em relação aos marcos geodésicos de modo a utilizar o mesmo conjunto marco-receptor em todas as campanhas a fim de se obter as coordenadas dos pilares com os mesmos equipamentos.

Realizou-se duas seções de rastreamento a uma taxa de 5 segundos nos dias 24/04/2018 e 09/08/2018. No processamento dos dados GNSS utilizou-se uma máscara de elevação de 10° e efemérides precisas, fornecidas pelo *International GNSS Service* (IGS, 2018). Utilizou-se também parâmetros calibrados para as antenas dos receptores, fornecidos pelo *National Geodetic Survey* (NGS, 2018).

No ajustamento foram analisadas todas as combinações possíveis entre as linhas de base disponíveis num raio de 300 km e a melhor solução encontrada foi um arranjo do PG03 com as quatro bases da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) mais próximas, como mostra a Figura 2.2.3.

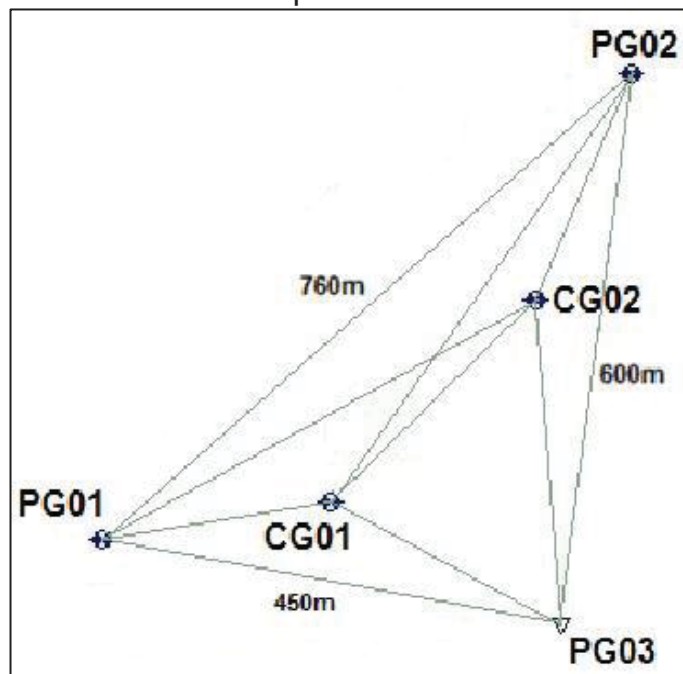
Figura 2.2.3 – Geometria de processamento GNSS do PG03.



Fonte: Jerke et al. (2022).

Para realizar o processamento dos demais marcos, utilizou-se o PG03 como referência e pelo método relativo estático determinou-se as coordenadas geodésicas (φ , λ e h) dos demais marcos geodésicos como mostra a Figura 2.2.4.

Figura 2.2.4 – Geometria de processamento dos demais marcos.



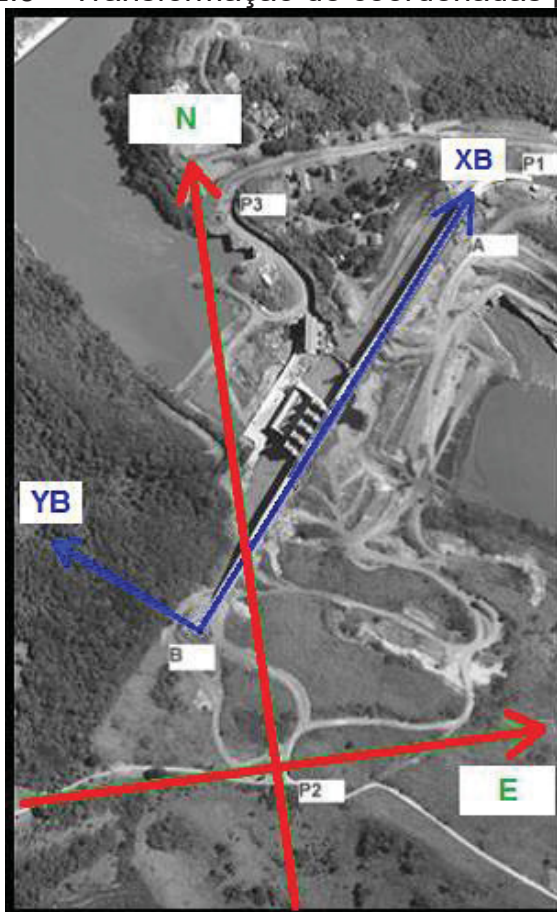
Fonte: Jerke et al. (2022).

Para cada linha de base processada foram analisados os resíduos, onde trechos com possíveis erros grosseiros foram eliminados e para se alcançar um

resultado único, realizou-se o ajustamento utilizando o próprio *software* Topcon Tools.

Com o objetivo de facilitar o entendimento e a interpretação do comportamento dos pontos de monitoramento, as coordenadas da rede geodésica são transformadas para um sistema de referencial cartesiano local, denominado de Sistema de coordenadas da Barragem (SB), com um eixo no sentido longitudinal da estrutura com orientação positiva na direção da margem direita “XB”, o eixo perpendicular a este e orientação positiva no sentido do fluxo do rio (montante para jusante) “YB” e o eixo “ZB” completando o terno do sistema dextrogiro. (Da Cruz, 2015). A Figura 2.2.5 ilustra a representação do SB pelos eixos XB e YB.

Figura 2.2.5 – Transformação de coordenadas para o SB.



Fonte: Da Cruz (2015).

Foi necessário realizar quatro campanhas de monitoramento na barragem da Usina Hidrelétrica Mauá, com o intuito de verificar possíveis movimentos de pontos de monitoramento durante o período de observações com o vertedor aberto e com o vertedor fechado.

Na primeira campanha, com o vertedor fechado, realizou-se o levantamento GNSS da rede geodésica e o levantamento dos pontos de monitoramento através da técnica da irradiação a fim de se obter as coordenadas de referência. Na segunda campanha foi realizado novamente o levantamento GNSS da rede geodésica, a fim de verificar se houve ou não a movimentação dos pilares utilizados como referência, bem como o levantamento dos pontos de monitoramento para a verificação do deslocamento/estabilidade dos pontos de monitoramento. Como nesta campanha as comportas do vertedor estavam abertas devido à manutenção nas turbinas da Pequena Central Hidrelétrica (PCH), utilizada para manter a vazão sanitária do rio Tibagi, suspeitou-se que o fato poderia influenciar nas coordenadas obtidas, haja vista que estas apresentaram valores inesperados. Logo, após encerrar a manutenção das turbinas, a fim de aproveitar que o nível de água no reservatório fosse praticamente o mesmo que a campanha anterior, realizou-se uma terceira campanha de levantamento com as comportas fechadas para avaliar a influência ou não deste fenômeno.

Com relação a campanha de monitoramento à montante, foi realizado posteriormente somente uma campanha, pois o objetivo era comparar as coordenadas obtidas utilizando pontos da rede geodésica de referência diferentes, localizados na margem direita, esquerda à montante e sobre a barragem.

A Tabela 2.2.1 apresenta as características de cada campanha de monitoramento.

Tabela 2.2.1 – Características das campanhas de monitoramento

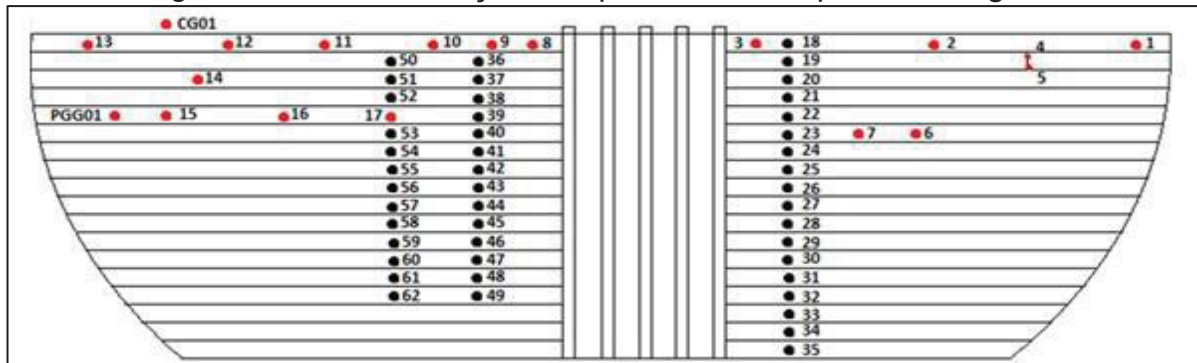
Campanha	Vertedor	Levantamento	Nível de água
Primeira	Fechado	GNSS e Irradiação	633,43m
Segunda	Aberto	GNSS e Irradiação	628,87m
Terceira	Fechado	Irradiação	628,52m
Montante	Fechado	Irradiação	Não observado

Fonte: Jerke et al. (2022).

Para o levantamento dos pontos de monitoramento à jusante no corpo da barragem, a estação total robótica foi instalada e nivelada sobre o pilar PG03 e com um refletor instalado no dispositivo de centragem forçada CG01 realizou-se a orientação da estação total. Para tal, utilizou-se as coordenadas obtidas através do GNSS, transformadas para o Sistema da Barragem (SB). Com a orientação

concluída, realizou-se oito séries de medição de todos os prismas localizados à jusante no corpo da barragem conforme mostra a Figura 2.2.6.

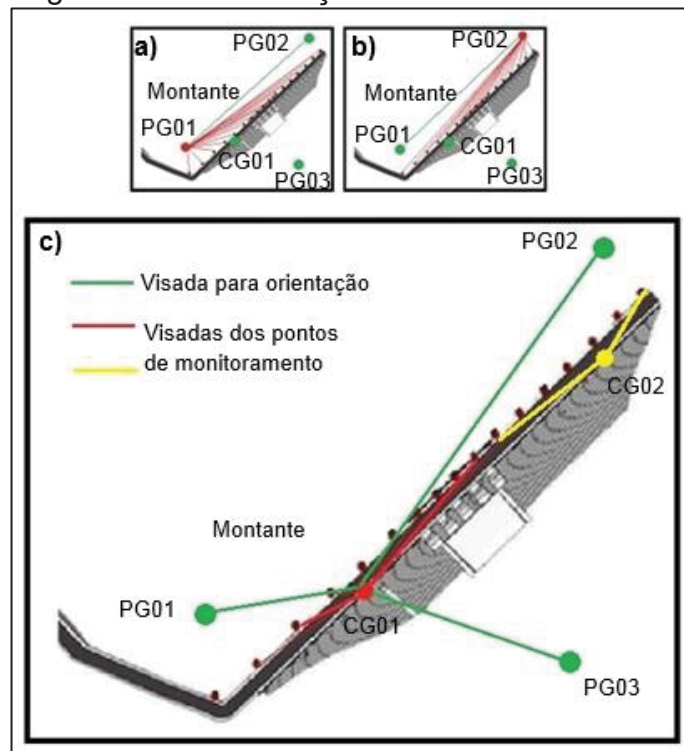
Figura 2.2.6 – Localização dos prismas no corpo da barragem.



Fonte: Da Cruz (2015).

De forma análoga, foram determinadas as coordenadas de pontos de monitoramento materializados à montante na barragem. Na Figura 2.2.7 observa-se os croquis das visadas a partir dos pontos PG01, PG02, CG01 e CG02.

Figura 2.2.7 – Indicação das linhas de visada.



Fonte: Jerke et al. (2022).

Como as visadas realizadas sobre o lago sofrem influência da alteração dos parâmetros ambientais (temperatura e pressão atmosférica) entre a água e o ar, que influenciam na medida da distância e no cálculo das coordenadas a partir dos pontos sob influência, PG01 (Figura 2.2.7-a) e PG02 (Figura 2.2.7-b). Para diminuir esta influência, as mesmas coordenadas foram determinadas a partir de dois pontos fora da influência da refração da água, os pontos CG01 e CG02 (Figura 2.2.7-c), que se situam na crista da barragem e as visadas a partir deles são realizadas sobre a pista de rolamento.

Após orientar a estação total de acordo com cada marco ocupado, efetuou-se a pontaria nos pontos de monitoramento. Na Figura 2.2.8 observa-se o prisma em MSU02 e a estação total no marco geodésico PG01.

Figura 2.2.8 – Ponto de monitoramento à montante.



Fonte: Jerke et al. (2022).

A correção de cada medida de distância foi realizada com a utilização dos parâmetros ambientais (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O valor das coordenadas dos pilares da rede geodésica de referência no sistema da barragem obtidas na primeira e na segunda campanha de

monitoramento, juntamente com o respectivo desvio padrão, são mostradas nas Tabelas 2.3.1 e 2.3.2.

Tabela 2.3.1 – Coordenadas da Rede Geodésica na primeira campanha

Pilar	XB (m)	σXB (mm)	YB (m)	σYB (mm)	ZB (m)	σZB (mm)
CG01	668,645	0,0	207,438	0,0	0,327	1,0
CG02	352,486	0,0	207,069	0,0	0,244	1,0
PG01	903,835	0,0	73,731	0,0	4,644	1,0
PG02	149,125	0,0	142,373	0,0	15,998	1,0
PG03	653,587	0,0	453,845	0,0	-50,052	1,0

Fonte: Jerke et al. (2022).

Tabela 2.3.2 – Coordenadas da Rede Geodésica na segunda campanha

Pilar	XB (m)	σXB (mm)	YB (m)	σYB (mm)	ZB (m)	σZB (mm)
CG01	668,645	0,0	207,437	0,0	0,328	1,0
CG02	352,485	0,0	207,068	0,0	0,242	1,0
PG01	903,836	0,0	73,731	0,0	4,642	1,0
PG02	149,123	0,0	142,373	0,0	15,998	1,0
PG03	653,587	0,0	453,845	0,0	-50,052	1,0

Fonte: Jerke et al. (2022).

A diferença dos valores das coordenadas obtidas na primeira e na segunda campanha de monitoramento da Rede Geodésica de Referência é mostrada na Tabela 2.3.3.

Tabela 2.3.3 – Diferença de coordenadas da Rede Geodésica entre a primeira e a segunda campanha

Pilar	ΔXB (m)	σXB (mm)	ΔYB (m)	σYB (mm)	ΔZB (m)	σZB (mm)
CG01	0,0	0,0	1,0	0,0	-1,0	1,0
CG02	1,0	0,0	1,0	0,0	2,0	1,0
PG01	-1,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0
PG02	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
PG03	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0

Fonte: Jerke et al. (2022).

Considerando que não houve variações significativas, dentro de um nível de significância de 95%, das coordenadas obtidas em épocas diferentes, as coordenadas da Rede Geodésica de Referência foram utilizadas para a orientação do levantamento no corpo da barragem. Na terceira campanha e na campanha à montante foram consideradas as coordenadas da rede geodésica da segunda

campanha haja vista que ambas foram realizadas somente 18 dias após a segunda campanha.

A Tabela 2.3.4 apresenta a média da diferença das coordenadas entre a primeira e a segunda campanha de monitoramento dos pontos à jusante.

Tabela 2.3.4 – Diferença média de coordenadas dos 62 pontos de monitoramento entre a primeira e a segunda campanha

ΔXB (mm)	σXB (mm)	ΔYB (mm)	σYB (mm)	ΔZB (mm)	σZB (mm)
-4,0	1,0	-5,0	2,0	5,0	1,0

Fonte: Jerke et al. (2022).

Comparando a primeira campanha com a segunda, percebe-se variações no eixo XB inesperados, onde a diferença de coordenadas em XB resultou em um valor médio de $-4,0 \pm 10\text{mm}$, indicando possíveis deslocamentos laterais em todos os pontos de monitoramento. Como em barragens quase não há forças laterais atuantes agindo na estrutura, para analisar se houve um possível deslocamento lateral, foi feita outra campanha de levantamento para comprovação de tal hipótese. Vale lembrar também que na primeira campanha as comportas do vertedor estavam fechadas e na segunda campanha as comportas do vertedor estavam abertas, com isso suspeitou-se que a água vertida poderia influenciar nos resultados do monitoramento geodésico de barragem. Realizou-se então mais uma campanha de monitoramento com as comportas fechadas, logo após fecharem as comportas devido à manutenção nas turbinas para aproveitar o mesmo nível de água que a campanha anterior.

A Tabela 2.3.5 apresenta a diferença da média das coordenadas encontradas entre a segunda e a terceira campanha de monitoramento, sendo que a terceira campanha foi realizada 18 dias após a segunda campanha e nas duas campanhas não houve diferença significativa no nível de água do reservatório.

Tabela 2.3.5 – Diferença média de coordenadas dos 62 pontos de monitoramento entre a segunda e a terceira campanha

ΔXB (mm)	σXB (mm)	ΔYB (mm)	σYB (mm)	ΔZB (mm)	σZB (mm)
3,0	1,0	2,0	2,0	-5,0	1,0

Fonte: Jerke et al. (2022).

Como os deslocamentos em XB continuaram a apresentar valores inesperados na segunda – terceira campanha com um valor médio de $3,0 \pm 1,0\text{mm}$, mesmo com um intervalo de tempo de 18 dias e com uma diferença do nível de água do reservatório de 0,35m, analisou-se o comportamento das coordenadas entre as campanhas com as mesmas condições, ou seja, as campanhas com as comportas fechadas (primeira – terceira).

A Tabela 2.3.6 apresenta a diferença da média das coordenadas encontradas entre a primeira e a terceira campanha de monitoramento, analisando-se as campanhas que estavam com as comportas fechadas.

Tabela 2.3.6 – Diferença média de coordenadas dos 62 pontos de monitoramento entre a primeira e a terceira campanha

$\Delta\text{XB (mm)}$	$\sigma\text{XB (mm)}$	$\Delta\text{YB (mm)}$	$\sigma\text{YB (mm)}$	$\Delta\text{ZB (mm)}$	$\sigma\text{ZB (mm)}$
-1,0	1,0	-3,0	2,0	0,0	1,0

Fonte: Jerke et al. (2022).

Analisando os resultados das campanhas com as comportas fechadas, as diferenças de coordenadas em XB apresentou valor médio de $-1,0 \pm 1,0\text{mm}$, verifica-se portanto que, considerando a precisão do equipamento utilizado, não há indicação de movimento lateral dentro de um nível de significância de 95%.

Já em YB, a diferença das coordenadas encontradas entre as campanhas variou significativamente, sendo que a diferença encontrada na primeira – segunda campanha (comportas abertas) o valor encontrado foi de $-5,0 \pm 2,0\text{mm}$, na segunda – terceira campanha o valor foi de $+2,0 \pm 2,0\text{mm}$ (comportas abertas) e na primeira – terceira (comportas fechadas) o valor foi de $-3,0 \pm 2,0\text{mm}$. Como apresentado no texto, o eixo YB está no sentido do fluxo do rio, consequentemente, como na segunda e na terceira campanha o nível do reservatório baixou aproximadamente 5m em relação a primeira campanha, as forças atuantes e a pressão exercida pelo reservatório contra a barragem diminuíram, podendo ser uma possível causa da variação negativa encontrada no valor das diferenças das coordenadas. Já quando se analisa as campanhas que não tiveram uma diferença expressiva no nível de água do reservatório (segunda – terceira campanha), o resultado encontrado da diferença de coordenadas foi de $2,0 \pm 2,0\text{mm}$, não podendo-se afirmar que houve movimentação dos pontos considerando a precisão do equipamento.

Em ZB o comportamento foi praticamente o mesmo que em XB, pois na campanha com as comportas abertas o valor médio foi de $5,0 \pm 1,0\text{mm}$ e na campanha com as comportas fechadas o valor médio foi de $0,0 \pm 1,0\text{mm}$.

A partir destes resultados pode-se verificar que o fato das comportas estarem abertas, a água vertida pode influenciar na obtenção das coordenadas dos pontos à jusante e no resultado do monitoramento geodésico da barragem.

Para o estudo das coordenadas dos pontos à montante, optou-se por utilizar apenas uma campanha de monitoramento e analisar as diferenças entre as coordenadas dos pontos de monitoramento, obtidas através de diferentes pilares da rede geodésica (PG01, PG02, CG01 e CG02) buscando verificar a existência da influência da refração causada pelo reservatório. A Tabela 2.3.7 contém as diferenças entre as coordenadas obtidas a partir do PG01 e do PG02, onde as medições estavam sob a influência do reservatório.

Tabela 2.3.7 – Diferença de coordenadas dos pilares de montante entre PG01 e PG02

Pilar	XB (mm)	σXB (mm)	YB (mm)	σYB (mm)	ZB (mm)	σZB (mm)
MSU01	-1,0	0,0	7,0	2,0	0,0	1,0
MSU02	0,0	1,0	8,0	2,0	6,0	1,0
MSU03	1,0	1,0	7,0	1,0	8,0	2,0
MSU04	2,0	0,0	7,0	1,0	12,0	2,0
MSU05	0,0	0,0	7,0	1,0	16,0	1,0
MSU06	2,0	1,0	9,0	1,0	22,0	1,0
MSU07	0,0	0,0	8,0	1,0	28,0	1,0
MSU08	0,0	1,0	10,0	2,0	30,0	3,0
MSU09	0,0	1,0	9,0	2,0	35,0	1,0
MSU10	0,0	0,0	8,0	1,0	37,0	1,0

Fonte: Jerke et al. (2022).

