

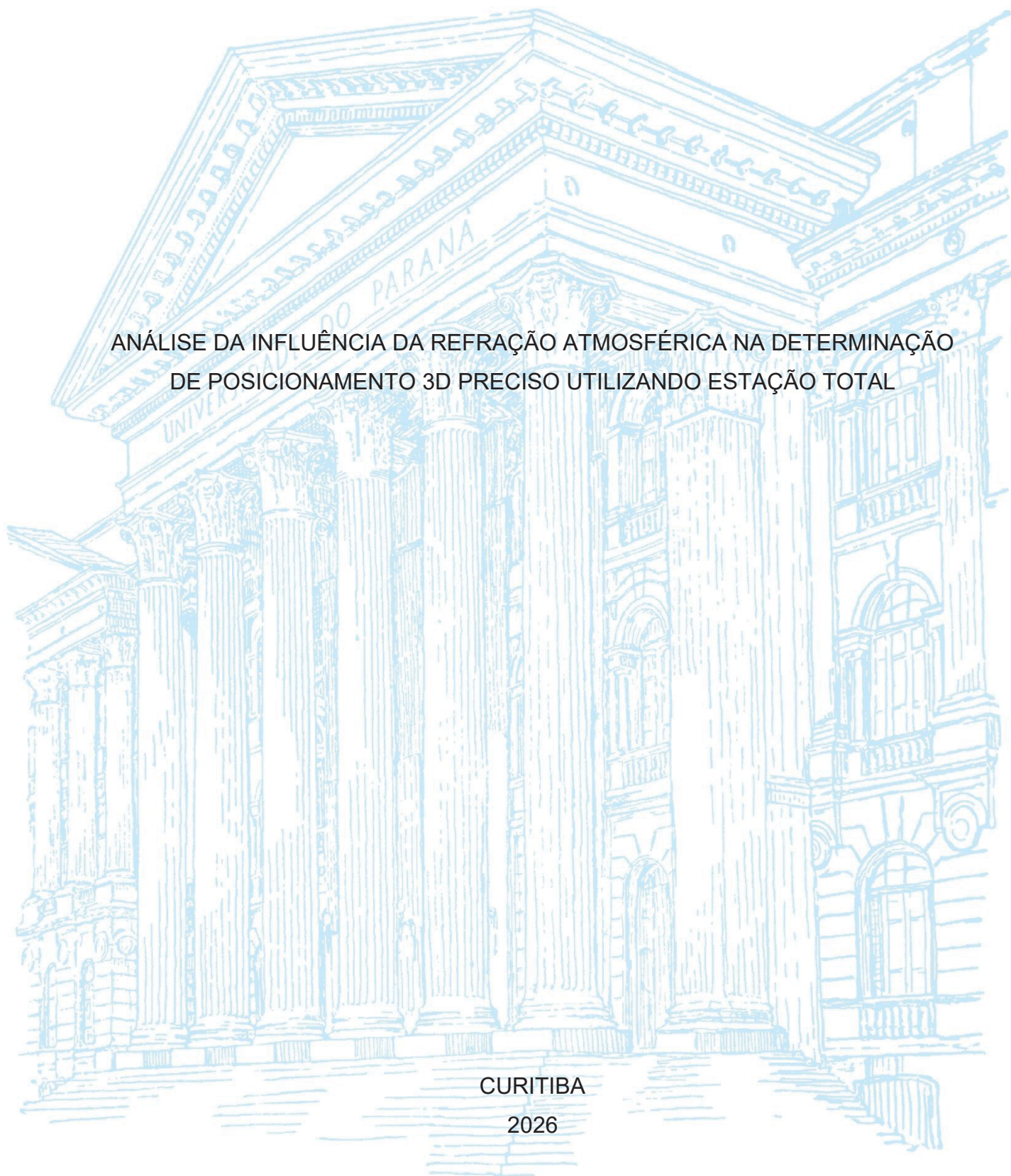
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DAYANE WIGGERS

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA REFRAÇÃO ATMOSFÉRICA NA DETERMINAÇÃO  
DE POSICIONAMENTO 3D PRECISO UTILIZANDO ESTAÇÃO TOTAL

CURITIBA

2026



DAYANE WIGGERS

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA REFRAÇÃO ATMOSFÉRICA NA DETERMINAÇÃO  
DE POSICIONAMENTO 3D PRECISO UTILIZANDO ESTAÇÃO TOTAL

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

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

CURITIBA

2026

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

Wiggers, Dayane

Análise da influência da refração atmosférica na determinação de posicionamento 3D preciso utilizando estação total / Dayane Wiggers. – Curitiba, 2026.

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. Usinas hidrelétricas. 2. Geodésia. 3. Refração. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. III. Faggion, Pedro Luis. IV. Cruz, Wander da. V. Título.