Nas Tabelas 2.3.8 e 2.3.9, é possível observar as diferenças entre as coordenadas obtidas a partir dos pilares PG01 e PG02, respectivamente, e os dispositivos de centragem forçada CG01 e CG02, que não estão sob a influência do reservatório. Cabe salientar que do marco CG01 é possível observar somente os pontos de MSU01 ao MSU 07 e do marco CG02 observa-se os demais pontos de monitoramento à montante. Como não é possível observar todos os pontos de monitoramento a partir de CG01 e CG02, unificou-se os resultados das diferenças encontradas nas Tabelas 2.3.8 e 2.3.9.

Tabela 2.3.8 – Diferença de coordenadas do pilar de montante PG01 em relação aos marcos CG01 e CG02

Pilar	XB (mm)	σ XB (mm)	YB (mm)	σ YB (mm)	ZB (mm)	σ ZB (mm)
MSU01	-2,0	0,0	16,0	1,0	110,0	1,0
MSU02	-3,0	0,0	19,0	1,0	108,0	2,0
MSU03	-1,0	0,0	15,0	1,0	114,0	1,0
MSU04	-1,0	0,0	13,0	1,0	115,0	1,0
MSU05	-2,0	0,0	12,0	0,0	118,0	1,0
MSU06	-1,0	0,0	10,0	0,0	120,0	0,0
MSU07	-3,0	0,0	10,0	1,0	120,0	1,0
MSU08	-7,0	0,0	4,0	2,0	333,0	1,0
MSU09	-6,0	1,0	3,0	1,0	340,0	1,0
MSU10	-7,0	1,0	4,0	2,0	341,0	1,0

Fonte: Jerke et al. (2022).

Tabela 2.3.9 – Diferença de coordenadas do pilar de montante PG02 em relação aos marcos CG01 e CG02

Pilar	XB (mm)	σ XB (mm)	YB (mm)	σ YB (mm)	ZB (mm)	σ ZB (mm)
MSU01	-1,0	0,0	9,0	2,0	110,0	2,0
MSU02	-3,0	0,0	10,0	2,0	102,0	3,0
MSU03	-2,0	0,0	7,0	1,0	105,0	2,0
MSU04	-2,0	0,0	6,0	1,0	104,0	2,0
MSU05	-2,0	0,0	5,0	1,0	102,0	1,0
MSU06	-3,0	0,0	1,0	1,0	098,0	1,0
MSU07	-7,0	0,0	-4,0	2,0	305,0	1,0
MSU08	-6,0	0,0	-7,0	2,0	310,0	2,0
MSU09	-7,0	0,0	-5,0	1,0	306,0	1,0
MSU10	-7,0	0,0	-5,0	1,0	305,0	1,0

Fonte: Jerke et al. (2022).

Considerando os resultados das Tabelas 2.3.7, 2.3.8 e 2.3.9, juntamente com a propagação de covariância para a obtenção das coordenadas dos pontos de monitoramento à montante, percebe-se que em cada marco utilizado para realizar a medição, há uma diferença significativa no valor das coordenadas obtidas nos pontos de monitoramento à montante, sendo que os valores dessas diferenças de coordenadas são maiores que a influência da precisão do instrumento utilizado.

Nesta análise descarta-se a possibilidade de que estes valores indiquem a movimentação/deslocamento destes pontos visto que as medições de todos os pontos através de todos os marcos foram realizadas na mesma campanha, ou seja, foram realizadas no mesmo dia.

Com isso, constatou-se que dependendo do marco utilizado para a obtenção das coordenadas à montante, há a possibilidade de que a refração atmosférica

causada pelo reservatório de água influencie no valor das coordenadas dos pontos de monitoramento à montante.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação a estabilidade da rede geodésica de referência, pode-se afirmar que as diferenças entre as coordenadas obtidas em épocas diferentes, dentro de um nível de significância de 95%, são insignificantes. Em função disso, as coordenadas obtidas na primeira campanha foram utilizadas como referência para o levantamento no corpo da barragem para as demais campanhas.

Para o monitoramento dos pontos à jusante, verificou-se que os resultados entre as campanhas com o vertedor em diferentes condições (uma campanha com as comportas abertas e outra campanha com as comportas fechadas) apresentam valores diferentes, indicando movimento lateral na barragem. Já quando se analisa as campanhas com o vertedor nas mesmas condições (ambas campanhas com as comportas fechadas), os resultados apresentam valores compatíveis com as forças exercidas na barragem, pois a diferença das coordenadas em YB indica que há uma variação no mesmo sentido do fluxo do rio, onde há uma maior influência de força e pressão aplicadas na barragem, dentro dos limites aceitáveis, devido à baixa de aproximadamente 5 metros do nível de água do reservatório entre as campanhas analisadas.

Desta forma conclui-se que durante o monitoramento geodésico de barragem à jusante, o fato da barragem estar vertendo pode interferir no valor das coordenadas obtidas e conseqüentemente no resultado do monitoramento.

Com relação ao monitoramento de montante constatou-se que na obtenção das coordenadas a partir da margem esquerda (PG02), margem direita (PG01) ou sobre a crista da barragem (CG01 e CG02), os resultados são diferentes dependendo do marco utilizado para realizar a medição. Através desta constatação iniciou-se uma pesquisa, sendo conduzida em outra tese de doutorado na Universidade Federal do Paraná para avaliar a influência do coeficiente de refração em função das características e do tamanho da área superficial de água do reservatório, no monitoramento geodésico de barragem.

Analisando os resultados obtidos, recomenda-se que o resultado do monitoramento seja realizado através dos pontos engastados no paramento da

barragem à jusante para evitar a influência da refração da água do reservatório e que as campanhas de monitoramento sejam realizadas com o vertedor fechado. Com relação ao monitoramento à montante recomenda-se muito cuidado com a modelagem da refração lateral para minimizar a distorção das coordenadas horizontais (XB e YB). Já para a determinação da coordenada vertical (ZB), também denominado de recalque, recomenda-se a utilização da técnica de nivelamento geométrico de primeira ordem, método das visadas iguais que, quando utilizado de maneira correta minimiza efeitos da refração, da curvatura da Terra e da colimação vertical do instrumento.

REFERÊNCIAS

- ANA. **Agência Nacional de Águas.** Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/cadastros/barragens/>. Acesso em: 20/10/2018.
- CHEN, X.; HUANG, T. LIU L. A; SHEN Y. **Application of GeoMos in automatic monitoring of the protected area of subway.** p. 36-51. Master of Science Thesis. School of Earth Sciences and Engineering, Hehai University. China, 2013.
- CHRZANOWSKI, A.; SZOSTAK-CHRZANOWSKI, A. Deformation monitoring surveys – Old problems and new solutions. **Journal of Technical Sciences**, v. 21, n. 3, p. 47-60, 2009.
- DA CRUZ, W. **Integração de dados de monitoramento de estruturas antrópicas. Estudo de caso: UHE Mauá.** p. 74-91. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2015.
- IGS. **International GNSS Service.** Disponível em: <http://igsceb.jpl.nasa.gov>. Acesso em: 15/10/2018.
- JERKE, A. **Análise do monitoramento geodésico da barragem da Usina Hidrelétrica Mauá com equipamentos de diferentes precisões e diferentes softwares de processamento.** 117f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2019.
- JERKE, A.; FAGGION, P. L.; DA CRUZ, W. **Fatores que influenciam no monitoramento geodésico de barragens utilizando estação total.** Revista de Geociências do Nordeste, v. 8, n. 1, p. 47–59, 2022.
- JINGZHAN, Z. Application of TCA2003 Total Station to surface deformation observation for Ertan Dam. **Academic Journal Eletronic**, v. 63, n. 45, p. 34-38, 2002.
- LACTEC. **Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento.** Disponível em: <http://www.lactec.org.br>. Acesso em: 15/10/2018.
- NGS. **National Geodetic Survey.** Disponível em: <http://www.ngs.noaa.gov>. Acesso em: 15/10/2018.
- SIGUEL, A. R. **Monitoramento da barragem da UHE Mauá utilizando irradiação tridimensional.** 104f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, 2013.
- SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e enrocamento.** São Paulo, Brasil: Oficina de textos, 2006. p 33.
- WENCHUN, Z.; ZHENGYUAN, X. Research and Application of Modern Geomatics Technology in the Deformation Monitoring of Metro Tunnel. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, v. 40, n. 12, p. 2257-2265, 2018.

3 DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO PARA O CONTROLE E OPERAÇÃO REMOTA DE ESTAÇÕES TOTAIS

Em trabalhos que exigem precisões milimétricas das medições, a operação remota de estações totais se torna uma opção desejável para reduzir o contato direto entre o operador e o instrumento, além de automatizar a transferência dos dados coletados durante o levantamento. Este trabalho teve como objetivo explorar, no âmbito da automação de instrumentos, a potencialidade de uso de protocolo de comunicação no desenvolvimento de um aplicativo de celular, para o controle e operação de uma estação total robotizada, modelo Leica TS15, a partir do protocolo de comunicação GeoCOM. Para o desenvolvimento do aplicativo, foi utilizada a plataforma Web gratuita MIT *App Inventor* que possibilitou a elaboração da interface, bem como a programação de funções de conexão de smartphones com a estação total, dentre elas: medição de distância, movimento de escopo vertical, horizontal e rotação da estação, busca automática do prisma e o movimento entre as posições de medição direta e inversa. Além disso, utilizou-se a conexão via Bluetooth para o envio de comandos e recebimento de dados por um smartphone com sistema operacional Android. Como resultado, foi desenvolvido um aplicativo de celular capaz de controlar a estação total robotizada permitindo o controle de forma remota, demonstrando a potencialidade da integração Bluetooth entre smartphone/estação total.

3.1 INTRODUÇÃO

A coleta de dados em campo empregando métodos topográficos ou geodésicos envolve a utilização de equipamentos para a mensuração das grandezas de interesse, como direções horizontais, ângulos verticais e distâncias inclinadas. Tais grandezas podem ser mensuradas por meio de equipamentos, como a estação total que é um dos principais equipamentos utilizados nos trabalhos.

Os primeiros modelos comerciais de estações totais datam da década de 70. Inicialmente, tratavam-se de medidores de distâncias eletrônicos acoplados a um teodolito que, posteriormente, foram sintetizados em um único equipamento, o que veio a ser chamado de estação total (Petrie & Toth, 2018). Algumas décadas depois foram lançadas no mercado da geotecnologia estações totais com servo motores, os quais permitem a realização de movimentos de rotação do instrumento entorno do seu eixo principal e da luneta em relação ao eixo secundário (Levin, Nadolinets & Akhmedov, 2017). Além dessas, cabe destacar as estações totais que apresentam a capacidade de reconhecimento e pontaria automática de alvos, sendo denominadas de estações automáticas ou robotizadas (Carvajal & Veiga, 2019).

A coleta de dados geodésicos corresponde a uma estruturada sequência de passos lógicos e, como resultado, oferece um número determinado de observações para um ou vários fenômenos de caráter físico, os quais são processados e transformados em informação de interesse, normalmente coordenadas geodésicas. A evolução da coleta de dados ocorre simultaneamente aos avanços tecnológicos dos equipamentos de medição. Inicialmente, as observações eram registradas em papel, diminuindo a eficiência do processo e limitando a quantidade de dados coletados, contribuindo também para um aumento na probabilidade de ocorrências de erros grosseiros durante o processo de coleta. Na atualidade, as estações totais, receptores de sinais *Global Navigation Satellite System* (GNSS), níveis digitais e outros equipamentos de medição, têm a capacidade de coletar uma grande quantidade de dados em comparação aos dados coletados no passado em um mesmo intervalo de tempo. Esse é o resultado da própria evolução tecnológica que traz consigo o conceito de automação, que pode ser definido pelo fato de haver restrição da intervenção humana no processo da coleta de dados.

O desenvolvimento tecnológico com automação tem sido um dos principais focos no âmbito dos levantamentos geodésicos, uma vez que proporciona impactos significativos nas precisões dos dados coletados, diminuindo erros e aumentando a produtividade (Tedeschi, Faggion & Andolfato, 2017; Carvajal & Veiga, 2019). Tal progresso se deve à necessidade, por parte de diferentes áreas da ciência ou indústria, de empregar mais eficiência nos levantamentos de dados, resultando em agilidade, melhor precisão, por meio de sistemas de reconhecimento automático *Automatic Target Recognition* (ATR) ou codificadores angulares, e também diminuição dos riscos associados ao processo de coleta em campo pelos operadores (Medeiros, Faggion & Alves, 2020).

O avanço tecnológico permitiu a integração de aplicações computacionais nas técnicas de monitoramento geodésico, viabilizando a utilização de parâmetros de monitoramento de túneis, estradas, barragens e estruturas. Como resultado, toda a evolução tecnológica na área dos sensores geodésicos tem fornecido grande quantidade de dados, maior confiabilidade das informações adquiridas e eficiência no processo de obtenção de dados (Aguilar & Carvajal, 2014).

Nessa perspectiva, a possibilidade de desenvolvimentos de aplicativos e *softwares* proprietários ou livres para determinados tipos de equipamentos por meio de protocolos de comunicação tem sido absorvido pela indústria dos sensores

geodésicos. Esse conceito se traduz na possibilidade de que os usuários desenvolvam suas próprias aplicações para atingir objetivos específicos não padronizados nas soluções comerciais. A possibilidade de que os usuários possam realizar suas próprias rotinas para automatizar coleta de dados ou gerar informação em campo é possível mediante a abertura dos códigos-fonte de sensores geodésicos e de protocolos de comunicação, os quais permitem o controle de seus sensores.

Alguns exemplos que podem se tornar uma solução geral para um setor da indústria ou para as áreas da ciência mediante a automação de uma estação total são: aplicações para reconhecimento automático de prismas (Omidalizarandi et al., 2018), nivelamento trigonométrico com estações totais (Zou et al., 2017), monitoramento geodésico (Wilkins et al., 2003; Lutes, 2002; Engel & Schweimler, 2016; Jäger et al., 2018), monitoramento de vias férreas (Gikas & Daskalakis, 2008), monitoramento industrial (Setan & Idris, 2008) ou aplicações orientadas à ciência, como o sistema Qdaedalus de Hauk et al. (2017).

Atualmente, um dos pontos de destaque no que se refere à aplicação de automação de levantamentos com estação total é a integração de sensores, a qual visa a realização de observações de fenômenos físicos por mais de um sensor, sincronizando a coleta. Assim é possível associar acelerômetros a sensores geodésicos terrestres com uma estação total ou sensores contidos em outros instrumentos, como receptores GNSS, durante o monitoramento geodésico de uma estrutura ou também entre diferentes sensores geodésicos (Medeiros, Faggion & Alves, 2020). Esta última possibilidade também abre a porta para a integração experimental mediante sensores de baixo custo, como apresentado em Carvajal & Veiga (2019) que desenvolveram uma rede de sensores de temperatura com microcontroladores arduínos para o cálculo da primeira correção de velocidade no monitoramento de parâmetros ambientais, integrando nas observações de distâncias obtidas com o medidor eletrônico de uma estação total.

Uma das características das estações totais modernas é a capacidade de realização do controle e operação de forma remota, seja por controles remotos dedicados ou através de algum tipo de interface. Ao serem considerados os instrumentos de medida com alta precisão e sensibilidade, é fundamental idealizar a sua operação remota, uma vez que a diminuição do contato direto durante a operação dos instrumentos minimizaria possíveis fontes de erros.

Destaca-se também que a movimentação do usuário no entorno do instrumento pode provocar vibrações não desejadas no conjunto tripé/estação. Assim, pensar em operar uma estação total de forma remota não é meramente uma comodidade, mas sim uma forma de melhorar a qualidade do trabalho e, conseqüentemente, da precisão obtida.

Outra vantagem da operação remota é que nos levantamentos geodésicos de alta precisão as medições de temperatura, umidade e pressão atmosférica são necessárias quando a medição de distância é realizada pelos Medidores Eletrônicos de Distância (MED), sendo que um operador próximo ao instrumento pode criar um microclima que interfere nas medidas desses valores. Esse procedimento se faz necessário porque a distância calculada pelos MED é determinada a partir do conhecimento da velocidade de propagação da luz no vácuo. Contudo, nos levantamentos geodésicos de alta precisão, é necessário considerar o valor da velocidade da propagação da luz no ambiente onde está sendo realizada a medição. Para mais detalhes sobre medidores eletrônicos de distância, recomenda-se consultar Jerke (2019).

No âmbito dos sensores geodésicos e do avanço da tecnologia móvel, pode-se destacar a sua implementação e constante melhoria em smartphones. Um dos pontos explorados atualmente condiz ao uso de receptores GNSS (Uradziński & Bakula, 2020) e dos sensores imageadores, aplicando-se técnicas como o *Structure from Motion* para extração de modelos tridimensionais visando o cálculo de volume (Wróśyński et al., 2017) ou a reconstrução 3D de objetos de interesse geomorfológico (Dabove, Grasso & Piras, 2019), e há ainda a detecção de deslocamentos de superfície (Alves et al., 2020). A presença de diversos sensores possibilita, ainda, a sua combinação para sincronização de dados e modelagem de informações a partir dos smartphones (Fissore et al., 2018).

Nesse sentido, este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um aplicativo para o controle de uma estação total, bem como apresentar os conceitos e métodos envolvidos no processo de comunicação entre equipamentos de levantamentos geodésicos. A plataforma *MIT App Inventor* foi utilizada para o desenvolvimento do aplicativo de controle em sistema operacional Android. O protocolo GeoCOM da empresa *Leica Geosystems* foi utilizado para a comunicação com a estação total, a partir do envio de códigos e recepção de dados coletados via interface de comunicação no smartphone com conexão Bluetooth.

3.2 METODOLOGIA

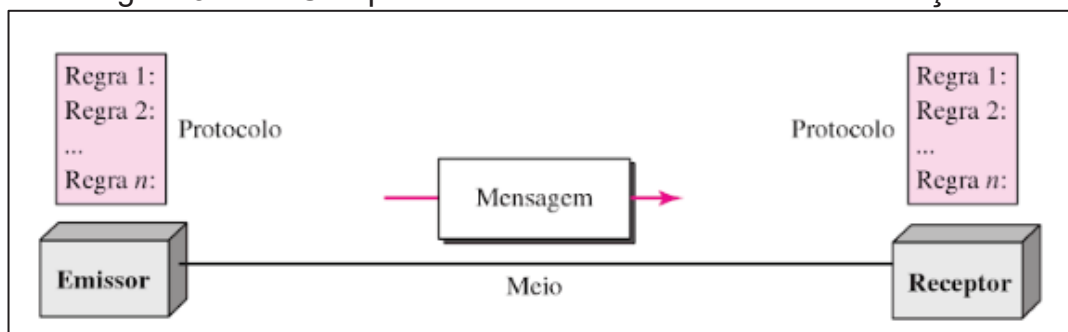
O desenvolvimento da interface para controle da estação total, usando smartphone, envolveu o conhecimento do protocolo de comunicação disponível pelo fabricante do instrumento e a escolha do sistema operacional no qual se desenvolveu o aplicativo. Neste trabalho foram utilizados o sistema operacional Android e o protocolo GeoCOM a fim de estabelecer comunicação com a estação total Leica TS15.

Cabe ressaltar que foram consideradas as características correspondentes aos smartphones utilizados para o desenvolvimento do *designer* da interface de comunicação, como a dimensão da tela, dispositivos de entrada, sensores de comunicação e memória. Considerou-se também a usabilidade do aplicativo nas funções implementadas, uma vez que aplicativos de celular devem estar focados nas soluções de problemas para usuários.

3.2.1 Processo de Comunicação

A comunicação consiste na troca ou compartilhamento de informações, através de meios materiais ou não, com o objetivo de realizar a transmissão de dados entre dois ou mais indivíduos e/ou dispositivos (Forouzan, 2010), conforme ilustrado na Figura 3.2.1.

Figura 3.2.1 – Componentes de um sistema de comunicação.



Fonte: Forouzan (2010).

Segundo Forouzan (2010), a comunicação de dados entre dispositivos necessita da associação de *software* e *hardware*, sendo composto por cinco elementos chaves:

“Mensagem: (...) informações (dados) a serem transmitidas. Entre as formas populares de informação, temos: texto, números, figuras, áudio e vídeo;

Emissor: (...) dispositivo que envia a mensagem de dados. Pode ser um computador, estação de trabalho, aparelho telefônico, televisão e assim por diante;

Receptor: (...) dispositivo que recebe a mensagem de dados. Pode ser um computador, estação de trabalho, aparelho telefônico, televisão e assim por diante;

Meio de transmissão: (...) caminho físico pelo qual uma mensagem trafega do emissor ao receptor. Alguns exemplos de meio de transmissão são os seguintes: cabo de par trançado, cabo coaxial, cabo de fibra óptica e ondas de rádio.

Protocolo: (...) conjunto de regras que controla a comunicação de dados. Representa um acordo entre os dispositivos de comunicação. Sem um protocolo, dois dispositivos podem estar conectados, mas, sem se comunicar (...)” (Forouzan, 2010)

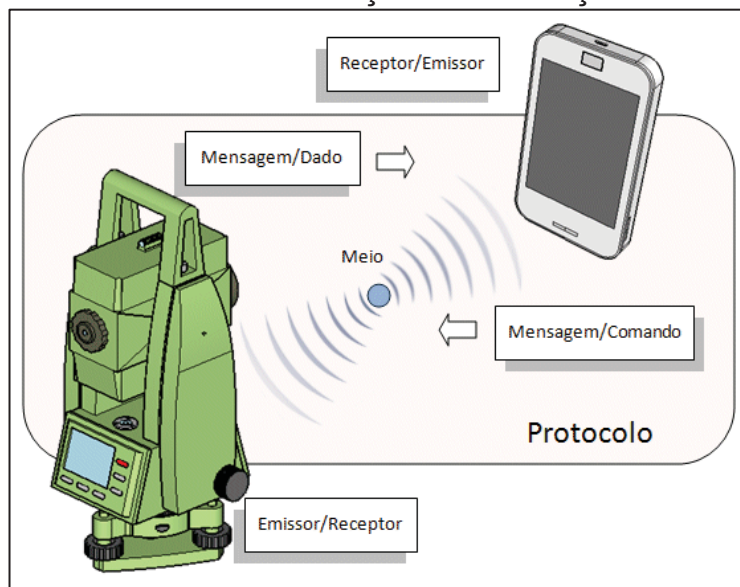
Dentre os meios de comunicação utilizados atualmente, explora-se a conexão de dispositivos por meio da tecnologia Bluetooth, presente em grande parte dos dispositivos eletrônicos. A troca de informações utilizando Bluetooth ocorre por meio da faixa de frequência de 2.4 GHz, definida como *piconet*, podendo chegar a um alcance de conexão de 100m, dependendo do desempenho (Loureiro et al., 2003). Durante a comunicação, os dispositivos trabalham em uma forma estabelecida como mestre-escravo, sendo o mestre aquele que inicia a conexão, limitando-se em até 7 escravos por mestre (Loureiro et al., 2003).

A presença desses dispositivos em smartphones, aliados à possibilidade de desenvolvimentos de aplicativos que viabilizam a exploração de tal tecnologia, permite o estabelecimento de comunicação e/ou controle de equipamentos e outros dispositivos, dispensando o contato físico direto.

A conexão entre smartphones e estações totais pode ser feita via cabo, link de rádio ou Bluetooth, no modo *request/response* (pergunta e resposta), nos dois sentidos, em que ambos são emissores e receptores e que a cada pergunta

realizada pelo smartphone, uma resposta é enviada pela estação. O Bluetooth foi o meio de comunicação escolhido para realizar a troca de mensagens entre os dispositivos abordados nesta pesquisa. A comunicação, nesse caso, também é parametrizada através de um protocolo que permitirá o envio das informações e sua decodificação (Figura 3.2.2).

Figura 3.2.2 – Sistema de comunicação entre estação total e smartphone.



Fonte: Jerke et al. (2022).

Para que a comunicação ocorra, é necessário inicialmente criar um programa que possa gerar as perguntas e entender as respostas da estação total no formato estabelecido pelo protocolo. Desenvolver um programa desse tipo, para dispositivos móveis, requer a criação de um aplicativo, que gerenciará o processo de comunicação. Diversas linguagens de programação podem ser utilizadas, como o Python, por exemplo. Existem também as plataformas *web open-source* que permitem o desenvolvimento de programas aplicativos para o sistema operacional Android. A empresa Google Inc, em parceria com *Massachusetts Institute of Technology*, disponibilizou uma plataforma gratuita, denominada de *MIT App Inventor*, que visa o desenvolvimento de aplicativos para Smartphone, com sistema operacional Android, por meio da programação orientada a design de aplicativos, permitindo a exploração de suas funcionalidade e dispositivos como GNSS, acelerômetro, conexões Web e Bluetooth (Finiloza et al., 2014).

Diversas pesquisas sobre a utilização aplicada de tecnologias móveis vêm sendo difundidas atualmente, dentre elas o aplicativo de smartphone desenvolvido para o projeto geométrico de estradas que realiza o cálculo de todos os elementos das curvas, como por exemplo: rotina, cálculo de curvas simples, cálculo de curvas com transição espiral, estaqueamento de curvas simples e estaqueamento de curvas com transição (Oliveira & Vaz, 2016).

Outro exemplo é o Calc-Geo, aplicativo com processamento em tempo real para levantamento topográfico em área de produção cafeeira. Testes realizados nessas áreas mostraram que a sua utilização pode proporcionar ao cafeicultor um erro inferior a 1% na definição da quantidade de pés de café que ele deve adquirir/comprar para uma determinada área de plantio (Silveira et al., 2017). Por fim, Mlenek et al. (2017) desenvolveram um aplicativo na plataforma Android Studio visando o monitoramento dinâmico de estruturas através de sensores inteligentes.

3.2.2 Protocolo de Comunicação

Nos últimos anos tem-se registrado o surgimento de diversas marcas de instrumentos topográficos/geodésicos, cada uma com os seus próprios protocolos de comunicação. No entanto, neste artigo optou-se por escolher o protocolo de comunicação da empresa *Leica-Geosystems*, denominado GeoCOM, para uma breve exemplificação e utilização na operação remota de equipamentos devido a disponibilidade da estação total TS15 para esta pesquisa. A TS15 possui precisão angular de 1", precisão linear de $\pm (1\text{mm} + 1,5 \text{ ppm})$, e ATR capaz de localizar e rastrear prismas, durante o levantamento realizado, com precisão de 0,3 miligrados (mgon) (Leica, 2015; Medeiros, 2020).

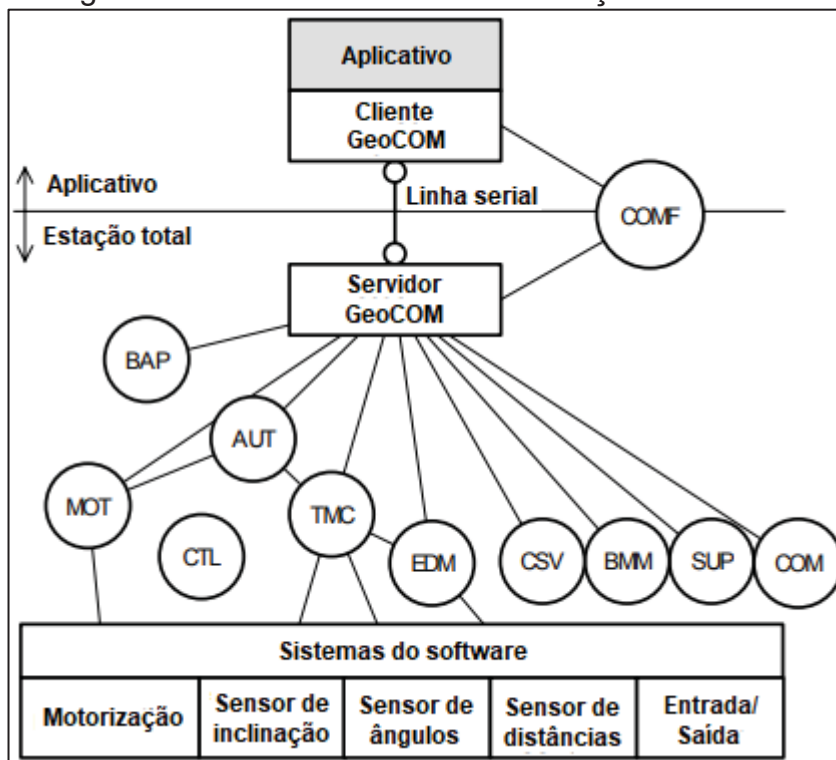
3.2.2.1 Protocolo GeoCOM

De acordo com Leica (2006), com esse protocolo é possível escrever aplicações baseadas no MS-Windows e/ou para qualquer outra plataforma que suporta comunicações baseadas em ASCII. A empresa possui um conjunto de instrumentos que fazem parte da família de *softwares* TPS1000, TPS1100 e TPS1200. O sistema TPS organiza e controla a atuação interna de vários elementos de sensores e dá acesso a uma série de funções. Em Leica (2006) é possível ter

acesso a todas as funções que podem ser manipuladas e controladas pelo Cliente GeoCOM, um pacote de *software* desenvolvido por Microsoft Visual Basic e VBA.

A comunicação ocorre entre um cliente e um servidor e é realizada por linhas serial de comunicação. A arquitetura de comunicação entre o dispositivo requerente e o equipamento Leica pode ser visto na Figura 3.2.3.

Figura 3.2.3 – Estrutura de comunicação GeoCOM.



Fonte: Adaptado de Leica (2006).

Os círculos representam as funções, as quais são organizadas em subsistemas (Leica, 2006):

- AUT – Automação: Esse módulo possui funções que controlam, por exemplo, o reconhecimento automático de alvos, função mudança de face ou função de posição;
- BMM – *Basic Man Machine*: São funções de comunicações básicas como, por exemplo, configurar horário, alarme ou coisas relacionadas;
- COM – Comunicação: Esse módulo trabalha com parâmetros de comunicações básicos, a maior parte dessas funções são relacionadas tanto a parte de cliente quanto de servidor;

- CSV – Serviços Centrais: Esse módulo possui funções para adquirir ou configurar informações centrais/básicas sobre o instrumento TPS1200;
- CTL – Tarefa de controle: Esse módulo contém funções do sistema de tarefas de controle;
- EDM – Medidor de distância eletrônica: Esse módulo oferece uma série de funções que medem distâncias;
- MOT – Motorização: Módulo responsável pelo controle de movimentação e velocidade de movimentação do equipamento;
- TMC – Medições do teodolito e cálculo: É o módulo central para coleta de dados de medição.

Os comandos utilizando o GeoCOM se iniciam com o conjunto de caracteres "%R1Q," seguido de um número de identificação do comando, como por exemplo o número 17017 para medir distância e ângulo. Para todo comando, uma resposta ASCII é enviada pelo instrumento, que por sua vez se inicia com "%R1P" seguido de códigos de retorno e parâmetros que dependem do requerimento ASCII enviado. Na Tabela 3.2.1 são apresentados exemplos de sintaxes de envio de funções para recebimento de informações.

Tabela 3.2.1 – Exemplo de sintaxes de algumas funções

Função	Comando GeoCOM	Solicitação ASCII	Resposta ASCII
Número Serial	CSV_GetInstrumentNo	%R1Q,5003:	%R1P,0,0:0,SerialNo
Tipo do instrumento	CSV_GetInstrumentName	%R1Q,5004:	%R1P,0,0:0,Name
Data/hora	CSV_GetDateTime	%R1Q,5008:	%R1P,0,0:0,Data, Hour, Minute, Second
Ângulo horizontal	BAP_MeasDistAngle	%R1Q,17017:2	%R1P,0,0:0,dHz, dV, dDist, DistMode
Ângulo vertical	BAP_MeasDistAngle	%R1Q,17017:2	%R1P,0,0:0, dHz, dV, dDist, DistMode
Distância inclinada	BAP_MeasDistAngle	%R1Q,17017:2	%R1P,0,0:0, dHz, dV, dDist, DistMode
PPM/mm	TMC_GetSlopeDistCorr	%R1Q,2126:	%R1P,0,0:0, totalPpm, PrismCorr
Constante do Prisma	TMC_GetPrismCorr	%R1Q,2023:	%R1P,0,0:0, PrismCorr

Fonte: Jerke et al. (2022).

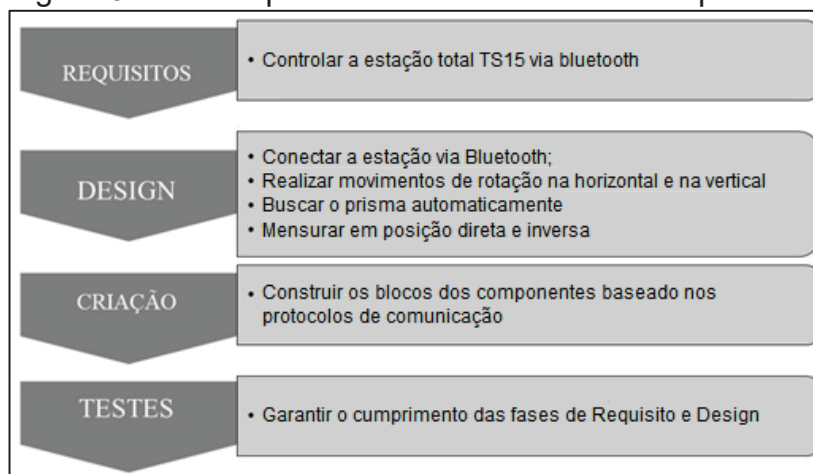
3.2.3 Desenvolvimento do aplicativo

Dentro do campo de desenvolvimento de *softwares* e aplicativos existem diferentes modelos que viabilizam a organização inicial para a elaboração de uma determinada aplicação. Nesse quesito, decidiu-se adotar o Modelo Sequencial Linear, definido também como Modelo Cascata, para a elaboração das etapas da criação do aplicativo, de forma bem definida. Conforme Gomes e Melo (2014), a utilização do *App Inventor* para o desenvolvimento de aplicativos não exclui a necessidade de um processo de design mínimo, com a finalidade de servir como um norteador do projeto.

Para a elaboração do aplicativo, o MIT *App Inventor* fornece dois ambientes de trabalho: o *App Inventor Designer* e o *Block Editor*. Cada espaço de trabalho apresenta uma funcionalidade distinta para a criação. O primeiro fornece recursos para a construção das interfaces que se pretende disponibilizar ao usuário do aplicativo, como botões, janelas, imagens, entre outros elementos característicos de interfaces, além da vinculação de funções presentes no celular, como as de acesso aos dados do acelerômetro e Bluetooth. O segundo ambiente da plataforma visa o desenvolvimento dos itens criados na primeira etapa, a fim de orientar os respectivos procedimentos por meio da arquitetura de conexão de blocos, gerando as instruções e eventos de interações com o celular (Finiloza et al. 2014).

A partir disso, foram definidas quatro etapas para o desenvolvimento do aplicativo, exemplificadas na Figura 3.2.4.

Figura 3.2.4 – Etapas de desenvolvimento do aplicativo.

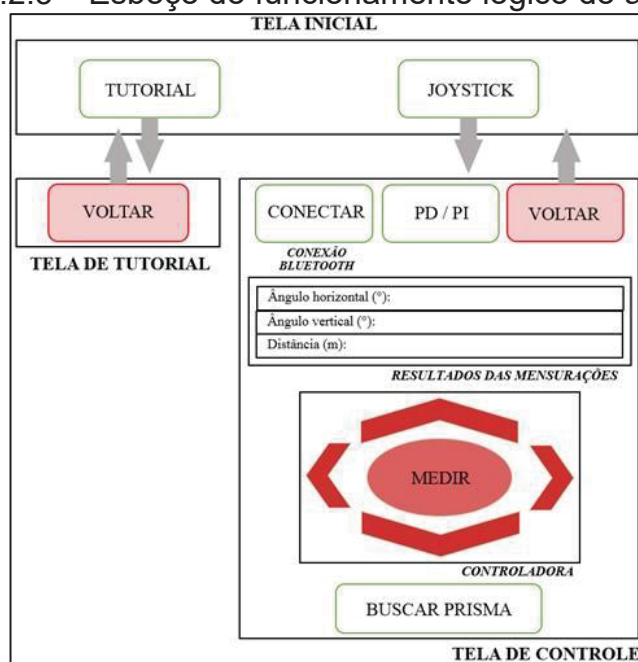


Fonte: Jerke et al. (2022).

A primeira etapa envolveu o requisito inicial, na qual foi definido o meio de comunicação para controle da estação total. Visando explorar o controle sem fio e os sensores disponíveis nos smartphones, optou-se pela utilização da comunicação via Bluetooth. Entretanto, cabe ressaltar que optar pela tecnologia Bluetooth impõe a restrição relacionada às distâncias entre os dois dispositivos.

O design do aplicativo foi estabelecido após a definição das ações a serem executadas pela estação total do aplicativo no smartphone. Além da função de ativar/desativar a conexão remota via Bluetooth, foram implementadas a função de movimento (giro) em relação aos eixos horizontal e vertical, a função de buscar prisma para localização automática do prisma e a medição dos ângulos e distâncias em Pontaria Direta (PD) e Pontaria Inversa (PI). Na Figura 3.5 é apresentado o esboço do aplicativo, no qual três telas principais foram projetadas.

Figura 3.2.5 – Esboço do funcionamento lógico do aplicativo.



Fonte: Jerke et al. (2022).

A primeira tela é a de abertura do aplicativo, denominada de Tela inicial, que apresenta informações gerais sobre o programa. Na segunda tela, nomeada Tela de Tutorial, são apresentadas as funcionalidades do aplicativo. A terceira, Tela de Controle, contém as interfaces com o usuário para o controle e medição com o instrumento.

Destaca-se que, apesar da implementação da função conexão com a estação total dentro do aplicativo, há a necessidade da ativação do sensor Bluetooth do smartphone e da estação total antes de se estabelecer a comunicação.

A comunicação entre smartphone e estação total foi implementada com o botão Conexão do aplicativo. Ao ativá-lo, a tela Conexão abre e nela são listados os dispositivos próximos com o Bluetooth ativo. Para estabelecer a comunicação, deve-se selecionar o dispositivo referente à estação total e digitar a senha de conexão definida, se houver.

O controle do movimento do instrumento foi implantado considerando os três tipos de rotação:

- a) giro na horizontal do equipamento, que pode ser realizado através das setas a direita e esquerda no esquema de *joystick*.
- b) giro na luneta no sentido do zênite e do nadir, também com o *joystick*.
- c) tombamento da luneta (posições direta e inversa) através do botão específico.

Para a realização da leitura da direção horizontal, ângulo zenital e distância inclinada foi projetado no centro do *joystick* um botão. Os dados enviados pela estação ao smartphone são apresentados no campo logo acima das teclas de movimentação.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O experimento resultou em um aplicativo para celulares Android capaz de controlar, de maneira remota, a estação total robotizada Leica TS15. Salienta-se que, por se tratar de um aplicativo em versão de testes, uma quantidade reduzida de funções foi inserida. No entanto, a abundância de protocolos presentes no instrumento e ampla possibilidade de desenvolvimento no *App Inventor* contribui para que versões futuras do aplicativo possam ser criadas contendo uma gama maior de funções.

3.3.1 Resultados

A Figura 3.3.1 apresenta as interfaces criadas para o aplicativo que recebeu o nome de TS15 *Operator* e possui telas de comando que permitem a interação com o operador.

Figura 3.3.1 – Telas do TS15 Operator.



Fonte: Jerke et al. (2022).

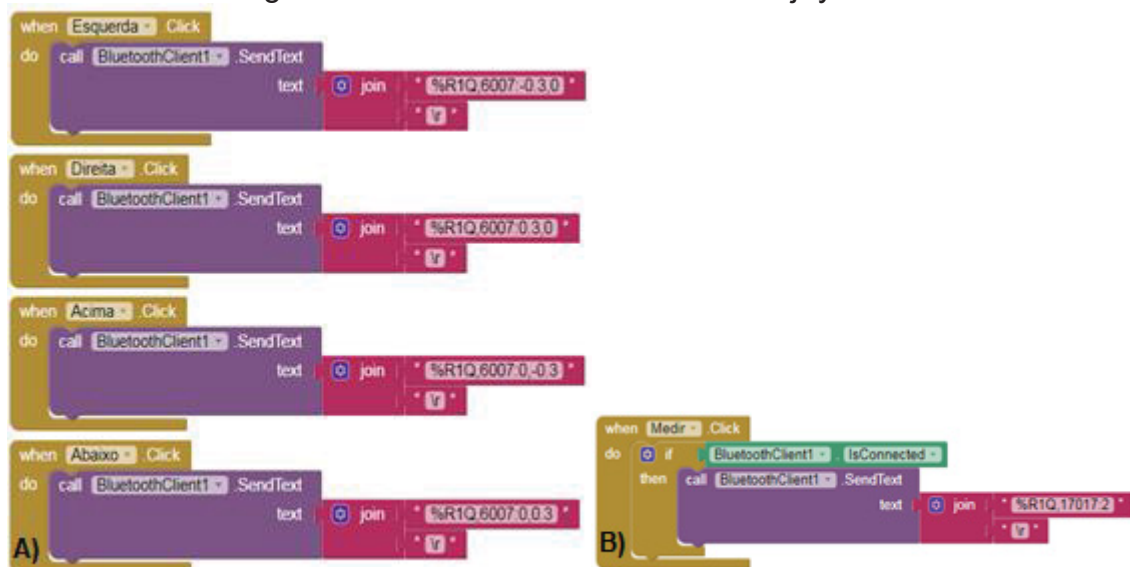
A Figura 3.3.1-A mostra a tela inicial do aplicativo, a partir da qual o operador tem a opção de clicar em “TUTORIAL” se desejar ver as instruções para conhecer o aplicativo, ou a opção de clicar em “JOYSTICK” se desejar controlar a Estação TS15.