Bibliotecário: Douglas Lenon da Silva CRB-9/1892



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS  
GEODÉSICAS - 40001016002P6

## 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 **DAYANE WIGGERS**, intitulada: **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA REFRAÇÃO ATMOSFÉRICA NA DETERMINAÇÃO DE POSICIONAMENTO 3D PRECISO UTILIZANDO ESTAÇÃO TOTAL**, sob orientação do Prof. Dr. PEDRO LUIS FAGGION, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

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

CURITIBA, 27 de Março de 2026.

Assinatura Eletrônica

03/04/2026 13:15:40.0

PEDRO LUIS FAGGION

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

01/04/2026 10:45:03.0

IRINEU DA SILVA

Avaliador Externo (ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS -  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EESC-USP)

Assinatura Eletrônica

30/03/2026 14:43:34.0

LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

10/04/2026 07:57:31.0

FABIANI DAS DORES ABATI MIRANDA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO  
PARANÁ - UTFPR)

---

Centro Politécnico - Caixa Postal 19001 - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3153 - E-mail: cpgcg@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 528979

**Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>  
e insira o código 528979**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado saúde, persistência e sabedoria para cursar esse doutorado, à minha família, minha mãe Lurdes, irmã Juliana, que sempre me apoiaram na finalização dessa tese e incentivaram a buscar novos conhecimentos e desafios, ao meu filho João que indiretamente me incentiva todos os dias a ser uma pessoa melhor e a não desistir, aos meus orientadores Prof. Dr. Pedro Luis Faggion e Wander da Cruz, pela ajuda e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho e principalmente na finalização, diante de tantos obstáculos, aos professores Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga, Prof. Dr. Irineu da Silva e Prof. Dr. Wilson Alcântara Soares, pelas contribuições e direcionamentos desta pesquisa. Aos meus colegas e amigos, Andrea, Andreas, Fabiane, Samir, Túlio, Christian, Rovane, Nicolas, Iane, Livia, Paulo, Suzana, Mario e Maria, que me ajudaram em tantos momentos.

A Universidade Federal do Paraná (UFPR), o Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) e o Laboratório de Geodésica Aplicado a Engenharia (GEENG), a Copel, pela parceria e disponibilização do espaço para o estudo.

## RESUMO

Esta tese, estruturada na forma de artigos, apresenta os resultados de um estudo sobre os efeitos da refração atmosférica no posicionamento preciso de pontos na superfície terrestre utilizando estação total. O estudo de caso foi realizado na barragem da UHE Governador Jayme Canet Junior, localizada no estado do Paraná, Brasil. O primeiro artigo investiga influência das variações de temperatura, pressão e umidade ao longo do dia na determinação das coordenadas de pontos de monitoramento situados na crista da barragem, utilizando irradiação topográfica com estação total, a partir de três marcos geodésicos, que compõem a rede de referência topográfico utilizada no monitoramento da barragem, permitindo a vinculação das medições locais a um sistema de referência geodésico. O segundo artigo analisa os efeitos da refração atmosférica na determinação de desníveis, através do nivelamento trigonométrico, utilizando dados do método de nivelamento geométrico de primeira ordem como referência. O índice de refração local foi calculado de forma recíproca e simultânea entre três pilares nas margens da barragem em diferentes períodos do dia. Os resultados indicam que, mesmo após correções das distâncias em relação às condições meteorológicas, as coordenadas calculadas no primeiro artigo apresentaram discrepâncias, possivelmente devido aos efeitos da refração nas medições. Observou-se também que as coordenadas médias foram influenciadas pela posição do pilar onde a estação total foi instalada no levantamento, sendo que as maiores variações ocorreram no período da manhã, o que sugere que a incidência solar altera a temperatura do ar e, conseqüentemente, o índice de refração. No segundo artigo os resultados mostraram melhorias nos desníveis calculados em comparação com o valor de  $k = 0,13$ , exceto para o Pilar 3, onde a umidade devido à névoa gerada pela vazão da água pelos vertedouros afetou as medições.