A Figura 3.3.1-B mostra a tela do tutorial, na qual o operador pode ler as informações e instruções de uso do aplicativo.

A Figura 3.3.1-C mostra a tela do *joystick*, etapa em que o operador deve primeiro estabelecer a comunicação via Bluetooth clicando em “CONECTAR” e depois selecionar o dispositivo da estação total. Depois de estabelecida a comunicação, o operador pode operar a TS15 livremente através dos botões disponíveis nessa tela, sendo que ao clicar em “PROCURAR PRISMAS” a estação total executa a função de busca automática dos prismas e ao clicar em “MEDIR” aparecem os valores de ângulo horizontal, ângulo vertical e distância inclinada medidos pela TS15.

Na Figura 3.3.2, apresentam-se alguns dos blocos elaborados para execução das funções de controle desejadas no *Block Editor*, desenvolvidos posteriormente ao design das interfaces a partir dos protocolos de comunicação fornecidos pela empresa *Leica GeoSystems*.

Figura 3.3.2 – Blocos de comando do joystick.



Fonte: Jerke et al. (2022).

Um exemplo das funções é mostrada na Figura 3.3.2-B, que mostra o bloco de comando do botão “MEDIR”. Esse bloco executa a seguinte função: quando o botão “MEDIR” é clicado, o smartphone enviará via Bluetooth o código “%R1Q,17017:2” para a estação total que, por sua vez, ao receber o código, realiza a medição e retorna ao smartphone os valores de ângulo horizontal, ângulo vertical e distância inclinada nos espaços indicados da Figura 3.3.1-C.

3.3.2 Discussão

O aplicativo foi desenvolvido seguindo padrões de usabilidade que resultam em uma interação simples entre usuário e estação total. O uso desses padrões visa principalmente favorecer a intuitividade, a fim de facilitar a compreensão e operação do equipamento, pois para muitos usuários a operação de uma estação total não é tão compreensível quanto um aplicativo de celular e isso pode ser verificado com jovens alunos que não possuem tanta familiaridade com a interface da estação total,

mas ao operar pelo aplicativo não apresentaram dificuldades devido a intuitividade da aplicação desenvolvida.

A possibilidade de operação remota de uma estação total em vez da operação direta na interface da estação traz inúmeros benefícios para a automação do levantamento geodésico. Um desses benefícios é a minimização da influência do operador no instrumento, evitando a transmissão de vibrações ao conjunto tripé/estação e reduz a possibilidade de movimentações involuntárias devido a choques com o tripé/instrumento ao realizar medições. Outro benefício é a atenuação dos efeitos da variação de temperatura próxima ao instrumento devido à presença humana, pois em levantamentos de alta precisão a medição de temperatura é um fator importante e a presença humana no equipamento pode afetar a medida destes valores.

Além desses benefícios, uma característica importante dessa ferramenta é a possibilidade da criação de aplicativos voltados às necessidades específicas do usuário, principalmente quando houver repetibilidade de levantamentos como, por exemplo, no monitoramento de estruturas, pois a partir do aplicativo o usuário pode realizar algumas adaptações para que os valores aproximados de ângulos horizontais e verticais de determinados pontos fiquem salvos na memória e que, ao realizar medições, o aplicativo já possa controlar a estação para fazer a leitura desses pontos.

Outro ponto a ser observado com a utilização da aplicação desenvolvida é a eliminação da etapa de transferência de dados do levantamento. Quando se utiliza a operação direta na interface da estação, para trabalhar-se com os valores levantados é necessário a transferência de dados para o dispositivo que se deseja processar. Já na operação pelo aplicativo, a transferência dos valores levantados é feita automaticamente durante o levantamento, visto que os dados já estão inseridos no smartphone e podem ser aplicados no processamento do levantamento.

Por fim, o aplicativo desenvolvido mostrou-se funcional, permitindo o controle de forma remota da estação total robotizada, o que demonstra tanto a potencialidade da integração Bluetooth entre smartphone/estação total como a simplificada operacionalidade da plataforma do MIT.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O entendimento dos princípios de comunicação, transmissão de dados e funcionamento das estações totais fornecem o subsídio necessário para o desenvolvimento do aplicativo, sendo uma etapa fundamental no processo de automação dos levantamentos geodésicos.

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver e experimentar um aplicativo que permitisse o controle e a operação remota de estações totais robotizadas. Como premissa de funcionamento, esse aplicativo deveria ser capaz de estabelecer a comunicação com o instrumento de medição, através do protocolo de comunicação estabelecido pelo fabricante do equipamento, comandar a movimentação do instrumento e executar a medição de um sistema de pontaria composto basicamente por um prisma refletivo.

Dessa forma, conclui-se que a criação de aplicativos para controlar equipamentos geodésicos, como estações totais robotizadas, contribui para a intuitividade de operação do usuário e para redução da influência do observador durante o processo de levantamento, fazendo com que o trabalho seja mais seguro e o risco de movimentação do conjunto tripé/estação seja reduzido.

Como a presente pesquisa foi elaborada tendo em vista a automação de levantamentos geodésicos, o aplicativo foi desenvolvido pensando-se nesse tema, porém sua função não se limita apenas a isso, podendo ser alterado ou adaptado para diversos fins. Esse tipo de metodologia de trabalho tem uma gama interessante de aplicações, pois sempre que houver repetibilidade de tarefas, torna-se interessante o uso de aplicativos que operam remotamente.

Salienta-se que as potencialidades levantadas nesta pesquisa contribuíram para o desenvolvimento de uma tese de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, que dará continuidade ao desenvolvimento de uma aplicação que automatiza a coleta e o processamento dos dados no monitoramento geodésico de estruturas, onde a repetibilidade de levantamentos se faz presente.

Recomenda-se também que, em trabalhos futuros, sejam inseridas as diversas funcionalidades que compõem o processo de levantamento geodésico, para que este estudo possa ser utilizado em diversos tipos de levantamentos ou até mesmo em outros instrumentos geodésicos, como receptores GNSS, laser scanner

terrestres, etc. Outra recomendação é que esta integração seja difundida também para os outros protocolos de comunicação existentes em outras empresas do ramo, como a Topcon, Trimble, etc.

REFERÊNCIAS

- AGUILAR, C. A. A.; CARVAJAL, F. A. R. **Validación de sistema de punteria automática en levantamientos topográficos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Cartográfica). Universidad de Santiago de Chile, Santiago, 2014.
- ALVES, S. S. O.; CARVAJAL, R. F. A.; SAMPAIO, L. F.; MEDEIROS, L. I. B.; VEIGA, L. A. K. Avaliação laboratorial da parametrização de dados LST em superfícies planas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, n. 3, 384-398, 2020.
- CARVAJAL, R. F. A.; VEIGA, L. A. K. Desenvolvimento de interface para automação da coleta de temperatura baseada em redes multiestação aplicada ao monitoramento de estruturas empregando Estações Totais. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 3, 781-805, 2019.
- DABOVE, P.; GRASSO, N.; PIRAS, M. Smartphone-Based Photogrammetry for the 3D Modeling of a Geomorphological Structure. **Applied Sciences**, v. 18, n. 9, 3884-1904, 2019.
- ENGEL, P.; SCHWEIMLER, B. **Open Source Software development in Geodesy**. In Neubrandenburg University of Applied Sciences. Disponível em: https://www.fig.net/resources/proceedings/2016/2016_03_jisdms/pdf/reviewed/JISDM_2016_submission_58.pdf. Acesso em: 13/05/2022.
- FINIZOLA, A. B.; RAPOSO, E. H. S.; PEREIRA M. B. P. N.; GOMES, W. S. ARAÚJO A. L. S. O.; SOUZA F. V. C. O ensino de programação para dispositivos móveis utilizando o MIT-App Inventor com alunos do ensino médio. **Anais do Workshop de Informática na Escola**, 337, 2014.
- FISSORE, F.; MASIERO, A.; PIRAGNOLO, M.; PIROTTI, F.; GUARNIERI, A.; VETTORE, A. Towards Surveying with a Smartphone. In: CEFALO, R., ZIELIŃSKI, J., BARBARELLA, M. (eds). **New Advanced GNSS and 3D Spatial Techniques**. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer, Cham, 2018. p. 167-176.
- FOROUZAN, B. A. **Comunicação de dados e redes de computadores**. São Paulo, Editora AMGH, 2010. 4p.
- GIKAS, V.; DASKALAKIS, S. Determining Rail Track Axis Geometry Using Satellite and Terrestrial Geodetic Data. **Survey Review**, v. 310, n. 40, 392-405, 2008.
- HAUK, M.; KIRT, C.; ACKERMANN, C. Experiences with the Qdaedalus system for astrogeodetic determination of deflections of the vertical. **Survey Review**, v. 355, n. 49, 294-301, 2017.
- JÄGER, R.; SPOHN, P; **GOCA**. In Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft. Disponível em: http://goca.info/index_e.html. Acesso em: 21/11/2018.
- JERKE, A. **Análise do monitoramento geodésico da barragem da usina hidrelétrica Mauá com equipamentos de diferentes precisões e diferentes**

softwares de processamento. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2019.

JERKE, A.; RODRIGUEZ, F. A. C.; MEDEIROS, L. I. B. de; SAMPAIO, L. F.; ALVES, S. de 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, v. 8, n. 2, p. 102–113, 2022.

LEICA. Leica Geosystems. **Leica TPS1200-GeoCOM Getting Started Manual.** Suíça, 2006.

LEICA. Leica Geosystems. **TS15 User Manual.** Suíça, 2015.

LEVIN, E.; NADOLINETS, N.; AKHMEDOV, D. **Surveying Instruments and Technology.** New York, USA: Taylor & Francis Group, 2017. 82p.

LOUREIRO, A. A. F.; NOGUEIRA, J. M. S.; RUIZ, L. B.; MINI, D. A. DE F.; NAKAMURA, E. F.; FIGUEIREDO, C. M. S. Redes de Sensores Sem Fio. **Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores**, 179-226, 2003.

LUTES, A. J. **Automated dam displacement monitoring using a robotic total station.** 138f. Master thesis. Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton-Canada, 2002.

MEDEIROS, L. I. B. **Monitoramento dinâmico de estruturas por diferentes técnicas geodésicas simultaneamente: estudo de caso de um ponto da passarela Politécnico Botânico da UFPR.** Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2020.

MEDEIROS, L. I. B.; FAGGION, P. L.; ALVES, S. S. O. Análise do Desempenho de ETR no Monitoramento Dinâmico de Estrutura Metálica por Leitura Contínua de Direções. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, n. 2, 280-293, 2020.

MLENEK, D. C.; VEIGA, L. A. K.; PALAZZO, D. R.; SILVA L. F. Monitoramento dinâmico de estruturas: Estudo comparativo entre técnicas. **Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Exposicarta**, 14-18, 2017.

OLIVEIRA, D. P.; VAZ, L. R. Desenvolvimento de aplicativo para smartphone destinado ao projeto geométrico de estradas. **VI Encontro de Iniciação à Docência – Universidade do Vale do Paraíba**, 1-6, 2016.

OMIDALIZARANDI, M.; PAFFENHOLZ, J. A.; NEUMANN, I. Automatic and accurate passive target centroid detection for applications in engineering geodesy. **Survey Review**, v. 4, n. 9, 1-16, 2018.

PETRIE, G.; TOTH, C. K. **Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing.** Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2018.

SETAN, H.; IDRIS, K. M. Automation in Data Capture and Analysis for Industrial/Deformation Surveying Using Robotic Total Station. **Integrating Generations FIG Working Week**, 2008.

SILVEIRA, P. D. N.; MENDES, V. F.; FERRARI, J. L. Aplicativo com processamento em tempo real para levantamento topográfico testado em área de produção cafeeira. **Coffee Science**, v. 12, n. 3, 297-306, 2017.

TEDESCHI, A. L.; FAGGION, P. L.; ANDOLFATO, S. H. D. Validação do sistema de automação de nível digital aplicado na determinação de recalques. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 2, 352-370, 2017.

URADZIŃSKI, M.; BAKULA, M. Assessment of Static Positioning Accuracy Using Low-Cost Smartphone GPS Devices for Geodetic Survey Points' Determination and Monitoring. **Applied Sciences**, v. 10, n. 15, 5308-5330, 2020.

WILKINS, R.; BASTIN, G.; CHRZANOWSKI A. Alert: a fully automated real time monitoring system. **11th FIG Symposium on Deformation Measurements**, 2003.

WRÓŚYŃSKI, R.; PYSZNY, K.; SOJKA, M.; PRZYBYŁA, C.; MURAT-BŁAŚJEWSKA, S. Ground volume assessment using 'Structure from Motion' photogrammetry with a smartphone and a compact camera. **Open Geosciences**, v. 9, n. 1, 281-294, 2017.

ZOU, J.; ZHU, Y.; XU, Y. Mobile precise trigonometric levelling system based on land vehicle: an alternative method for precise levelling. **Survey Review**, v. 355, n. 49, 249-258, 2017.

4 PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA AUTOMAÇÃO DO MONITORAMENTO GEODÉSICO DE ESTRUTURAS POR MEIO DE SOFTWARE LIVRE

O monitoramento geodésico é uma ferramenta de análise do comportamento geométrico da estrutura ao longo do tempo e indica se há possíveis deslocamentos na mesma, fornecendo informações aos responsáveis que auxiliam na tomada de decisões sobre a necessidade de intervenções. Com a automação do monitoramento geodésico, a ocorrência de erros nos levantamentos é minimizada e é possível a rápida identificação dos mesmos, dando maior segurança no estudo da avaliação da estrutura. Atualmente, existem ferramentas usadas no monitoramento disponibilizado por empresas que atuam na área da geoinformação. Porém, estas soluções são projetadas como aplicativos isolados ofertados comercialmente com código fechado. O tema desta pesquisa é propor uma metodologia para a automação do levantamento por irradiação no monitoramento geodésico de estruturas por meio do desenvolvimento de um sistema, inédito no Brasil e que será disponibilizado gratuitamente, nomeado de MGEO, para controlar estações totais robotizadas durante a coleta dos dados, processamento e cálculo das coordenadas dos pontos. Para atingir tal objetivo foi desenvolvido também um dispositivo que realiza a medição de temperatura e pressão atmosférica no local e envia esses dados em tempo real para o sistema realizar a correção das distâncias medidas pelo instrumento. Os resultados obtidos, com o processamento dos dados coletados durante o monitoramento, mostram o valor das coordenadas dos pontos de monitoramento em campo. Caso seja de interesse avaliar o comportamento da estrutura ao longo do tempo, o sistema disponibiliza uma ferramenta que compara diversas campanhas realizadas em períodos diferentes, disponibilizando à sociedade um sistema que automatiza o levantamento do monitoramento geodésico de estruturas. Verificou-se também que os resultados encontrados pelo MGEO são estatisticamente iguais aos resultados encontrados com o *software* já consolidado no meio comercial utilizado, dentro de um nível de confiança de 95%.

4.1 INTRODUÇÃO

Segundo o U.S. Army Corps of Engineers (1994) os levantamentos geodésicos terrestres exigem trabalho intensivo e requerem observações ágeis. Com o desenvolvimento tecnológico é possível utilizar alguns modelos de equipamento digitais que melhoram a precisão das observações e minimizam a influência do observador, tornando este tipo de levantamento mais ágil, pois melhora o rendimento em campo e facilita a operação do instrumental utilizado.

A automação das medições de deslocamento por meio de sistemas computacionais começou na década de 80, onde os primeiros esforços foram feitos em relação ao controle remoto de sensores geodésicos e geotécnicos, usando computadores pessoais e modems analógicos. Desde então, sistemas de *software* e

hardware para monitoramento de deformação vem sendo desenvolvidos e aprimorados em universidades e corporações (Zhimin, 2000; Nadal, 2008; da Cruz, 2015; Engel & Schweimler, 2016; Jerke, 2019).

Nos Estados Unidos, Lutes (2002) implementa um sistema de monitoramento de deslocamento geodésico, denominado de DIMONS, baseado em estações totais robóticas para o reservatório de Diamond Valley Lake, na Califórnia do Sul. O tamanho do projeto e a frequência de monitoramento exigida tornaram necessário incorporar o máximo de automação possível; os requisitos de precisão, por outro lado, exigiam um rigor geodésico não disponível usando *software* comercial. Os dados coletados e os resultados encontrados indicaram que este sistema automatizado foi um sucesso para o trabalho designado, embora etapas para aprimorar o efeito das correções atmosféricas fossem necessárias.

No Canadá, Gairns (2008) desenvolve uma metodologia e sistema de *software* para realizar o monitoramento de deslocamentos semi-automatizado de tanques de armazenamento de óleo. O sistema “SCAN” consiste na integração de uma estação total robótica com tecnologia de laser sem refletor. O SCAN fez interface com um sistema de *software* de monitoramento de deslocamentos existente, o ALERT, desenvolvido pelo Centro Canadense de Engenharia Geodésica da Universidade de New Brunswick. Os resultados deste teste de campo indicam que o sistema ALERT SCAN aumenta muito a eficiência do levantamento reduzindo o tempo necessário para coletar dados completos do tanque de duas semanas (com três pessoas) para meio dia (com uma pessoa).

Na Tailândia, Khemapech, Sansrimahachai e Toahchoodee (2016), desenvolvem um sistema aprimorado de monitoramento de saúde estrutural usando técnicas de processamento de fluxo e de rede neural artificial (SPANNeT). As principais contribuições incluem uma comunicação de dados eficaz, precisa e com reconhecimento de energia e detecção de danos da estrutura de engenharia. O SPANNeT é capaz de gerar relatórios, monitoramento e alertas de dados em tempo real, de acordo com os limites pré-definidos, que podem ser ajustados de acordo com os requisitos do usuário e características de engenharia estrutural.

Na China, Wang, Fu e Yang (2017) apresentam um novo sistema integrado de informações que combina a Internet das coisas (do inglês, *Internet of Things*, ou IoT), o gerenciamento de informações de construção, o sistema de alerta antecipado e os serviços na nuvem para o monitoramento da saúde estrutural e a tecnologia de

alerta precoce. A proposta da estrutura de sistema de informação integrada baseada na Internet foi aplicada para monitorar um local de engenharia de escavação de poço. Três níveis de alerta foram implementados de acordo com as regras baseadas no valor limite, o que determinou que o pessoal de segurança específico deveria ser notificado. Propõe-se que o sistema de informação integrado proposto, baseado na Internet, melhore a eficácia dos processos de monitoramento e tomada de decisões em aplicações de construção.

Na Alemanha, pesquisadores do Departamento de Geodésia e Navegação (Inspeção) e do *Institut für Angewandte Forschung* (IAF) da Universidade de Karlsruhe de Ciências Aplicadas desenvolveram o projeto *GNSS/LPS/LS-based Online Control and Alarm System* (GOCA). Até a data da presente pesquisa, 21 teses de doutorado usaram este projeto como tema e novas pesquisas estão sendo desenvolvidas. O sistema multi-sensor em tempo real GOCA aplica GNSS, sensores de posicionamento local terrestre, tais como, estações totais e níveis, e adicionalmente sensores locais, tais como, sensores de tensão ou inclinômetros, para um monitoramento e análise de deformação. O *software* GOCA além da inicialização, georreferenciamento e verificação de pontos estáveis, faz uma análise de deformação (estimativa de tendência, *kalman-filtering*) com respeito aos pontos objetos participantes do monitoramento. Além disso, um gerenciamento de alarmes e uma predição de deformação são fornecidos pelo *software* (GOCA, 2018).

As medições automatizadas de deslocamento vêm ganhando grande importância devido à crescente densidade no espaço público e à idade avançada dos edifícios existentes, pontes, túneis, barragens e infraestrutura adicional. Ao mesmo tempo, os custos dos sensores e da tecnologia da informação em geral diminuem, o que também pode facilitar seu amplo uso em Geodésia (Da Cruz, 2015; Engel & Schweimler, 2016).

Com a evolução do instrumental utilizado em levantamentos geodésicos, especialmente no que diz respeito a robotização de estações totais, a automação no monitoramento geodésico em estruturas de grande porte é realizada com a comunicação e controle destes instrumentos de medição por meio do desenvolvimento de *softwares* que permitem o envio e o recebimento de dados, em uma comunicação entre a estação total robotizada e computador (Nadal, 2008; Jerke, 2019).

Atualmente, existem sistemas próprios de monitoramento geodésico de estruturas feito pelos próprios fabricantes de instrumentos geodésicos ou por escritórios de engenharia para seus próprios negócios. Essas soluções geralmente são projetadas como aplicativos isolados, vendidas comercialmente e os sensores auxiliares utilizados são limitados a tipos ou produtores específicos, e as interfaces para troca de dados e controle remoto não estão abertas a produtos de terceiros, para garantir o bloqueio do fornecedor e manter a exclusividade da empresa sobre a tecnologia utilizada (Jerke, 2019).

Apesar da evolução dos sensores e dispositivos de *hardware* para controle remoto, não foi encontrada no levantamento bibliográfico realizado uma plataforma gratuita para o monitoramento geodésico de estruturas, conforme o que está sendo proposto nesta pesquisa. Por essa razão, busca-se propor uma metodologia para a automação do levantamento por irradiação no monitoramento geodésico de estruturas por meio do desenvolvimento de um sistema gratuito que permite a automatização da coleta e do processamento dos dados do monitoramento geodésico. Para tal fim, o sistema desenvolvido realiza os seguintes procedimentos:

- a) controle e operação de estações totais robotizadas;
- b) medição dos pontos pré-determinados;
- c) inclusão das correções atmosféricas do ambiente, obtidas a partir da coleta de pressão e temperatura por um sensor desenvolvido nesta pesquisa;
- d) processamento automático em tempo real dos dados coletados;
- e) determinação das diferenças das coordenadas tridimensionais dos pontos através da comparação com valores de campanhas anteriores;
- f) representação em tempo real do comportamento das coordenadas obtidas.

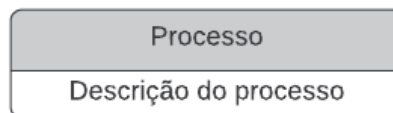
Esta pesquisa contribui para o entendimento rápido do comportamento da estrutura com base no monitoramento geodésico, buscando determinar possíveis variações de pontos pré-definidos, minimizando a influência do operador na coleta e no processamento dos dados dos levantamentos que utilizam estação total robotizada. Salienta-se também que o sistema estará em constante desenvolvimento, será disponibilizado livremente sem nenhum custo, os usuários poderão acessar todas as funcionalidades para entender o funcionamento e sugerir melhorias, customizações, etc.

4.2 METODOLOGIA

A metodologia de automação do monitoramento geodésico de estruturas proposta neste trabalho é representada por processos que definem a arquitetura de um sistema que são explicados a partir de diagramas de fluxo de dados. Porém, antes da apresentação do diagrama, é necessário explanar sobre as composições utilizadas para melhor entendimento, são elas:

- a) entidade (Figura 4.2.1): Categorias que representam os processos do sistema, apresentadas visualmente por meio de telas ou pop-ups que contém os componentes do processo.

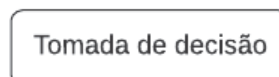
Figura 4.2.1 – Modelo de entidade.



Fonte: O Autor (2023).

- b) tomada de decisão (Figura 4.2.2): São o fluxo por onde as informações trafegam após a tomada de decisão do processo anterior. É a transição de um processo para o outro a partir da decisão informada.

Figura 4.2.2 – Modelo de tomada de decisão.



Fonte: O Autor (2023).

- c) fluxo de dados (Figura 4.2.3): É o fluxo por onde as informações trafegam após a tomada de decisão do processo anterior. É a transição de um processo para o outro a partir da decisão informada.

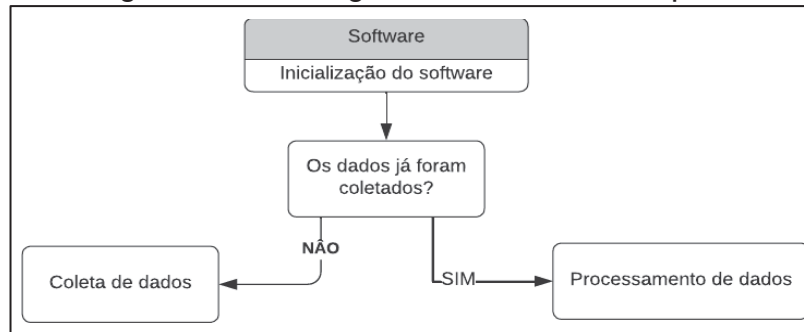
Figura 4.2.3 – Modelo de fluxo de dados.



Fonte: O Autor (2023).

O diagrama de fluxo de dados é dividido em duas etapas: coleta de dados e processamento dos dados, conforme é ilustrado na Figura 4.2.4.

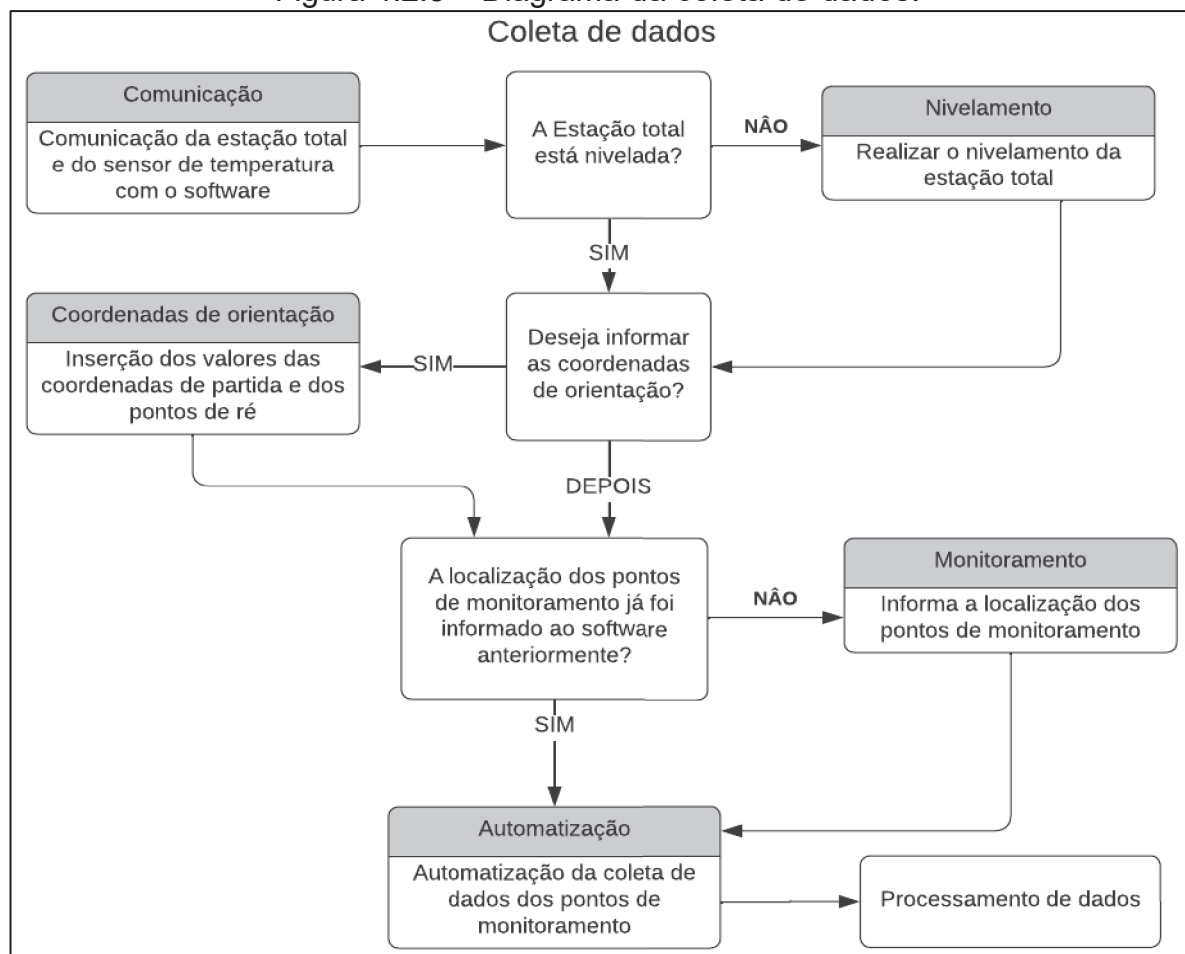
Figura 4.2.4 – Diagrama dividido em etapas.



Fonte: O Autor (2023).

A etapa de coleta de dados é visualizada na Figura 4.2.5.

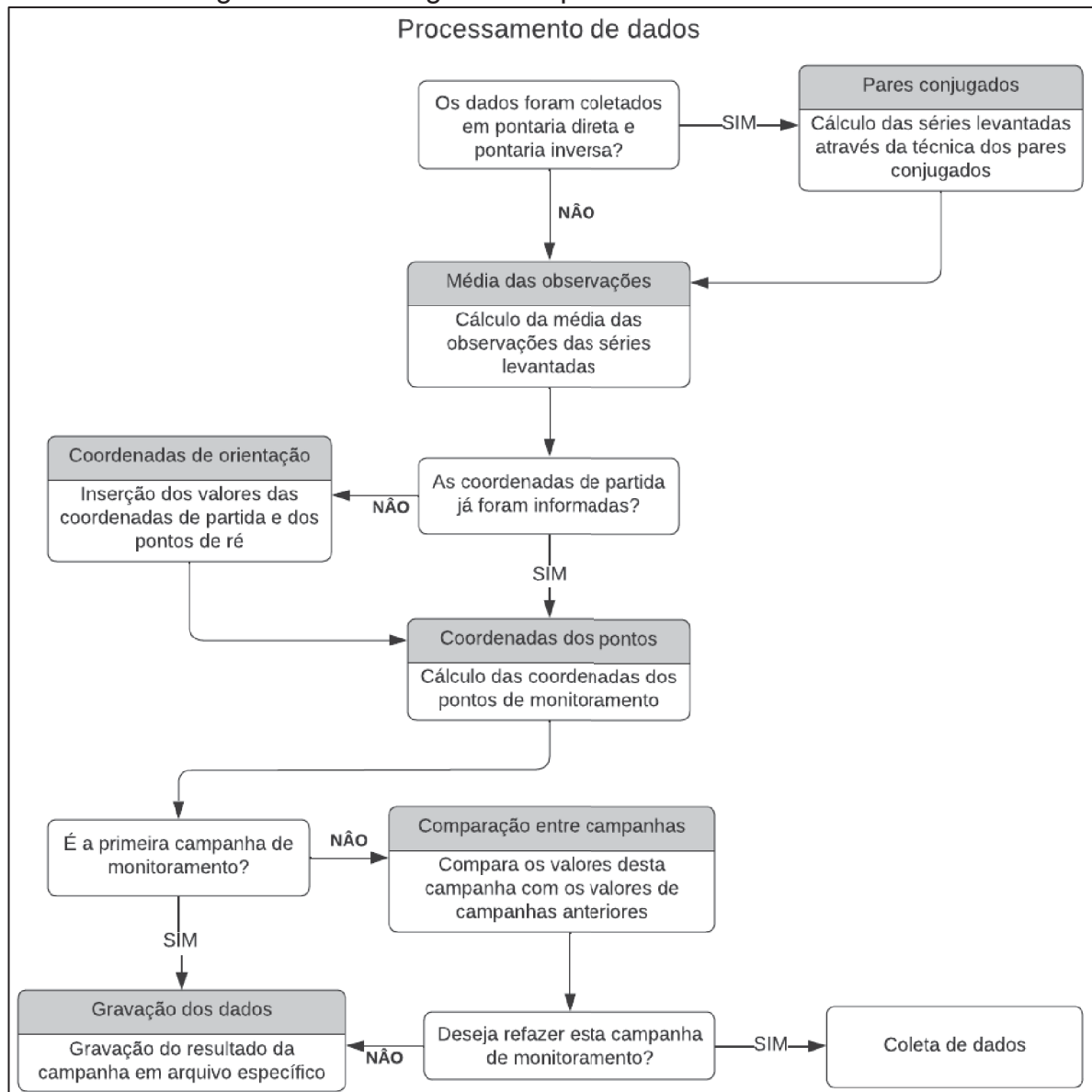
Figura 4.2.5 – Diagrama da coleta de dados.



Fonte: O Autor (2023).

A etapa de processamento dos dados é apresentada na Figura 4.2.6.

Figura 4.2.6 – Diagrama do processamento de dados.



Fonte: O Autor (2023).

Para validação desta proposta de automação do monitoramento geodésico de estruturas, desenvolveu-se um sistema que utiliza a metodologia apresentada, realizando os seguintes procedimentos:

- controle e operação de estações totais robotizadas;
- medição dos pontos pré-determinados com a inclusão das correções atmosféricas do ambiente em tempo real;
- processamento automático em tempo real dos dados coletados;

- d) indicador de deslocamento dos pontos através da comparação dos valores com campanhas anteriores, se houver valores de referência.
- e) representação em tempo real do comportamento das coordenadas obtidas.

4.2.1 Implementação do sistema MGEO

O sistema desenvolvido nesta pesquisa foi denominado de MGEO (v.1.0) para automatizar o levantamento no monitoramento geodésico de estruturas e foi implementado através da linguagem C# com uso da plataforma Visual Studio 2019.

O sistema é dividido em seis subsistemas, ou abas, denominados: Início, Comunicação, Controle, Monitoramento, Sensor de Temperatura e Processamento. O subsistema “Início” é a aba inicial onde é feita a inicialização do mesmo e a disponibilização para selecionar qual subsistema o usuário pretende acessar por meio de suas abas. A interface gráfica, na aba Início, pode ser visualizada na Figura 4.2.7.

Figura 4.2.7 – Interface gráfica – Aba Início.



Fonte: O Autor (2023).

4.2.1.1 Comunicação

A comunicação com a estação total é realizada através da aba “Comunicação” que pode ser feita mediante Cabo Serial RS232, Bluetooth ou via Rádio. Em todos os casos é possível configurar os parâmetros de comunicação, como a porta serial e a velocidade de transmissão.

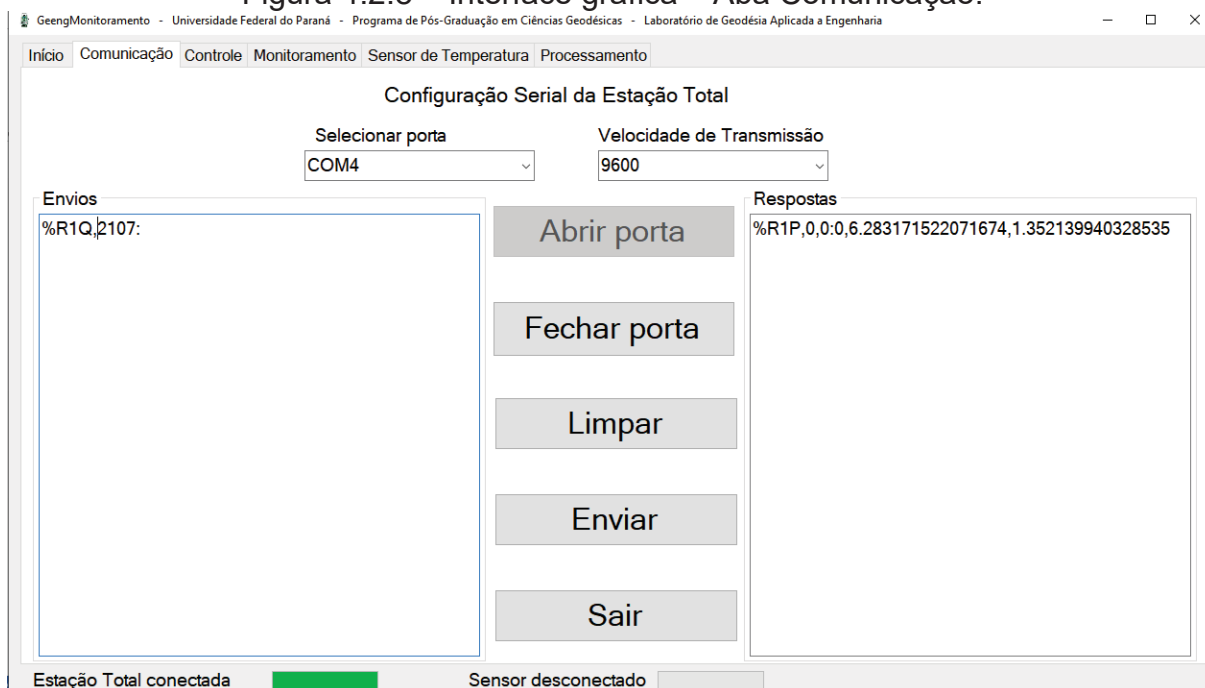
Como para esta pesquisa foi disponibilizado somente equipamentos da empresa Leica Geosystems, a versão inicial do sistema só consegue realizar a comunicação com estações totais da Leica. A comunicação com equipamentos de outras empresas do ramo serão incorporadas em futuras atualizações.

O estabelecimento da comunicação é realizado pela opção “Selecionar porta”, onde nesta opção fica visível somente as portas de comunicação disponíveis. Além da porta de comunicação, deve-se selecionar também a velocidade de transmissão utilizada durante a conexão. Nesta opção, fica visível somente as velocidades 9600 bits/s e 19200 bits/s permitindo com que o usuário selecione somente uma delas. Na maioria dos equipamentos, a velocidade de 9600 bits/s é utilizada quando a comunicação é realizada pelo cabo RS232 e a velocidade de 19200 bits/s é utilizada quando a comunicação é feita via Bluetooth ou via Rádio.

Além do estabelecimento da comunicação, disponibilizou-se nesta aba, um terminal de envio e resposta com o objetivo de averiguar o funcionamento do sistema. Desta forma, o usuário pode testar a conexão entre a estação total e o *hardware* que contém o sistema com o envio dos códigos para o equipamento no terminal “Envios” e visualizar as respostas no terminal “Respostas”.

Definiu-se também que o subsistema de comunicação possui uma hierarquia maior do que os outros subsistemas que permitem o controle da estação total, fazendo com que as opções e funções desses subsistemas, não fiquem disponíveis para o usuário enquanto a comunicação com a estação total não for estabelecida. A interface gráfica, na aba Comunicação, pode ser visualizada na Figura 4.2.8.

Figura 4.2.8 – Interface gráfica – Aba Comunicação.



Fonte: O Autor (2023).

4.2.1.2 Controle

O controle e a obtenção de dados da estação total são realizados pela aba “Controle” que possui os comandos pré-fixados de operação e solicitação de dados embutidos na estação total. Esta interação com o equipamento permite ao usuário a imediata visualização de resposta da estação total, seja pela movimentação do equipamento ou pela obtenção de dados no terminal correspondente, como por exemplo: Valor da direção horizontal, Valor do ângulo vertical, etc.

Por exemplo, se o usuário utilizar a opção “Ângulo Hz”, o sistema enviará para a estação total o código no protocolo correspondente. No protocolo GeoCOM da empresa Leica Geosystems o código para solicitação do ângulo horizontal é “%R1Q,2107:\r\n”, sendo que a parte “%R1Q,” corresponde ao cabeçalho da mensagem indicando que é uma pergunta/solicitação para a estação total, e a parte “2107”: indica qual tipo de pergunta/solicitação foi realizada, sendo que neste exemplo corresponde aos valores de direção horizontal, ângulo vertical e distância inclinada, já a parte “\r\n” é uma parte fixa que indica o final da mensagem.

Com esta solicitação, a estação responderá com o código “%R1P,0,0:0,HZ,V,distância inclinada” sendo que a parte “%R1P,” corresponde ao cabeçalho indicando que é a resposta da estação total, a parte “0,0:0” indica que a

solicitação foi recebida e retornada sem erros de comunicação e a parte “Hz,V,di” correspondem a respectivamente aos valores de direção horizontal em radianos, ângulo vertical em radianos e distância inclinada em metros. A Figura 4.2.9 mostra os códigos deste exemplo.

Figura 4.2.9 – Exemplo de código do protocolo GeoCOM.

Pergunta:	Cabeçalho	Requerimento	Parte fixa
	%R1Q,	2107:	\r\n
Resposta:	Cabeçalho	Parte fixa	Ângulo horizontal (rad)
	%R1P,	0,0:0,	0.543816795278614,
			Ângulo vertical (rad)
			1.756814978354218,
			Distância inclinada (m)
			15.651834893467928

Fonte: Adaptado de Carvajal (2019).

Estas abas foram criadas com o objetivo de fornecer as funções mais usuais do equipamento de forma simplificada e pré-fixada de modo a permitir que o usuário possa testar a comunicação com a estação total sem a necessidade de conhecer nenhum código do protocolo GeoCOM, visto que os códigos já estão inseridos nos botões das respectivas abas. A interface gráfica, na aba Controle, pode ser visualizada na Figura 4.2.10.