**Palavras-chave:** Usina hidrelétrica; monitoramento geodésico; refração atmosférica.

## ABSTRACT

This thesis, structured in the form of articles, presents the results of a study on the effects of atmospheric refraction on the precise positioning of points on the Earth's surface using a total station. The case study was conducted at the Governador Jayme Canet Junior Hydroelectric Power Plant dam, located in the state of Paraná, Brazil. The first article investigates the influence of variations in temperature, pressure, and humidity throughout the day on the determination of coordinates of monitoring points located along the crest of the dam. This was carried out using topographic radiation with a total station from three geodetic benchmarks, which compose the topographic reference network used in the dam monitoring system, enabling the connection of local measurements to a geodetic reference system. The second article analyzes the effects of atmospheric refraction on the determination of height differences through trigonometric leveling, using first-order geometric leveling data as a reference. The local refraction index was calculated reciprocally and simultaneously between three pillars located on the margins of the dam at different times of the day. The results indicate that, even after correcting distances according to meteorological conditions, the coordinates calculated in the first article showed discrepancies, possibly due to the effects of refraction on the measurements. It was also observed that the average coordinates were influenced by the position of the pillar where the total station was set up during the survey, with the greatest variations occurring in the morning period. This suggests that solar radiation alters air temperature and, consequently, the refraction index. In the second article, the results showed improvements in the calculated height differences compared to the standard value of  $k = 0.13$ , except for Pillar 3, where humidity caused by mist generated from water discharge over the spillways affected the measurements.

**Key words:** Hydroelectric power plant; geodetic monitoring; atmospheric refraction.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PRINCÍPIO DO MÉTODO DE COMPARAÇÃO DE FASE .....	18
FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO COORDENADAS POLAR.....	19
FIGURA 3 – NIVELAMENTO GEOMÉTRICO.....	23
FIGURA 4 – OBTENÇÃO DO DESNÍVEL NO NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO .....	26

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	8
1.2 HIPÓTESE .....	9
1.3 OBJETIVOS .....	10
1.3.1 OBJETIVO GERAL.....	10
1.3.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	10
1.4 JUSTIFICATIVA .....	11
1.5 ESTRUTURA DA TESE .....	13
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>15</b>
2.1 DETERMINAÇÃO COORDENADAS PLANIMÉTRICAS.....	16
2.1.1 Erros associados as medições com estação total .....	20
2.2 NIVELAMENTO.....	22
2.2.1 Nivelamento Geométrico .....	22
2.2.2 Nivelamento Trigonométrico.....	24
2.3 REFRAÇÃO ATMOSFÉRICA EM MEDIÇÕES GEODÉSICAS.....	28
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>31</b>
<b>4 ARTIGOS DESENVOLVIDOS</b> .....	<b>34</b>
4.1 ANÁLISE DOS EFEITOS DA REFRAÇÃO NO MONITORAMENTO DE BARRAGENS ESTUDO DE CASO UHE GOVERNADOR JAYME CANET JUNIOR	34
4.2 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL UTILIZANDO VISADAS RECÍPROCAS E SIMULTÂNEAS ANÁLISE DE SUA APLICAÇÃO NO CÁLCULO DO DESNÍVEL UTILIZANDO NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO	49
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>69</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No Brasil, segundo o Relatório de Síntese do Balanço Energético Nacional, cerca de 57% da energia gerada é proveniente de usinas hidrelétricas (Empresa de Pesquisa Energética, 2025). No entanto, falhas ou colapsos nessas estruturas podem ocasionar impactos significativos nos âmbitos social, econômico, ambiental e humano, o que torna essencial o monitoramento contínuo e preciso dessas obras.

O monitoramento de estruturas tem como objetivo identificar possíveis deslocamentos e garantir sua integridade ao longo do tempo. No entanto, no Brasil, na prática, fatores como custo, logística e exigências normativas fazem com que apenas estruturas consideradas críticas sejam monitoradas de forma sistemática. Em países onde há maior disponibilidade de recursos e políticas mais consolidadas de segurança de barragens, esse monitoramento tende a ser mais abrangente e frequente. Nesse contexto, os métodos geodésicos destacam-se por possibilitarem a determinação de coordenadas com alta precisão, sendo amplamente utilizados no monitoramento de estruturas como barragens.

Entre as técnicas empregadas, destacam-se o uso de estações totais e de Sistemas de Navegação Global por Satélite (GNSS), que permitem a determinação de coordenadas tridimensionais de pontos da estrutura. No caso das estações totais, as medições são realizadas por meio da propagação de ondas eletromagnéticas, sendo, portanto, influenciadas pelas condições atmosféricas ao longo do percurso entre o instrumento e o alvo.

As variações de temperatura, pressão e umidade afetam diretamente a densidade do ar e, conseqüentemente, a velocidade e a trajetória das ondas eletromagnéticas, impactando na precisão das medições. Esse efeito é particularmente relevante em ambientes heterogêneos, como regiões de barragens, onde há presença de uma grande quantidade de água represada, vegetação e a própria área da barragem em concreto, o que favorece a formação de gradientes atmosféricos.

Apesar da aplicação de correções baseadas em parâmetros meteorológicos e da utilização de valores aproximados para o coeficiente de refração vertical, esses procedimentos nem sempre são suficientes para representar adequadamente as condições reais em campo. Como consequência, podem ocorrer discrepâncias na determinação de coordenadas e desníveis, comprometendo a precisão dos resultados.

Além disso, os efeitos da refração atmosférica não se limitam apenas às medições de distância, podendo também influenciar nas direções horizontais e os ângulos verticais, impactando diretamente a determinação das coordenadas. Esses efeitos tornam-se ainda mais complexos quando considerado a variabilidade das condições ambientais ao longo do dia e da linha de visada adotada nos levantamentos.

Diante desse contexto, este trabalho investiga os efeitos da refração atmosférica em medições realizadas com estação total em uma área de barragem de geração de energia, especificamente na Usina Hidrelétrica Governador Jayme Canet Junior, considerando a variabilidade das condições ambientais ao longo do dia e seus impactos na precisão dos resultados obtidos.

A pesquisa envolve a análise da influência desses efeitos na determinação de coordenadas e desníveis, bem como a estimativa do índice de refração vertical local e sua relação com os parâmetros atmosféricos observados.

A tese está estruturada na forma de artigos. O primeiro analisa as variações de temperatura, pressão e umidade na determinação de coordenadas por irradiação topográfica. O segundo investiga os efeitos da refração na determinação de desníveis por nivelamento trigonométrico, com base na estimativa do índice de refração local.

## 1.2 HIPÓTESE

Uma vez mitigadas as principais fontes de erros grosseiros e sistemáticos nas medições realizadas com estação total, admite-se que as discrepâncias observadas nas coordenadas 3D sejam decorrentes da variabilidade do índice de refração atmosférica. Dessa forma, a comparação entre os resultados obtidos a partir de diferentes posições e sob diferentes

condições atmosféricas ou em comparação com valores de referência é possível quantificar a amplitude da influência da refração na determinação das coordenadas.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a influência da refração atmosférica na determinação de posicionamento 3D utilizando estação total

#### 1.3.2 Objetivo específicos

- Analisar a influência das variações de temperatura, pressão e umidade nas medições geodésicas realizadas por meio de estação total na área de barragem;
- Avaliar o efeito da refração atmosférica na determinação das coordenadas de pontos de monitoramento situados na crista da barragem;
- Comparar as coordenadas obtidas em diferentes períodos do dia e a partir de pilares distintos, analisando a variabilidade e a precisão dos resultados;
- Determinar o coeficiente de refração vertical ( $k$ ) a partir de medições com visadas recíprocas e simultâneas, utilizando como referência desníveis obtidos por nivelamento geométrico de alta precisão;
- Estabelecer uma relação entre os desníveis trigonométrico e as variações das densidades do ar;
- Avaliar a influência do índice de refração local na determinação de desníveis por meio do nivelamento trigonométrico;
- Comparar os desníveis obtidos com o uso de um coeficiente de refração ( $k = 0,13$ ) e aqueles calculados a partir das condições atmosféricas locais;

- Investigar a relação entre as condições atmosféricas locais e a variabilidade do índice de refração ao longo das diferentes linhas de visada.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

A obtenção de coordenadas tridimensionais com alta precisão é um dos principais requisitos no monitoramento geodésico de estruturas, especialmente quando se busca identificar deslocamentos milimétricos ao longo do tempo. Nesse contexto, as estações totais destacam-se como instrumentos amplamente utilizados, permitindo a determinação de direções horizontais, ângulos vertical e distâncias inclinadas por meio da propagação de ondas eletromagnéticas. Entretanto, independentemente do método ou equipamento empregado, as medições geodésicas estão sujeitas a diferentes fontes de erro, que precisam ser compreendidas, modeladas e corrigidas (Ghilani; Wolf, 2012; Gemael; Machado; Wandresen, 2015).

Entre essas fontes, a refração atmosférica se destaca como uma das mais relevantes, sendo responsável por influenciar significativamente os resultados das medições (Hennes, 2002; Ingesand, 2008). Esse fenômeno está diretamente relacionado às variações de temperatura, pressão e umidade, que afetam o índice de refração do ar ao longo do trajeto da onda eletromagnética (Torge, 2001; Brunner, 1984). Como consequência, ocorrem alterações na direção da linha de visada, na velocidade de propagação e na curvatura do feixe, impactando tanto as medições de distância inclinada quanto direções horizontais, ângulos vertical (Hennes, 1998).

Além disso, a maioria das medições geodésicas é realizada na camada mais próxima à superfície terrestre, chamada de troposfera, onde as condições atmosféricas são mais instáveis. Nessa região, os efeitos da turbulência atmosférica, associados à troca de calor entre o solo e o ar, à velocidade do vento e à presença de obstáculos, influenciam diretamente as observações (Schaal, 1995).

Em ambientes heterogêneos, como áreas de barragens, esses efeitos tornam-se ainda mais significativos, uma vez que a presença de grandes volumes de água, superfícies de concreto e vegetação favorecem a formação de

gradientes térmicos e variações das condições atmosféricas (Brys; Justyniak, 2016).