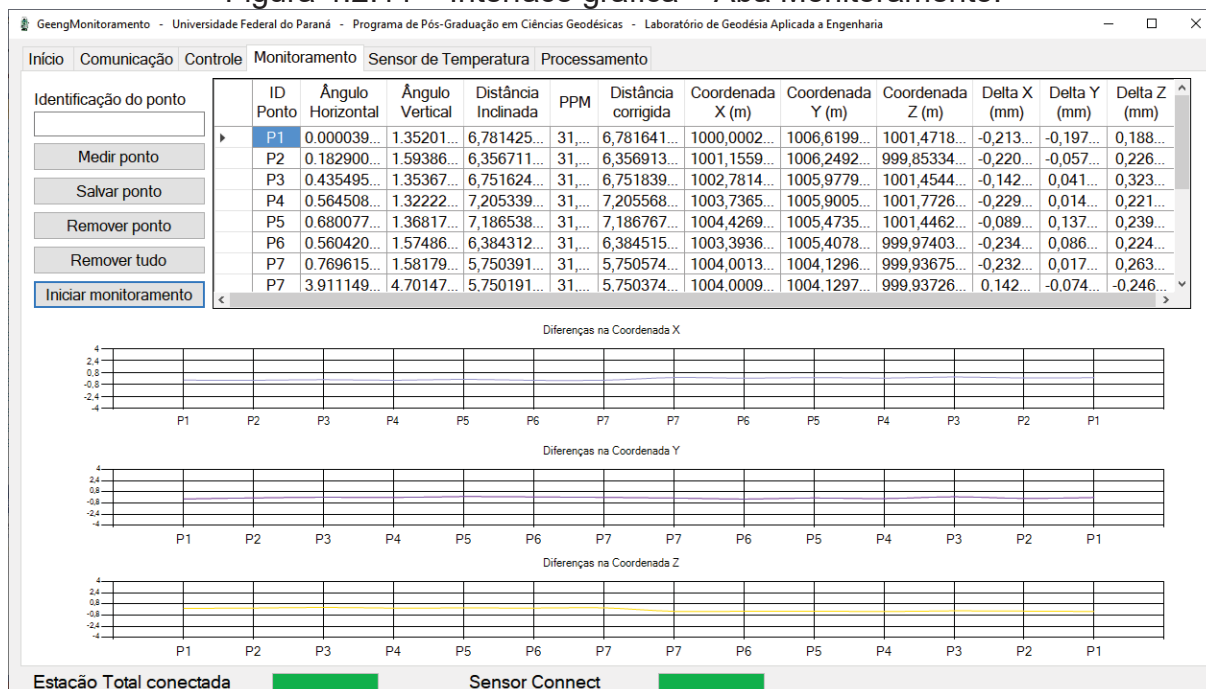
Figura 4.2.10 – Interface gráfica – Aba Controle.

Fonte: O Autor (2023).

4.2.1.3 Monitoramento

A automatização da coleta de dados dos pontos de monitoramento é realizada pela aba “Monitoramento”, conforme mostra a Figura 4.2.11, onde é desejável que a primeira leitura da primeira campanha de monitoramento seja feita de forma manual, com o objetivo de obter a localização de todos os pontos que se deseja monitorar. Outra forma é informar, digitando o valor da direção horizontal, orientada na estação de ré e o ângulo zenital dos pontos. Com essas informações ou com a primeira leitura realizada, as demais são feitas de forma automatizada.

Figura 4.2.11 – Interface gráfica – Aba Monitoramento.



Fonte: O Autor (2023).

Para a realização da primeira leitura, o usuário deve fazer a pontaria para o ponto a ser medido, digitar o nome do ponto no local indicado e utilizar o botão “Medir ponto”. Ao realizar esta tarefa, o sistema enviará para a estação total o código “%R1Q,2107:\r\n” solicitando os valores de direção horizontal, ângulo vertical e distância inclinada do ponto. Com a mensagem de resposta da estação, realiza-se uma filtragem do código respondido e insere-se na tabela indicada na Figura 4.2.11 os valores correspondentes a cada coluna, bem como faz automaticamente os cálculos dos valores de direção horizontal e vertical na posição inversa.

Com o ponto medido, o usuário tem a opção de verificar na tabela da Figura 4.2.11 os dados do mesmo. Se algum dado apresentar algum erro pode-se remover as medições realizadas no ícone indicado ou se não apresentar erros pode-se salvar o mesmo no botão específico.

Ao utilizar a opção “Salvar ponto”, salva-se os dados em um arquivo com extensão “.csv” que contém a localização de todos os pontos de monitoramento e serve de referência para a execução da automatização da coleta de dados do monitoramento.

Assim que essas informações foram obtidas, pode-se iniciar o monitoramento clicando no ícone “Iniciar monitoramento” onde realiza-se automaticamente as seguintes operações:

- 1) obtenção da direção horizontal, do ângulo vertical e da distância inclinada do ponto no arquivo “.csv”;
- 2) controle da estação total para realização da pontaria do mesmo através do código "%R1Q,9027:(Valor do Hz), (Valor do V)\r\n";
- 3) medição da direção horizontal, ângulo vertical e distância inclinada através do código "%R1Q,2107:\r\n" e visualização dos dados na tabela da Figura 4.2.11;
- 4) medição dos dados de temperatura e pressão atmosférica através do sensor e incorporação das correções ambientais na distância inclinada.
- 5) cálculo das coordenadas tridimensionais do ponto e gravação em outro arquivo “.csv” específico para os resultados do monitoramento;
- 6) obtenção da direção horizontal e vertical do próximo ponto, no arquivo específico e repetição das operações a partir do item 2).

Ao mesmo tempo que está sendo realizado a série de leitura é possível visualizar os dados dos pontos recém levantados para verificação e, se necessário, pode-se realizar mais séries de leitura onde o número de cliques no botão “Iniciar monitoramento” define a quantidade de séries. Por exemplo, se for dado 4 cliques consecutivos no botão, 4 séries de leituras serão realizadas automaticamente.

Além da verificação numérica dos dados do monitoramento na tabela, tem-se também a possibilidade de visualizar em tempo real o comportamento das diferenças de coordenadas nos gráficos correspondentes. Nestes são mostrados instantaneamente as diferenças dos valores das coordenadas recém levantadas

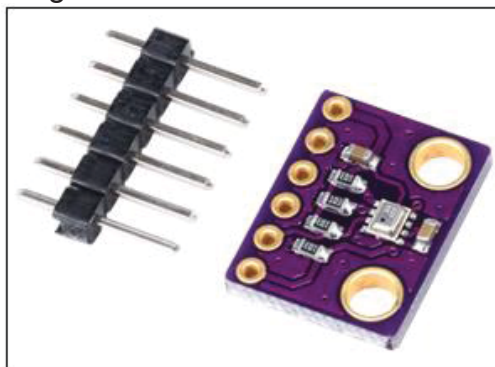
com os valores das coordenadas informadas na localização dos pontos, podendo ser configurado também para calcular em relação a outras campanhas de referência.

4.2.1.4 Sensor de temperatura e pressão

Como o monitoramento geodésico de estruturas exige um alto grau de precisão, as correções atmosféricas das distâncias, obtidas pelos Medidores Eletrônicos de Distância, precisam ser utilizadas para corrigir as distâncias inclinadas medidas. Para isso, foi desenvolvido nesta pesquisa um sistema de medição de temperatura e pressão, que envia automaticamente os valores medidos de temperatura e pressão atmosférica em tempo real.

Para o desenvolvimento do sistema de medição de temperatura e pressão, utilizou-se o medidor BMP280 que se baseia na medição piezo-resistiva da fabricante Bosch. O BMP280, conforme mostra a Figura 4.2.12, permite medição de pressão na faixa de 300 a 1100mBar com precisão de $\pm 0.12\text{mBar}$ e medição de temperatura na faixa de -40 à 85°C com precisão de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (Bosch, 2015).

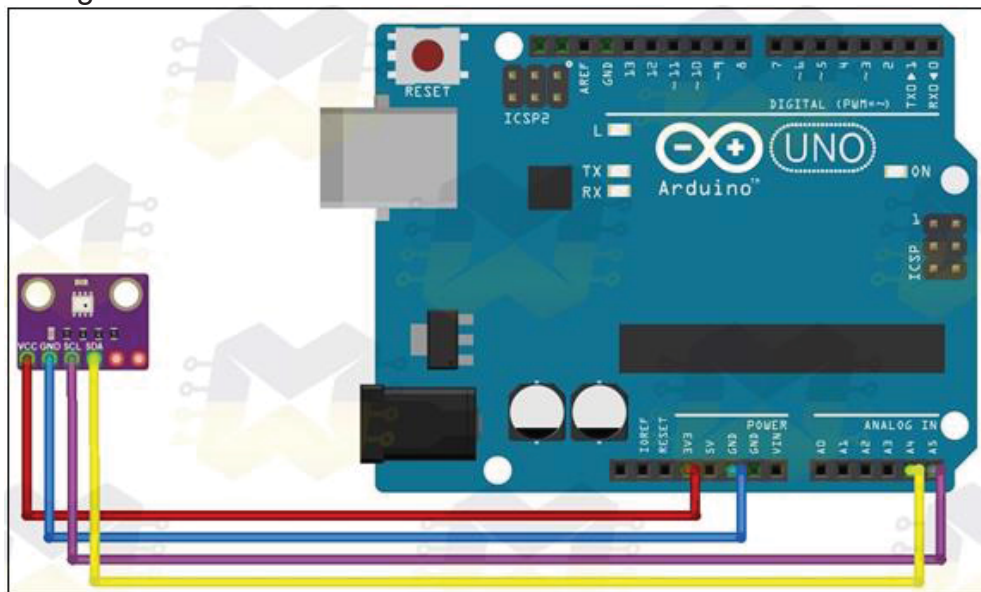
Figura 4.2.12 – Sensor BMP280.



Fonte: Bosch, 2015.

Para a integração do sensor com o *software* utilizou-se também uma placa arduino (placa eletrônica programável) que faz a comunicação das medições do sensor BMP280 e informa ao *software*, conforme pode ser visualizado na Figura 4.2.13.

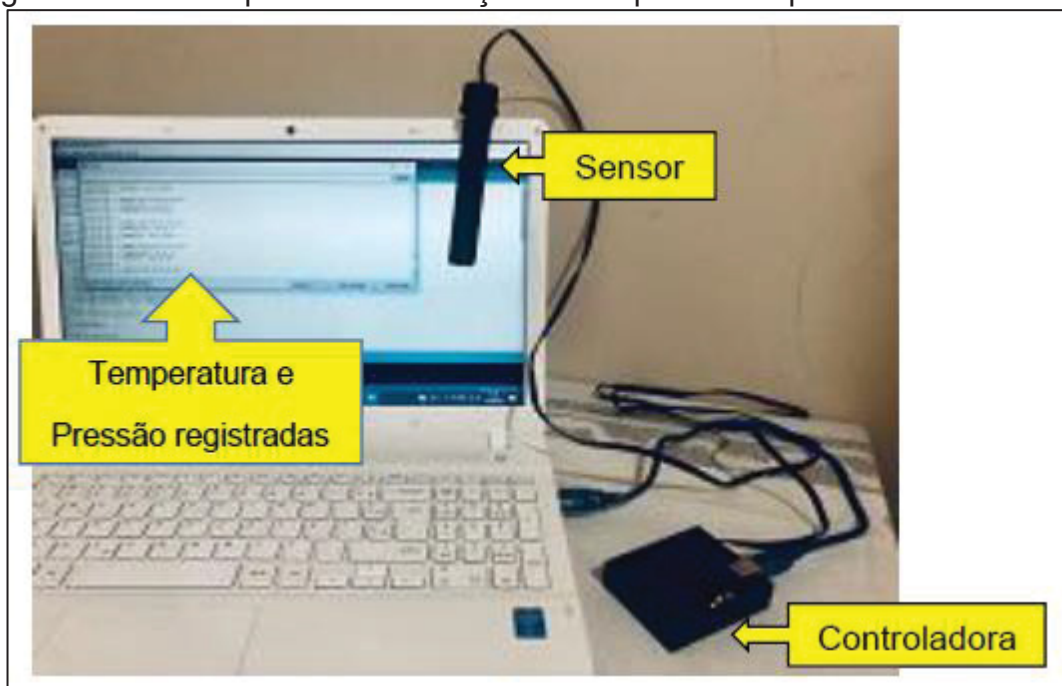
Figura 4.2.13 – Conexões do Sensor BMP280 no Arduino Uno.



Fonte: O Autor (2023).

Portanto, o desenvolvimento do sistema de medição consistiu na integração de uma placa Arduino com o sensor BMP280, no qual os dados são enviados em tempo real via cabo USB para o *software*. Além disso, foi confeccionado dispositivos para proteger o circuito elétrico da umidade. O dispositivo de medição de temperatura e pressão desenvolvido pode ser visualizado na Figura 4.2.14.

Figura 4.2.14 – Dispositivo de medição de temperatura e pressão desenvolvido.

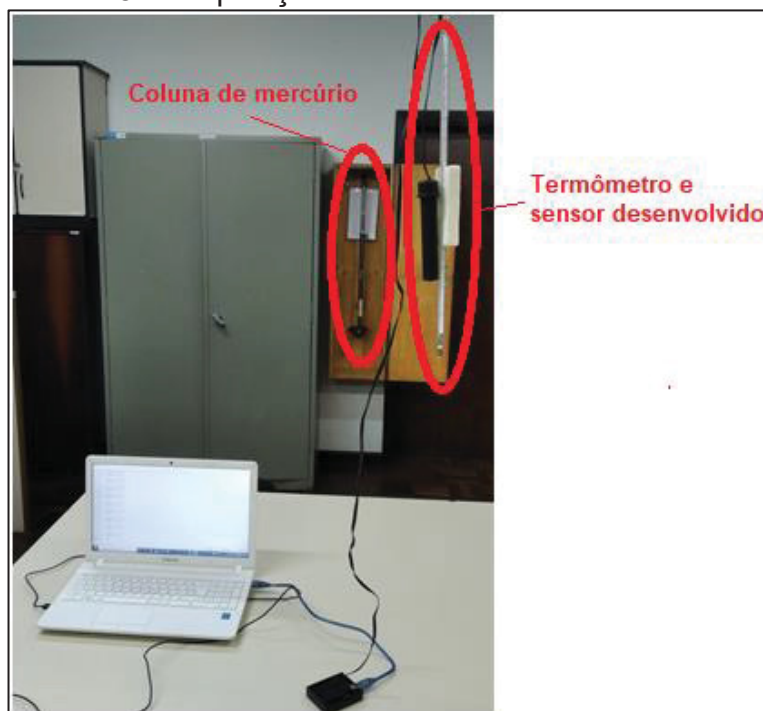


Fonte: O Autor (2023).

Após a confecção do sensor de temperatura e pressão realizou-se a calibração em dois ambientes diferentes, um no interior do Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da Universidade Federal do Paraná com medidas de temperatura e pressão controladas; e o outro em ambiente externo, ao longo da Serra do Mar-PR com diferentes altitudes para verificar o comportamento do sensor com medidas aleatórias.

A calibração no LAIG foi realizada no dia 21/06/2021, onde a coleta de dados do sensor desenvolvido era realizada a cada 15 minutos e os dados foram comparados com os dados do termômetro de mercúrio e da coluna de mercúrio pertencentes ao laboratório. O sensor foi instalado próximo ao termômetro de mercúrio, conforme mostra a Figura 4.2.15.

Figura 4.2.15 – Disposição dos sensores durante a calibração.



Fonte: O Autor (2023).

Com a calibração no LAIG realizada, notou-se que a diferença média nos dados de temperatura foi de $+0,61^{\circ}\text{C}$ e a diferença média nos dados de pressão atmosférica foi de $-0,07\text{ mmBar}$. Como a precisão do sensor BMP280 é de $\pm 0,12\text{ mmBar}$ e de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, os valores da calibração encontraram-se dentro da tolerância do fabricante.

A calibração em ambiente externo foi conduzida através de medições com diferentes altitudes. Para isso, realizou-se observações a cada 100m de desnível ao longo da serra do mar até praia de leste, no litoral do estado do Paraná, proporcionando uma variação de altitude de aproximadamente 1000m. Para esta calibração, utilizou-se como referência os dados coletados pelo mesmo termômetro de mercúrio e por um aneróide calibrado, no início e no final do levantamento, com a coluna de mercúrio do LAIG. A Figura 4.2.16 mostra o procedimento de campo para a coleta de dados da calibração em ambiente externo.

Figura 4.2.16 – Disposição dos sensores durante a calibração externa.



Fonte: O Autor (2023).

Com a calibração em ambiente externo realizada, notou-se que a diferença média nos dados de temperatura também foi de $+0,61^{\circ}\text{C}$ e a diferença média nos dados de pressão atmosférica foi de $-0,10\text{ mmBar}$. Portanto, após as calibrações realizadas do sistema de medição desenvolvido constatou-se que os dados estão dentro da tolerância do fabricante e que atendem aos requisitos exigidos para o monitoramento geodésico de estruturas.

4.2.1.5 Comunicação do sensor de temperatura e pressão

A comunicação com o sensor de temperatura e pressão é realizada através da aba “Sensor de Temperatura” que também pode ser feita mediante Cabo Serial RS232, Bluetooth ou via Rádio. Em todos os casos é possível configurar os parâmetros de comunicação, como a porta serial e a velocidade de transmissão, conforme pode ser visualizado na Figura 4.2.17.

Figura 4.2.17 – Interface gráfica – Aba Sensor de Temperatura.

GeengMonitoramento - Universidade Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - Laboratório de Geodésia Aplicada a Engenharia

Abas: Início | Comunicação | Controle | Monitoramento | **Sensor de Temperatura** | Processamento

Configuração Serial do Sensor de Temperatura

Selecionar porta: Velocidade de Transmissão: **Abrir porta**

Leituras manuais do sensor: **Medir** | **Média** | Limpar | Dados brutos

Leituras automáticas do sensor: **Dados em Tempo real**

Temperatura: 16.72 Pressão: 923.38

Temperatura	Pressão atmosférica	PPM
16,74	923,34	29,821745536103492
16,74	923,34	29,821745536103492
16,72	923,41	29,784015289752119
16,72	923,41	29,784015289752119
16,72	923,38	29,792355873805548
16,72	923,38	29,792355873805548

Temperatura média: 16,73 Pressão média: 923,38 PPM médio: 29,80

Temperatura [°C]	Pressão atmosférica (mBar)	Altitude (m)	PPM
16.73	923.40	776	29,795916...
16.72	923.40	776	29,786784...
16.72	923.41	776	29,784015...
16.72	923.40	776	29,786784...
16.72	923.40	776	29,786784...
16.72	923.40	776	29,786784...
16.72	923.40	776	29,786784...
16.72	923.40	776	29,786784...
16.72	923.39	776	29,789570...
16.72	923.39	777	29,789570...
16.72	923.40	776	29,786784...
16.72	923.41	776	29,784015...
16.72	923.41	776	29,784015...

Estação Total conectada [Barra Verde] Sensor Connect [Barra Verde]

Fonte: O Autor (2023).

Para estabelecer a comunicação também foi programado para que fique visível na opção “Selecionar porta” somente as portas de comunicação disponíveis. Deve-se selecionar também a velocidade de transmissão dos dados e utilizar a opção “Abrir porta”.

Além do estabelecimento da comunicação, esta aba possui também uma tabela que mostra o recebimento dos dados do sensor com o objetivo de averiguar o funcionamento do sistema, sendo que para a utilização desta opção deve-se utilizar a opção “Dados em tempo real”. Desta forma, o usuário pode testar a conexão do sensor de temperatura com a visualização do recebimento dos dados.