Diversos estudos têm buscado compreender e modelar os efeitos da refração atmosférica, propondo equações ou abordagens para sua estimativa (Schaal, 1995; Ruger, 1996; Bockem et al., 2000; Torge, 2001; Tsoulis; Petrovic; Kilian, 2008; Geiger; Aron; Todhunter, 2009; Hirt et al., 2010 Redovnikovic, Alisic e Luketic (2013); Yuequian et al., 2017). No entanto, a aplicação desses modelos, em geral, depende da obtenção de gradientes de temperatura com alta precisão ao longo de todo o percurso da onda, o que nem sempre é viável em condições reais de campo (Redovnikovic, Alisic e Luketic, 2013).

Na prática, são adotadas estratégias para minimizar esses efeitos, como o uso de instrumentos com sistemas de correção incorporados, a realização de medições em períodos de maior estabilidade atmosférica e a aplicação de modelos baseados em dados meteorológicos (Torge, 2001). Contudo, tais abordagens nem sempre representam adequadamente as condições reais, uma vez que o índice de refração varia em função do comprimento de onda e das condições atmosféricas ao longo de todo o trajeto da onda (Brunner, 1984; Rueger, 1996).

Além disso, a utilização de valores aproximados para o coeficiente de refração vertical, como o valor de 0,13 proposto por Gauss, pode não ser representativa para diferentes regiões, tornando necessária sua determinação local (Wiggers, 2019). Estudos experimentais indicam que esse coeficiente varia em função de fatores como a altura do instrumento em relação ao solo e as condições atmosféricas do ambiente (Brocks, 1950).

Apesar dos avanços na área, ainda existem lacunas importantes relacionadas à compreensão dos efeitos da refração atmosférica em condições reais de campo e heterogêneas. Destacam-se, nesse contexto, a limitada investigação dos impactos nas coordenadas planimétricas, a variabilidade desses efeitos ao longo do dia e a influência da posição de onde estão sendo levantados os dados. Adicionalmente, a relação entre os parâmetros atmosféricos e os erros observados apresenta comportamento complexo e não linear, o que dificulta sua modelagem precisa.

Nesse sentido, estudos recentes têm buscado avançar na análise desses efeitos. A metodologia proposta por Wiggers (2019) possibilitou a

estimativa do índice de refração vertical a partir da comparação entre nivelamento geométrico e trigonométrico. De forma complementar, trabalhos como o de Redovnikovic, Alisic e Luketic (2013) investigaram os efeitos da refração lateral, analisando a influência de gradientes de temperatura nas direções horizontais.

Diante desse contexto, justifica-se a realização de estudos que permitam avaliar, de forma integrada, a influência das condições atmosféricas nas medições geodésicas, especialmente em ambientes como barragens de geração de energia. A compreensão do comportamento de parâmetros como temperatura, pressão e umidade ao longo do dia é essencial para a determinação mais adequada do índice de refração local e para a correção de seus efeitos.

Assim, esta pesquisa se justifica pela necessidade de investigar os efeitos da refração atmosférica em medições realizadas com estação total, considerando a variabilidade das condições ambientais ao longo do dia em uma área de barragem. A partir da análise de dados, busca-se avaliar a influência desses efeitos na determinação de coordenadas e desníveis, bem como estimar o índice de refração vertical local e compreender sua relação com os parâmetros atmosféricos observados.

De forma a contribuir com o avanço do conhecimento na área de monitoramento geodésico, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de metodologias mais adequadas às condições reais de campo e para o aumento da precisão e confiabilidade das medições.

## 1.5 ESTRUTURA DA TESE

Esse trabalho será organizado na forma de artigos, onde o primeiro capítulo apresenta a introdução, hipótese, os objetivos, geral e específico, a serem alcançados e a justificativa.

O segundo capítulo apresenta uma fundamentação teórica geral, e o terceiro capítulo apresenta os materiais e métodos de desenvolvimento da tese.

No quarto capítulo são apresentados os artigos desenvolvidos, já publicados em periódicos, classificados como A2, conforme Qualis periódico da

capes, no quadriênio 2017- 2020. No último capítulo são apresentadas as considerações finais de todo trabalho realizado.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O monitoramento geodésico envolve a aplicação de métodos destinados a acompanhar possíveis deslocamentos em grandes estruturas, contribuindo para a avaliação de sua segurança e estabilidade ao longo do tempo. Para esse fim, podem ser empregados métodos geodésicos e geotécnicos, que se diferenciam principalmente quanto ao tipo de observação e ao referencial adotado.

Nos métodos geotécnicos, a estrutura é analisada por meio de instrumentos como extensômetros, piezômetros, pêndulos e fibras ópticas, que permitem a avaliação de deslocamentos relativos, ou seja, entre pontos pertencentes à própria estrutura. Esses métodos fornecem informações detalhadas sobre o comportamento interno da estrutura, porém limitam-se, em geral, a medições locais (Dunnicliff, 1993).

Por outro lado, nos métodos geodésicos, os deslocamentos são determinados em relação a um sistema de referência externo à estrutura, materializado por pontos considerados estáveis. Dessa forma, é possível avaliar deslocamentos absolutos, permitindo a detecção de deformações, padrões de movimentação e possíveis instabilidades estruturais.

Neste trabalho, o monitoramento é realizado por meio de métodos geodésicos, nos quais as coordenadas de pontos materializados na estrutura são determinadas ao longo do tempo, possibilitando a análise de suas variações e, conseqüentemente, a identificação de possíveis deslocamentos.

Entretanto, a precisão dessas determinações depende diretamente da qualidade das observações realizadas, as quais podem ser influenciadas por diversos fatores, dentre os quais se destacam as condições atmosféricas. A refração atmosférica, resultante das variações espaciais da densidade do ar, associadas principalmente à temperatura, pressão e umidade, provoca a curvatura da trajetória da onda eletromagnética utilizada nas medições com estação total. Esse fenômeno pode introduzir erros nas observações de ângulos e distâncias, afetando, conseqüentemente, a determinação das coordenadas e dos desníveis dos pontos monitorados.

## 2.1 DETERMINAÇÃO COORDENADAS PLANIMÉTRICAS

A determinação das coordenadas de um ponto pode ser realizada a partir de observações obtidas com estações totais, instrumentos projetados para medir ângulos verticais, direções horizontais e distâncias inclinadas. O funcionamento desses equipamentos baseia-se na obtenção dessas medidas, que, associadas a um sistema de referência e a pontos de coordenadas conhecidas, permitem o cálculo das coordenadas do ponto de interesse. A posição do ponto é, portanto, determinada de forma relativa, em função de uma direção de referência e de uma distância medida.

A precisão das medições é influenciada por fatores como a precisão nominal e o estado de calibração do instrumento, as condições atmosféricas e a técnica de medição empregada.

No contexto da determinação de coordenadas planimétricas, a posição do ponto no plano horizontal é obtida a partir da integração de observações angulares e lineares, cuja qualidade depende diretamente do desempenho dos sistemas de medição da estação total e das condições sob as quais as medições são realizadas. Nesse sentido, a compreensão do funcionamento desses sistemas é fundamental para a análise da precisão e confiabilidade das coordenadas obtidas.

Dentre os sistemas que compõem a estação total, destacam-se aqueles responsáveis pelas medições lineares e angulares, os quais atuam de forma integrada na determinação das coordenadas do ponto de interesse. O dispositivo de medição de distância é constituído por um oscilador e transmissor, um receptor, um medidor de fase ou pulso, um microprocessador e um detector (Torge, 2001). Os círculos horizontais e verticais da estação total são controlados por um microprocessador, que realiza uma varredura óptico-eletrônica e posterior interpolação, utilizando um micrômetro eletrônico.

O nivelamento do instrumento é realizado por meio de compensadores eletrônicos de duplo eixo, responsáveis pela correção automática de pequenas inclinações em relação à vertical. Esses sistemas são frequentemente associados a sensores digitais de inclinação, que permitem monitoramento contínuo durante as medições, reduzindo a influência de erros de nivelamento e contribuindo para a consistência das observações. Ainda assim, o nivelamento

inicial é realizado pelo operador com o auxílio de níveis eletrônicos, garantindo que o instrumento opere dentro da faixa de atuação do compensador.

A medição de distâncias por uma estação total é realizada por meio de um distanciômetro eletrônico (EDM), que utiliza a propagação de ondas eletromagnéticas. O equipamento emite um sinal em direção ao alvo, geralmente um prisma refletor, o qual retorna ao instrumento após ser refletido.

A determinação da distância baseia-se na análise desse percurso, podendo ser obtida a partir do tempo de propagação da onda (pulso) ou pela comparação da diferença de fase entre o sinal emitido e o recebido.

A medição de distâncias pelo método de medição por tempo de propagação (pulso), baseia-se na determinação do tempo de propagação de uma onda eletromagnética entre o instrumento e o alvo. Nesse método, a estação total emite vários pulsos de curta duração em direção ao prisma refletor, os quais retornam ao equipamento após serem refletidos. A distância é então calculada a partir do tempo decorrido entre a emissão e a recepção do sinal, considerando a velocidade de propagação da onda no meio. Conforme a Equação (1) (Torge, 2001).

$$s = \frac{v \cdot \Delta t}{2} \quad (1)$$

Onde:

$s$  = Distância;

$v$  = Velocidade da onda;

$\Delta t$  = Tempo de deslocamento.