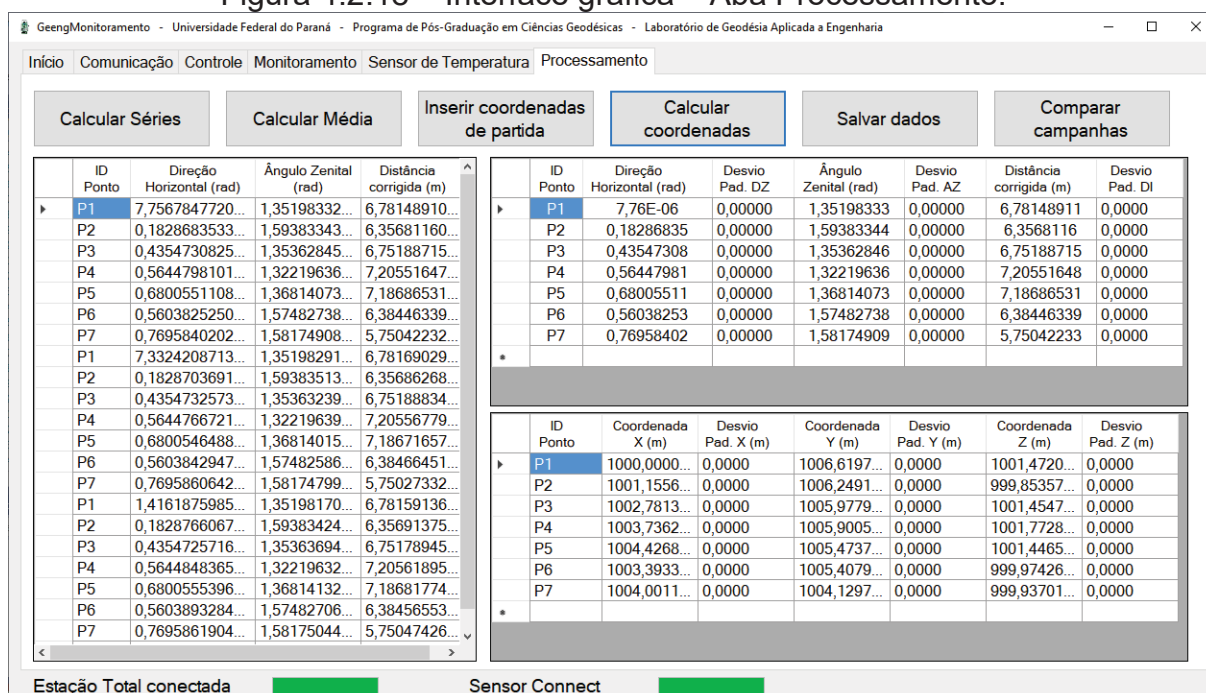
Outra opção nesta aba é a visualização dos valores sem precisar ficar medindo a todo instante. Para usar esta função deve-se utilizar a opção “Medir” que as medições da temperatura, da pressão atmosférica e do cálculo da correção da distância, em partes por milhão (ppm), serão mostradas nos terminais correspondentes. Após realizar leituras utilizando esta opção, tem-se a possibilidade de calcular a média dos valores obtidos através do botão “Média”, onde realiza-se o cálculo da média aritmética dos valores encontrados de temperatura, pressão e ppm e visualização desses valores médios logo abaixo dos terminais correspondentes.

Também existe a possibilidade de verificar o recebimento dos dados brutos. Para a seleção desta função deve-se utilizar a opção “Dados brutos” e com isso visualiza-se o recebimento dos dados sem nenhum tipo de filtro e processamento no terminal correspondente.

4.2.1.6 Processamento

Por fim, o processamento dos dados é feito através da aba “Processamento”, conforme pode ser visualizado na Figura 4.2.18. Nesta aba é realizado o processamento dos dados e consequente obtenção das coordenadas tridimensionais dos pontos.

Figura 4.2.18 – Interface gráfica – Aba Processamento.



Fonte: O Autor (2023).

Para início do processamento, tem-se o botão “Calcular Séries”. Este botão deve ser utilizado somente se o levantamento da coleta de dados foi feito pela técnica dos pares conjugados. Caso no levantamento foi realizado a medição de cada um dos pontos de monitoramento em pontaria direta e em pontaria inversa, ao utilizar a opção “Calcular Séries” o sistema realizará os cálculos dos pares conjugados e mostrará na tabela correspondente esses valores de todos os pontos de monitoramento em todas as séries de leituras. Cabe salientar que, caso não seja utilizado a técnica dos pares conjugados, não se deve utilizar esta opção e o sistema vai mostrar um alerta de erro.

Logo após tem-se o botão “Calcular Média”. Este botão é obrigatoriamente utilizado tanto pelo levantamento feito pela técnica dos pares conjugados quanto pelo levantamento sem utilizar esta técnica. Nesta opção é calculada a média aritmética dos valores das observações levantadas e fornecido na tabela correspondente o resultado do valor médio de cada observação de todos os pontos de monitoramento.

Caso as coordenadas de partida não tenham sido fornecidas no início da coleta de dados, tem-se a opção de informar, durante o processamento, os valores das coordenadas da estação total através do botão “Inserir coordenadas para orientação”. Nesta opção aparecerá uma nova tela que pedirá para o usuário informar os valores das coordenadas X, Y e Z da estação total e dos pontos de ré que foram utilizados para a orientação do equipamento. Salienta-se que caso as coordenadas de partida tenham sido fornecidas durante a coleta de dados, esta opção não precisa ser utilizada.

Com as coordenadas de partida e de orientação fornecidas, o próximo passo é o cálculo das coordenadas dos pontos que é realizado através do botão “Calcular coordenadas”. Ao utilizar esta opção, o cálculo das coordenadas tridimensionais é realizado através dos valores fornecidos das coordenadas de partida juntamente com os valores médios das observações dos pontos e mostrará na tabela as coordenadas tridimensionais dos mesmos, juntamente com o desvio padrão de cada coordenada calculado pela lei de propagação de covariâncias. Com isso, é possível verificar o resultado do monitoramento geodésico de estruturas e analisar a precisão obtida.

Após a apresentação das coordenadas dos pontos de monitoramento tem-se a opção de comparar os valores encontrados com os valores de campanhas anteriores. Para a utilização desta função deve-se utilizar a opção “Comparar campanhas”, onde será aberta uma nova tela de busca para que o usuário possa selecionar a campanha desejada e ao selecionar, aparecerá a diferença das coordenadas encontradas entre as campanhas. Caso o resultado não seja satisfatório, o usuário poderá refazer toda a parte de coleta de dados novamente ou somente o processamento de dados, pois até esta etapa, os resultados não ficam salvos ainda.

Por fim, após realizar todos os cálculos do monitoramento geodésico de estruturas e de realizar todas as análises dos resultados, tem-se a opção de salvar a campanha de monitoramento em arquivo específico através do botão “Salvar dados”. Ao utilizar esta opção, abre-se uma nova janela que solicitará ao usuário o nome do arquivo e o local onde será salvo.

4.2.2 Levantamentos realizados

Para avaliação do comportamento do sistema desenvolvido foi levantado e analisado os resultados encontrados na área de estudo do laboratório de Geodésia aplicada a Engenharia (GEENG) e na barragem da Usina Hidrelétrica (UHE) Mauá.

4.2.2.1 GEENG

O levantamento realizado no GEENG serviu de teste e de ensaio para a realização de campanhas de monitoramento em outras estruturas.

Para fins de teste do funcionamento da coleta de dados, foi realizado em 05 e 19 de julho 2021, a primeira e a segunda campanha de monitoramento no laboratório GEENG, respectivamente, e em 06 de agosto de 2021 foi realizada a terceira campanha, sendo levantados sete pontos de monitoramento com seis séries de coleta de dados, conforme mostra a Figura 4.2.19. Para fins de orientação, foi estabelecido que as coordenadas tridimensionais do equipamento fossem $X = 1000\text{m}$, $Y = 1000\text{m}$ e $Z = 1000\text{m}$, e que o ângulo de orientação para o ponto 1 fosse igual a $0^\circ 00' 00''$ para todas as campanhas.

Figura 4.2.19 – Distribuição dos pontos de monitoramento no laboratório GEENG.



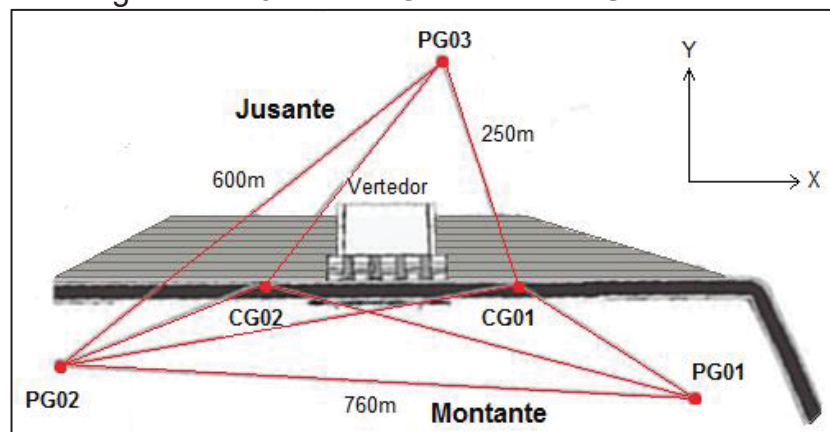
Fonte: O Autor (2023).

Para o levantamento, o equipamento foi instalado em um tripé industrial e conectado via bluetooth ao sistema. Com os dados levantados calculou-se as coordenadas tridimensionais dos pontos em cada série e ao final foi obtida a média das coordenadas calculadas.

4.2.2.2 UHE Mauá

A Rede Geodésica de Referência da UHE Mauá é composta por cinco pilares geodésicos, conforme mostra a Figura 4.2.20.

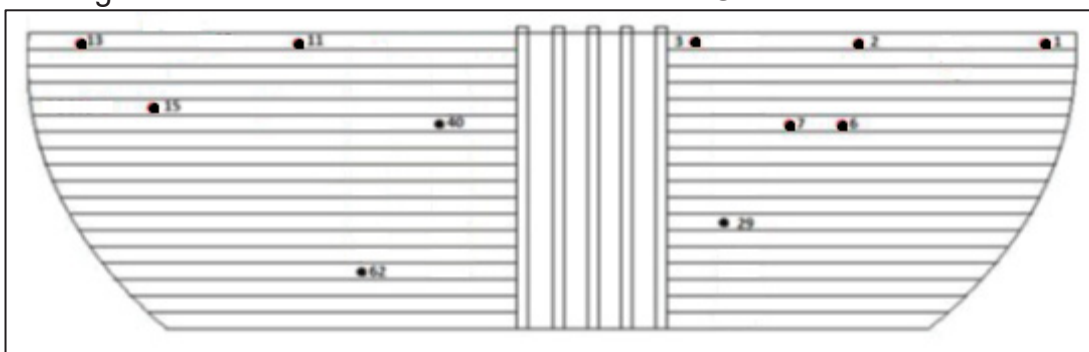
Figura 4.2.20 – Rede Geodésica da UHE Mauá.



Fonte: Adaptado de Siguel (2013).

Foi realizado no dia 07/10/2022 a campanha de monitoramento na UHE Mauá, sendo levantados onze pontos de monitoramento com cada *software*. Os pontos de monitoramento à jusante da UHE Mauá são materializados por prismas fixados por parafusos engastados no paramento da barragem a jusante e os pontos levantados foram distribuídos de forma uniforme a direita e esquerda do vertedouro da barragem, conforme mostra a Figura 4.2.21.

Figura 4.2.21 – Pontos de monitoramento da UHE Mauá levantados.



Fonte: Adaptado de Da Cruz (2015).

Para fins de orientação, foi estabelecido que as coordenadas tridimensionais do ponto ocupado pela estação total (PG03) fossem $X = 1000\text{m}$, $Y = 1000\text{m}$ e $Z = 1000\text{m}$, e a orientação foi realizada em PG02.

Para fins de validação, foi realizado o levantamento e o processamento com o sistema desenvolvido e com um *software* comercial já consolidado no mercado de trabalho, o GeoMos da empresa Leica Geosystems. Na ocasião, foi utilizada a mesma estação total para a coleta de dados e efetuado três séries de leituras pela técnica dos pares conjugados. O levantamento com o GeoMos foi realizado logo em seguida do levantamento com o MGEO a fim de se obter as mesmas condições ambientais, buscando a minimização de erros.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Resultados no GEENG

O resultado da média das coordenadas obtidas na primeira campanha, juntamente com o respectivo desvio padrão, pode ser visualizado na Tabela 4.3.1.

Tabela 4.3.1 – Coordenadas da primeira campanha do GEENG

Ponto	X (m)	σX (mm)	Y (m)	σY (mm)	Z (m)	σZ (mm)
Geeng1	1000,002	0,0	1006,572	0,0	1001,475	0,0
Geeng2	1001,074	0,0	1006,199	0,0	999,812	0,0
Geeng3	1002,800	0,0	1005,999	0,0	1001,458	0,0
Geeng4	1003,747	0,0	1005,935	0,0	1001,773	0,0
Geeng5	1004,472	0,0	1005,546	0,0	1001,449	0,0
Geeng6	1003,331	0,0	1004,183	0,0	999,934	0,0
Geeng7	1004,530	0,0	1004,002	0,0	999,945	0,0

Fonte: O Autor (2023).

Já o resultado da média das coordenadas obtidas na segunda campanha de monitoramento pode ser visualizado na Tabela 4.3.2.

Tabela 4.3.2 – Coordenadas da segunda campanha do GEENG

Ponto	X (m)	σX (mm)	Y (m)	σY (mm)	Z (m)	σZ (mm)
Geeng1	1000,002	0,0	1006,572	0,0	1001,475	0,0
Geeng2	1001,074	0,0	1006,199	0,0	999,812	0,0
Geeng3	1002,800	0,0	1005,999	0,0	1001,458	0,0
Geeng4	1003,747	0,0	1005,935	0,0	1001,773	0,0
Geeng5	1004,472	0,0	1005,546	0,0	1001,449	0,0
Geeng6	1003,331	0,0	1004,183	0,0	999,934	0,0
Geeng7	1004,530	0,0	1004,002	0,0	999,945	0,0

Fonte: O Autor (2023).

A Tabela 4.3.3 apresenta os valores das diferenças de coordenadas entre as duas campanhas analisadas.

Tabela 4.3.3 – Diferença de coordenadas entre a primeira e a segunda campanha

Ponto	ΔX (m)	σX (mm)	ΔY (m)	σY (mm)	ΔZ (m)	σZ (mm)
Geeng1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Geeng2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Geeng3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Geeng4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Geeng5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Geeng6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Geeng7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: O Autor (2023).

Ao analisar os valores verifica-se que não há diferença nas coordenadas de cada campanha, este acontecimento além de indicar que não houve deslocamento dos pontos entre as campanhas deve-se também ao fato de que o levantamento foi

realizado no interior do laboratório com ambiente controlado e que a distância entre o equipamento e os pontos de monitoramento é de no máximo 7 metros, o que colabora significativamente com a precisão das coordenadas e com o desvio padrão nulo.

Na sequência, realizou-se um deslocamento proposital em cada um dos pontos de monitoramento e no dia 06/08/2021 repetiu-se as medições. Os valores das coordenadas desta terceira campanha podem ser visualizados na Tabela 4.3.4.

Tabela 4.3.4 – Coordenadas da terceira campanha do GEENG.

Ponto	X (m)	σX (mm)	Y (m)	σY (mm)	Z (m)	σZ (mm)
Geeng1	999,999	0,0	1006,572	0,0	1001,475	0,0
Geeng2	1001,071	0,0	1006,199	0,0	999,811	0,0
Geeng3	1002,798	0,0	1006,000	0,0	1001,457	0,0
Geeng4	1003,744	0,0	1005,936	0,0	1001,772	0,0
Geeng5	1004,469	0,0	1005,547	0,0	1001,448	0,0
Geeng6	1003,329	0,0	1004,184	0,0	999,934	0,0
Geeng7	1004,529	0,0	1004,004	0,0	999,945	0,0

Fonte: O Autor (2023).

A Tabela 4.3.5 apresenta os valores das diferenças de coordenadas entre a primeira e a terceira campanha de monitoramento.

Tabela 4.3.5 – Diferença de coordenadas entre a primeira e a terceira campanha.

Ponto	ΔX (m)	σX (mm)	ΔY (m)	σY (mm)	ΔZ (m)	σZ (mm)
Geeng1	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Geeng2	3,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
Geeng3	2,0	0,0	-1,0	0,0	1,0	0,0
Geeng4	3,0	0,0	-1,0	0,0	1,0	0,0
Geeng5	3,0	0,0	-1,0	0,0	1,0	0,0
Geeng6	2,0	0,0	-1,0	0,0	0,0	0,0
Geeng7	1,0	0,0	-2,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: O Autor (2023).

Verificou-se, portanto, que há diferença nos valores das coordenadas entre as campanhas analisadas conforme esperado e que nenhuma leitura deixou de ser realizada por ocasião da movimentação dos pontos.

4.3.2 Resultados na UHE Mauá

O resultado da média das coordenadas obtidas através do MGEO, juntamente com o respectivo desvio padrão, pode ser visualizado na Tabela 4.3.6.

Tabela 4.3.6 – Coordenadas obtidas pelo MGEO

Ponto	X (m)	σX (mm)	Y (m)	σY (m)	Z (m)	σZ (m)
PG02	1000,001	1,0	1592,896	1,0	1065,797	1,0
MGE01	960,973	0,0	1406,304	1,0	1039,935	1,0
MGE02	922,627	1,0	1343,989	1,0	1039,974	1,0
MGE03	896,968	1,0	1302,313	0,0	1039,978	1,0
MGE06	939,832	2,0	1356,053	1,0	1027,964	1,0
MGE07	918,392	1,0	1321,270	1,0	1027,949	1,0
MGE11	810,054	1,0	1161,357	1,0	1039,760	1,0
MGE13	768,591	0,0	1093,872	0,0	1040,044	1,0
MGE15	788,283	0,0	1113,588	0,0	1030,083	1,0
MGE29	924,578	1,0	1309,945	2,0	1013,210	2,0
MGE40	837,067	0,0	1189,298	1,0	1027,868	1,0
MGE62	837,197	0,0	1157,602	0,0	1006,173	1,0

Fonte: O Autor (2023).

Já o resultado da média das coordenadas obtidas através do GeoMos, pode ser visualizado na Tabela 4.3.7.

Tabela 4.3.7 – Coordenadas obtidas pelo GeoMos

Ponto	X (m)	σX (m)	Y (m)	σY (m)	Z (m)	σZ (m)
PG02	999,999	0,0	1592,896	1,0	1065,797	0,0
MGE01	960,972	1,0	1406,304	1,0	1039,935	1,0
MGE02	922,626	1,0	1343,989	0,0	1039,974	1,0
MGE03	896,968	1,0	1302,314	0,0	1039,978	1,0
MGE06	939,833	1,0	1356,053	0,0	1027,964	1,0
MGE07	918,392	1,0	1321,270	0,0	1027,949	1,0
MGE11	810,053	0,0	1161,358	1,0	1039,760	1,0
MGE13	768,590	1,0	1093,871	0,0	1040,044	1,0
MGE15	788,282	0,0	1113,588	0,0	1030,083	1,0
MGE29	924,578	1,0	1309,945	0,0	1013,210	1,0
MGE40	837,066	0,0	1189,299	1,0	1027,868	1,0
MGE62	837,197	0,0	1157,602	0,0	1006,173	1,0

Fonte: O Autor (2023).

A Tabela 4.3.8 apresenta os valores das diferenças de coordenadas entre os dois *softwares* analisados.

Tabela 4.3.8 – Diferença de coordenadas entre os *softwares*

Ponto	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
PG02	1,2	-0,6	-1,1
MGE01	1,0	-0,4	0,6
MGE02	0,4	-0,5	-0,4
MGE03	0,3	-0,4	1,5
MGE06	-0,4	-0,8	-0,5
MGE07	0,2	-0,2	0,4
MGE11	0,5	-0,6	1,3
MGE13	0,5	0,6	0,6
MGE15	0,4	0,1	-0,2
MGE29	0,0	-0,7	1,3
MGE40	0,6	-0,2	0,1
MGE62	-0,6	-0,5	-0,2
Média	0,3	-0,3	0,3

Fonte: O Autor (2023).

Para avaliar, a partir de um determinado nível de confiança, se as diferenças entre os valores das coordenadas levantadas pelos *softwares* são estatisticamente significativas ou não, foi realizado o teste estatístico, através da distribuição de t de *Student*, formulando as seguintes hipóteses para um nível de confiança de 95%:

$$\text{Hipótese nula} \quad H_0 : X, Y, Z_{GeoMos} = X, Y, Z_{GeengMonitoramento} \quad (1)$$

$$\text{Hipótese alternativa} \quad H_a : X, Y, Z_{GeoMos} \neq X, Y, Z_{GeengMonitoramento} \quad (2)$$

Através da distribuição t de *Student*, o valor crítico tabelado para a estatística de teste com 2 graus de liberdade e nível de significância de 5% é de 4,303 para $t_{n-1, \alpha/2}$. A Tabela 4.3.9 apresenta os valores t das diferenças de coordenadas tridimensionais encontrados.

Tabela 4.3.9 – Valores de t de Student dos pontos levantados pelos *softwares*

Ponto	t_x	t_y	t_z	$t_{\text{Crítico}}$	H_0
PG02	0,478	-1,268	-0,622	$\pm 4,303$	Aceita
MGE01	2,552	-1,430	1,320	$\pm 4,303$	Aceita
MGE02	0,731	-1,946	-0,659	$\pm 4,303$	Aceita
MGE03	0,611	-1,502	3,133	$\pm 4,303$	Aceita
MGE06	-0,912	-3,056	-0,677	$\pm 4,303$	Aceita
MGE07	0,488	-0,799	0,619	$\pm 4,303$	Aceita
MGE11	2,101	-1,310	2,661	$\pm 4,303$	Aceita
MGE13	1,779	2,226	1,463	$\pm 4,303$	Aceita
MGE15	1,435	0,291	-0,570	$\pm 4,303$	Aceita
MGE29	0,090	-2,747	2,658	$\pm 4,303$	Aceita
MGE40	2,184	-0,422	0,156	$\pm 4,303$	Aceita
MGE62	-2,382	-1,977	-0,327	$\pm 4,303$	Aceita

Fonte: O Autor (2023).

Conforme a Tabela 4.3.9, todas as estatísticas calculadas apresentaram valores inferiores ao limite estabelecido pela estatística tabelada. Sendo assim, a hipótese nula é aceita para um nível de significância 5% e 2 graus de liberdade.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema MGEO poderá ser utilizado para fins didáticos, pesquisa ou até mesmo para fins comerciais sendo que o uso do sistema é por conta e risco do usuário. Dependendo da demanda, o sistema poderá ser atualizado e modificado para atender as necessidades dos usuários com novas funcionalidades e compatibilidade com mais modelos de Estação Total.

A proposta apresentada por esta pesquisa visa o desenvolvimento de um sistema gratuito de monitoramento geodésico que realiza a automatização da coleta de dados, do processamento, da análise e da representação da variação das coordenadas dos pontos monitorados ao longo do tempo, apresentado possíveis variações das coordenadas em tempo real.

Como visto, a utilização desta ferramenta além de dispensar o operador junto ao equipamento, também minimiza possíveis erros e automatiza o levantamento e o processamento dos dados, permitindo obter o resultado do monitoramento em tempo real.

Nesta pesquisa verificou-se que os resultados encontrados pelo MGEO são estatisticamente iguais aos resultados encontrados com o *software* já consolidado

no meio comercial utilizado, dentro de um nível de confiança de 95%. Com isso tem-se a validação do *software* desenvolvido, podendo ser utilizado para fins de monitoramento de estrutura.

Cabe ressaltar que os dados adquiridos pelo MGEO, assim como em outros *softwares* topográficos e geodésicos, inevitavelmente possuirão erros de observação. Este fato é reforçado por Gemaël, Machado e Wandresen (2015), que definem estes erros como propriedades dos dados. Entretanto, destaca-se que a tolerância dos erros (precisão) pode ser delimitada mutuamente com a finalidade do levantamento, ou seja, o levantamento realizado será aceitável ou não conforme a atividade-fim. Portanto, para fins de monitoramento geodésico de estruturas, a precisão dos resultados encontrados com o MGEO é compatível com a finalidade.

Salienta-se também que o sistema MGEO encontra-se na versão inicial e que atualizações serão incorporadas ao longo do tempo, pois esta pesquisa terá continuidade, buscando constante evolução.

REFERÊNCIAS

- CARVAJAL, R. F. A.; VEIGA, L. A. K. Desenvolvimento de interface para automação da coleta de temperatura baseada em redes multiestação aplicada ao monitoramento de estruturas empregando Estações Totais. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 3, 781-805, 2019.
- DA CRUZ, W. **Integração de dados de monitoramento de estruturas antrópicas. Estudo de caso: UHE Mauá**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2015.
- DEPARTMENT OF ARMY – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Manual 1110 - 1- 1004. **Deformation monitoring and control surveying**. Washington, DC, 1994.
- ENGEL, P.; SCHWEIMLER, B. Design and Implementation of a modern Automatic Deformation Monitoring System. **Journal of Applied Geodesy**, Neubrandenburg, Germany, 2016.
- GAIRNS, C. **Development of a Semi-automated System for Structural Deformation Monitoring Using a Reflectorless Total Station**. M.Sc. Thesis (Department of Geodesy and Geomatics Engineering), University of New Brunswick, New Brunswick, Canada, 2008.
- GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. 2. ed. Curitiba: Ed. UFPR. 2015. 428 p. (Série Pesquisa, n. 281).
- GOCA, GNSS/LPS/LS-based online Control and Alarm System. **Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft**. University of Applied Sciences. Disponível em: http://goca.info/index_e.html. Acesso em: 29 nov. 2018.
- JERKE, A. **Análise do monitoramento geodésico da barragem da usina hidrelétrica Mauá com equipamentos de diferentes precisões e diferentes softwares de processamento**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2019.
- KHEMAPECH I.; SANSRIMAHACHAI W.; TOAHCHOODEE M. A Real-time Health Monitoring and Warning System for Bridge Structures. **IEEE Region 10 Conference (TENCON) - Proceedings of the International Conference**. Tailândia, 2016, p. 3010-3013.
- LUTES, J. A. **Automated Dam Displacement Monitoring Using a Robotic Total Station**. M.Sc. Thesis (Department of Geodesy and Geomatics Engineering) - University of New Brunswick, New Brunswick, Canada, 2002.
- NADAL, M. A. D. **Controle e operação remota de Estações Totais robotizadas voltado à auscultação geodésica**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

WANG J.; FU Y.; YANG X. An integrated system for building structural health monitoring and early warning based on an Internet of things approach. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, China: 2017, p. 1-14.

ZHIMIN, L.; WENJIE, L. The latest development of dam Deformation Monitoring Automatic Technique. **Journal of Guilin Institute of Technology**, 2000.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido nesta pesquisa balizou-se no desenvolvimento de um sistema de monitoramento geodésico de estruturas. Para tal, com os dados obtidos em levantamento por estação total robótica, buscou-se verificar alguns dos fatores que podem influenciar no resultado do monitoramento geodésico. Demonstrou-se que os resultados encontrados analisando uma das campanhas com o vertedor aberto apresentaram valores incompatíveis com as forças exercidas na barragem. Paralelamente, constatou-se que dependendo do marco utilizado para a obtenção das coordenadas à montante, há a possibilidade de que a refração atmosférica, causada pelo reservatório de água, influencie no valor das coordenadas dos pontos de monitoramento à montante.

Desta forma, através do capítulo 2, verificou-se que a refração atmosférica causada pelo comportamento da água do reservatório ou vertida são um dos fatores determinantes para a qualidade dos resultados do monitoramento. Para minimização destes fatores concluiu-se que para a metodologia de automação do monitoramento geodésico de estruturas, os parâmetros ambientais como temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa do ar devem ser incorporados através de um dispositivo que colete e envie esses valores ao sistema em tempo real para realização das devidas correções no processamento dos dados.

No âmbito da automação na operação e controle de estações totais robotizadas, explorou-se o entendimento dos princípios de comunicação, transmissão de dados e funcionamento dos equipamentos através do desenvolvimento de um aplicativo. Como premissa, esse aplicativo foi capaz de estabelecer a comunicação com o instrumento de medição, comandar a movimentação do instrumento e executar as principais funções da estação total para o levantamento do monitoramento geodésico.

Portanto, através do capítulo 3, verificou-se que a criação de aplicativos para controlar equipamentos geodésicos, como as estações totais robotizadas, contribui para a redução da influência do observador durante o levantamento, fazendo com que o trabalho seja mais seguro, rápido e preciso.

Através do capítulo 4, foi desenvolvido um sistema que permite a automação da coleta e do processamento dos dados oriundos do levantamento por irradiação no monitoramento geodésico de estruturas. Este sistema é capaz de: controlar e

operar estações totais robotizadas; medir direções, ângulos zenitais e distâncias inclinadas dos pontos pré-determinados; incluir automaticamente as correções atmosféricas do ambiente no valor da distância inclinada; processar em tempo real os dados coletados; determinar as coordenadas tridimensionais dos pontos; e comparar com as coordenadas de campanhas anteriores. Este sistema contribui para o entendimento rápido do comportamento da estrutura através da automação do monitoramento geodésico.

Cabe ressaltar que a validação do sistema desenvolvido foi constatada, pois os resultados encontrados apresentaram valores estatisticamente iguais, dentro de um nível de confiança de 95%, aos valores encontrados através do *software* comercial já consolidado no mercado.

Por fim, neste trabalho foi possível propor uma metodologia para a automação do monitoramento geodésico através do desenvolvimento de um *software* livre que permite a automação da coleta e do processamento dos dados nos levantamentos realizados por irradiação no monitoramento de estruturas.

Salienta-se também que o sistema desenvolvido encontra-se em sua versão inicial e recomenda-se fortemente que as contribuições desta pesquisa continuem em constante evolução.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para realização de trabalhos futuros, recomenda-se algumas opções:

- Criar um banco de dados para armazenamento das campanhas de monitoramento a fim de facilitar a comparação de coordenadas de diferentes campanhas;
- Desenvolver a opção de automatizar o levantamento e o processamento da Rede Geodésica de Referência;
- Incorporar ao *software* a opção de oferecer ao usuário por qual método de ajustamento deseja processar.
- Permitir o controle e operação de estações totais robotizadas de mais marcas e modelos;
- Compatibilizar os dados para ambientes de computação em nuvem;
- Migrar o MGEO para versão aplicativo de celular;

- Inserir as funcionalidades para os outros instrumentos geodésicos, como receptores GNSS, Laser Scanner Terrestre, etc.

REFERÊNCIAS

AGUILAR, C. A. A.; CARVAJAL, F. A. R. **Validación de sistema de punteria automatica en levantamientos topográficos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Cartográfica). Universidad de Santiago de Chile, Santiago, 2014.

ALVES, S. S. O.; CARVAJAL, R. F. A.; SAMPAIO, L. F.; MEDEIROS, L. I. B.; VEIGA, L. A. K. Avaliação laboratorial da parametrização de dados LST em superfícies planas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, n. 3, 384-398, 2020.

ANA. **Manual do Empreendedor – Volume VI - Guia para a Construção de Barragens**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2015.

ANA. **Agência Nacional de Águas**. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/cadastros/barragens/>. Acesso em: 20/10/2018.

CARVAJAL, F. A. R. **Automação da correção da primeira velocidade em medidas eletrônicas de distância com base em rede de observação de parâmetros ambientais Multi-estações**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2019.

CARVAJAL, R. F. A.; VEIGA, L. A. K. Desenvolvimento de interface para automação da coleta de temperatura baseada em redes multiestação aplicada ao monitoramento de estruturas empregando Estações Totais. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 3, 781-805, 2019.

CHEN, X.; HUANG, T. LIU L. A; SHEN Y. **Application of GeoMos in automatic monitoring of the protected area of subway**. p. 36-51. Master of Science Thesis. School of Earth Sciences and Engineering, Hehai University. China, 2013.

CHRZANOWSKI, A.; SZOSTAK-CHRZANOWSKI, A. Deformation monitoring surveys – Old problems and new solutions. **Journal of Technical Sciences**, v. 21, n. 3, p. 47-60, 2009.

DA CRUZ, W. **Integração de dados de monitoramento de estruturas antrópicas. Estudo de caso: UHE Mauá**. Tese de Doutorado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2015.

DABOVE, P.; GRASSO, N.; PIRAS, M. Smartphone-Based Photogrammetry for the 3D Modeling of a Geomorphological Structure. **Applied Sciences**, v. 18, n. 9, 3884-1904, 2019.

ENGEL, P.; SCHWEIMLER, B. Design and Implementation of a modern Automatic Deformation Monitoring System. **Journal of Applied Geodesy**, Neubrandenburg, Germany, 2016.

ENGEL, P.; SCHWEIMLER, B. **Open Source Software development in Geodesy**. In Neubrandenburg University of Applied Sciences. Disponível em:

https://www.fig.net/resources/proceedings/2016/2016_03_jisdms/pdf/reviewed/JISDM_2016_submission_58.pdf. Acesso em: 13/05/2022.

FINIZOLA, A. B.; RAPOSO, E. H. S.; PEREIRA M. B. P. N.; GOMES, W. S. ARAÚJO A. L. S. O.; SOUZA F. V. C. O ensino de programação para dispositivos móveis utilizando o MIT-App Inventor com alunos do ensino médio. **Anais do Workshop de Informática na Escola**, 337, 2014.

FISSORE, F.; MASIERO, A.; PIRAGNOLO, M.; PIROTTI, F.; GUARNIERI, A.; VETTORE, A. Towards Surveying with a Smartphone. In: CEFALO, R., ZIELIŃSKI, J., BARBARELLA, M. (eds). **New Advanced GNSS and 3D Spatial Techniques**. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer, Cham, 2018. p. 167-176.

FOROUZAN, B. A. **Comunicação de dados e redes de computadores**. São Paulo, Editora AMGH, 2010. 4p.

GAIRNS, C. **Development of a Semi-automated System for Structural Deformation Monitoring Using a Reflectorless Total Station**. M.Sc. Thesis (Department of Geodesy and Geomatics Engineering), University of New Brunswick, New Brunswick, Canada, 2008.

GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. 2. ed. Curitiba: Ed. UFPR. 2015. 428 p. (Série Pesquisa, n. 281).

GIKAS, V.; DASKALAKIS, S. Determining Rail Track Axis Geometry Using Satellite and Terrestrial Geodetic Data. **Survey Review**, v. 310, n. 40, 392-405, 2008.

GOCA, GNSS/LPS/LS-based online Control and Alarm System. **Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft**. University of Applied Sciences. Disponível em: http://goca.info/index_e.html. Acesso em: 29 nov. 2018.

HAUK, M.; KIRT, C.; ACKERMANN, C. Experiences with the Qdaedalus system for astrogeodetic determination of deflections of the vertical. **Survey Review**, v. 355, n. 49, 294-301, 2017.

IGS. **International GNSS Service**. Disponível em: <http://igs.cb.jpl.nasa.gov>. Acesso em: 15/10/2018.

JÄGER, R.; SPOHN, P; **GOCA**. In Hochschule Karlsruh Technik und Wirtschaft. Disponível em: http://goca.info/index_e.html. Acesso em: 21/11/2018.

JERKE, A. **Análise do monitoramento geodésico da barragem da usina hidrelétrica Mauá com equipamentos de diferentes precisões e diferentes softwares de processamento**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2019.

JERKE, A.; FAGGION, P. L.; DA CRUZ, W. **Fatores que influenciam no monitoramento geodésico de barragens utilizando estação total**. Revista de Geociências do Nordeste, v. 8, n. 1, p. 47–59, 2022.

JERKE, A.; RODRIGUEZ, F. A. C.; MEDEIROS, L. I. B. de; SAMPAIO, L. F.; ALVES, S. de 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, v. 8, n. 2, p. 102–113, 2022.

JINGZHAN, Z. Application of TCA2003 Total Station to surface deformation observation for Ertan Dam. **Academic Journal Eletronic**, v. 63, n. 45, p. 34-38, 2002.

KHEMAPECH I.; SANSRIMAHACHAI W.; TOAHCHOODEE M. A Real-time Health Monitoring and Warning System for Bridge Structures. **IEEE Region 10 Conference (TENCON) - Proceedings of the International Conference**. Tailândia, 2016, p. 3010-3013.

LACTEC. **Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento**. Disponível em: <http://www.lactec.org.br>. Acesso em: 15/10/2018.

LEICA. Leica Geosystems. **Leica TPS1200-GeoCOM Getting Started Manual**. Suíça, 2006.

LEICA. Leica Geosystems. **TS15 User Manual**. Suíça, 2015.

LEVIN, E.; NADOLINETS, N.; AKHMEDOV, D. **Surveying Instruments and Technology**. New York, USA: Taylor & Francis Group, 2017. 82p.

LINDENBERGH, Roderik; PIETRZYK, Peter. Change detection and deformation analysis using static and mobile laser scanning. **Applied Geomatics**, v. 7, n. 2, p.65-74, 9 jan. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12518-014-0151-y>.

LOUREIRO, A. A. F.; NOGUEIRA, J. M. S.; RUIZ, L. B.; MINI, D. A. DE F.; NAKAMURA, E. F.; FIGUEIREDO, C. M. S. Redes de Sensores Sem Fio. **Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores**, 179-226, 2003.

LOVAS, T., et. al. **Terrestrial laser scanning in deformation measurements of structures**. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, 37., 2008, Beijing, p. 527–532.

LUTES, J. A. **Automated Dam Displacement Monitoring Using a Robotic Total Station**. M.Sc. Thesis (Department of Geodesy and Geomatics Engineering) - University of New Brunswick, New Brunswick, Canada, 2002.

MEDEIROS, L. I. B. **Monitoramento dinâmico de estruturas por diferentes técnicas geodésicas simultaneamente: estudo de caso de um ponto da passarela Politécnico Botânico da UFPR**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2020.

MEDEIROS, L. I. B.; FAGGION, P. L.; ALVES, S. S. O. Análise do Desempenho de ETR no Monitoramento Dinâmico de Estrutura Metálica por Leitura Contínua de Direções. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, n. 2, 280-293, 2020.

MELLO, F. M. **A importância dos reservatórios formados por barragens.** Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2013.

MLENEK, D. C.; VEIGA, L. A. K.; PALAZZO, D. R.; SILVA L. F. Monitoramento dinâmico de estruturas: Estudo comparativo entre técnicas. **Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Exposicarta**, 14-18, 2017.

NADAL, M. A. D. **Controle e operação remota de Estações Totais robotizadas voltado à auscultação geodésica.** Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2008.

NADAL, M. A. D.; VEIGA, L. A. K.; FAGGION, P. L.; NADAL, C. A.; SOARES, M. A. Emprego de estações totais robotizadas na automação, controle e aquisição de dados, voltado ao monitoramento de barragens. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 5, n. 1, 18-30, 2017.

NGS. **National Geodetic Survey.** Disponível em: <http://www.ngs.noaa.gov>. Acesso em: 15/10/2018.

OLIVEIRA, D. P.; VAZ, L. R. Desenvolvimento de aplicativo para smartphone destinado ao projeto geométrico de estradas. **VI Encontro de Iniciação à Docência – Universidade do Vale do Paraíba**, 1-6, 2016.

OMIDALIZARANDI, M.; PAFFENHOLZ, J. A.; NEUMANN, I. Automatic and accurate passive target centroid detection for applications in engineering geodesy. **Survey Review**, v. 4, n. 9, 1-16, 2018.

PETRIE, G.; TOTH, C. K. **Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing.** Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2018.

RUSU, Radu Bogdan *et al.* Towards 3D Point cloud based object maps for household environments. **Robotics And Autonomous Systems**, Garching Bei München, v. 11, n. 56, p. 927-941, ago. 2008.

SETAN, H.; IDRIS, K. M. Automation in Data Capture and Analysis for Industrial/Deformation Surveying Using Robotic Total Station. **Integrating Generations FIG Working Week**, 2008.

SIGUEL, A. R. **Monitoramento da barragem da UHE Mauá utilizando irradiação tridimensional.** 104f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, 2013.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e comportamento de Fundações de Barragens de concreto.** São Paulo: Oficina de textos, 2003.

SILVEIRA, P. D. N.; MENDES, V. F.; FERRARI, J. L. Aplicativo com processamento em tempo real para levantamento topográfico testado em área de produção cafeeira. **Coffee Science**, v. 12, n. 3, 297-306, 2017.

TEDESCHI, A. L.; FAGGION, P. L.; ANDOLFATO, S. H. D. Validação do sistema de automação de nível digital aplicado na determinação de recalques. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 2, 352-370, 2017.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Deformation monitoring and control surveying**. Washington, 1994.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Structure Deformation Surveying**: Engineering Manual. Washington, 2018.

URADZIŃSKI, M.; BAKULA, M. Assessment of Static Positioning Accuracy Using Low-Cost Smartphone GPS Devices for Geodetic Survey Points' Determination and Monitoring. **Applied Sciences**, v. 10, n. 15, 5308-5330, 2020.

VEIGA, L. A. K. **Sistema para mapeamento automatizado em campo: conceitos, metodologia e implantação de um protótipo**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

WANG J.; FU Y.; YANG X. An integrated system for building structural health monitoring and early warning based on an Internet of things approach. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, China: 2017, p. 1-14.

WENCHUN, Z.; ZHENGYUAN, X. Research and Application of Modern Geomatics Technology in the Deformation Monitoring of Metro Tunnel. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, v. 40, n. 12, p. 2257-2265, 2018.

WILKINS, R.; BASTIN, G.; CHRZANOWSKI A. Alert: a fully automated real time monitoring system. **11th FIG Symposium on Deformation Measurements**, 2003.

WRÓŚYŃSKI, R.; PYSZNY, K.; SOJKA, M.; PRZYBYŁA, C.; MURAT-BŁAŚJEWSKA, S. Ground volume assessment using 'Structure from Motion' photogrammetry with a smartphone and a compact camera. **Open Geosciences**, v. 9, n. 1, 281-294, 2017.

ZHIMIN, L.; WENJIE, L. The Latest development of dam deformation monitoring automatic technique. **Journal of guilin institute of technology**, 2000.

ZOU, J.; ZHU, Y.; XU, Y. Mobile precise trigonometric levelling system based on land vehicle: an alternative method for precise levelling. **Survey Review**, v. 355, n. 49, 249-258, 2017.