O método de medição por tempo de propagação (pulso) não apresenta ambiguidade associada ao número inteiro de comprimentos de onda percorridos, sendo particularmente adequado para medições de maiores distâncias. No entanto, sua precisão está diretamente relacionada à capacidade do equipamento em medir intervalos de tempo extremamente pequenos, o que impõe limitações tecnológicas ao sistema.

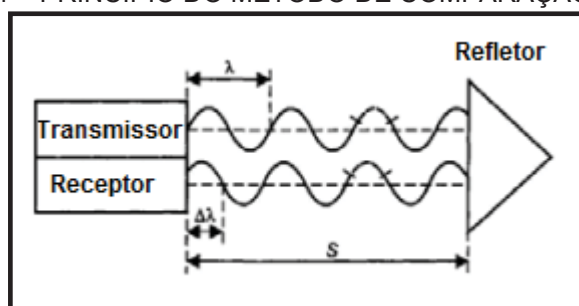
No método de comparação de fase, uma onda eletromagnética portadora de alta frequência é emitida pelo transmissor e modulada

continuamente, seja em amplitude ou em frequência (Figura 1). A determinação da distância ( $s$ ) baseia-se na comparação entre o sinal emitido e o sinal recebido após a reflexão no alvo.

Nesse processo, a distância é expressa como a soma de um número inteiro de comprimentos de onda ( $\lambda$ ) e uma fração adicional ( $\Delta\lambda$ ), correspondente à diferença de fase observada entre os sinais. Essa fração representa a parte residual da onda que não completa um ciclo inteiro no percurso (Torge, 2001).

Como a medição de fase, isoladamente, não permite identificar diretamente o número inteiro de comprimentos de onda percorridos (ambiguidade de ciclo), o procedimento é repetido utilizando-se diferentes comprimentos de onda de modulação. A combinação dessas medições possibilita resolver essa ambiguidade e determinar com maior precisão a distância total entre o instrumento e o alvo.

FIGURA 1 – PRINCÍPIO DO MÉTODO DE COMPARAÇÃO DE FASE



Fonte: Torge (2001).

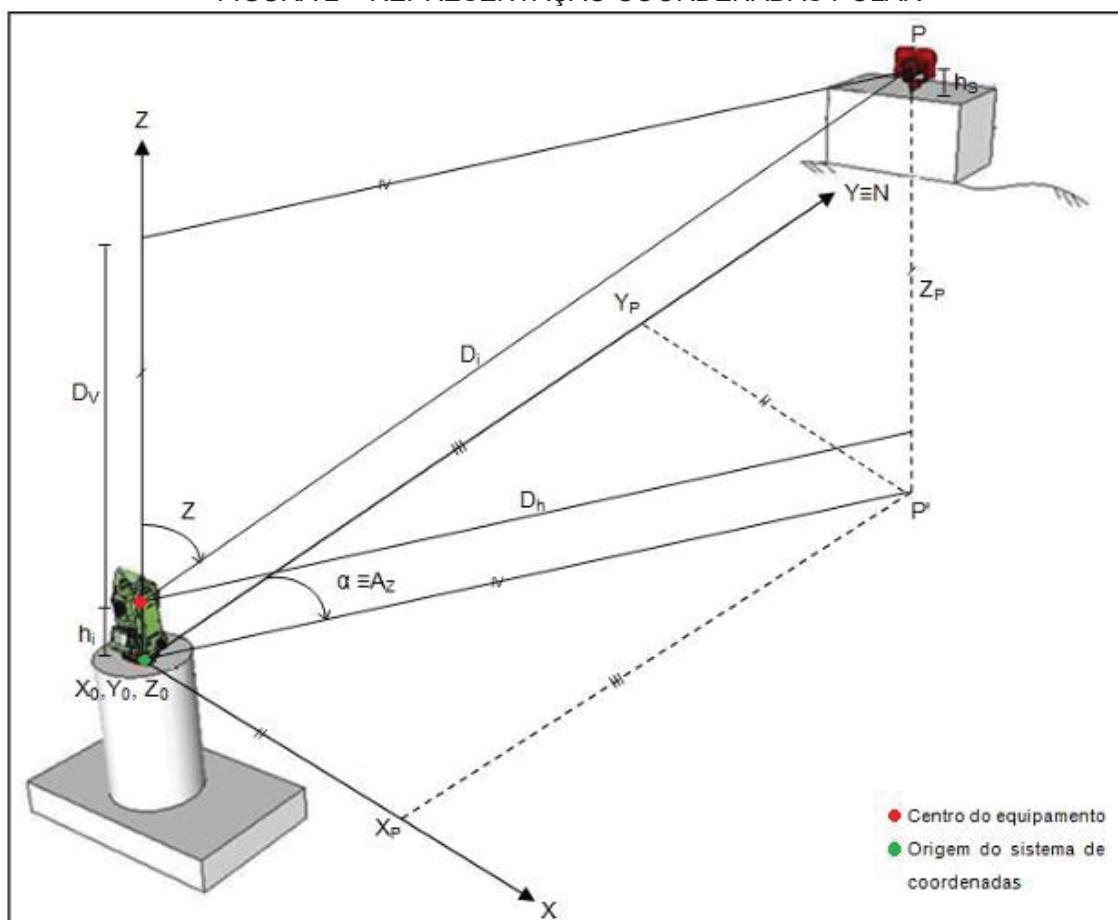
Em ambos os métodos, a distância é calculada considerando a velocidade de propagação da onda no meio, a qual é influenciada pelas condições atmosféricas, como temperatura, pressão e umidade, podendo introduzir variações nos resultados obtidos.

A partir dessas observações, associadas às medições angulares realizadas pela estação total, torna-se possível a determinação das coordenadas do ponto de interesse. Para isso, define-se um sistema de referência tridimensional ortogonal, no qual as grandezas observadas são utilizadas para a obtenção das coordenadas espaciais do ponto, ou seja, sua posição no espaço (Miranda; Faggion; Veiga, 2009).

Nos sistemas de coordenadas cartesianas tridimensionais, utilizam-se coordenadas polares, frequentemente referidas como coordenadas esféricas ou

cilíndricas (Miranda; Faggion; Veiga, 2009). Essas coordenadas incluem: o ângulo horizontal ( $\alpha$ ), que é medido no plano XY; o ângulo zenital (Z), que é medido no plano vertical que contém o eixo Z e o ponto observado; e a distância inclinada ( $d_i$ ), correspondente à distância entre o centro do equipamento e o ponto em questão. (Figura 2). Nesse contexto, a posição do ponto é determinada a partir da transformação dessas observações para o sistema cartesiano, considerando-se também a altura do instrumento e do prisma.

FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO COORDENADAS POLAR



Fonte: Siguel (2013).

As coordenadas cartesianas dos pontos de interesse são obtidas através das Equações 2 e 3.

$$X_p = X_0 + D_i \text{ sen } Z \cdot \text{sen } A_z \quad (2)$$

$$Y_p = Y_0 + D_i \text{ sen } Z \cdot \text{Cos } A_z \quad (3)$$

Onde:

$X_p, Y_p$  = Coordenadas do ponto P no referencial local;

$X_o, Y_o$  = Coordenadas da origem;

$D_i$  = Distância inclinada;

$Az$  = Azimute (considerando que o eixo Y está orientado para a direção norte);

$Z$  = Ângulo zenital.

### 2.1.1 Erros associados as medições com estação total

As medições realizadas com estação total estão sujeitas à influência de diferentes fontes de erro, que podem ser classificadas, de forma geral, em erros sistemáticos e aleatórios, bem como quanto à sua origem em erros instrumentais, humanos e ambientais. Os erros sistemáticos apresentam comportamento previsível e, em muitos casos, podem ser modelados e corrigidos por meio de calibrações e ajustes, enquanto os erros aleatórios estão associados a flutuações não controladas das observações, sendo usualmente minimizados por meio da repetição das medições e da aplicação de métodos estatísticos (Gemael; Machado; Wandresen, 2015).

Os erros instrumentais estão relacionados às imperfeições construtivas do equipamento ou a alterações decorrentes do uso e da falta de manutenção (Kahmen; Faig, 1988). Por essa razão, fabricantes recomendam a realização periódica de verificações e ajustes.

Entre os principais erros instrumentais associados às estações totais, destacam-se (Leica Geosystems, 2015a, 2015b):

- Erro de verticalidade do eixo principal: ocorre quando o sistema de compensação automática do instrumento (compensador eletrônico de duplo eixo), responsável pela horizontalização, não está devidamente ajustado ou apresenta limitações de funcionamento. Nessa condição, o eixo principal do instrumento não coincide perfeitamente com a vertical, podendo introduzir erros nas medições angulares;

- Erro de índice do compensador: corresponde à imprecisão na definição da posição de referência do sistema de compensação automática (compensador eletrônico), responsável pelo nivelamento do instrumento. Esse

erro pode ocorrer nos eixos longitudinal e transversal, mesmo em equipamentos com compensadores digitais de duplo eixo, sendo geralmente associado a falta de calibração do sistema, limitações dos sensores ou à influência de condições externas que afetam seu desempenho;

- Erro de índice vertical: corresponde ao erro do ponto zero do círculo graduado vertical, em relação ao eixo vertical do instrumento;
- Erro de colimação: causado pela falta de perpendicularidade entre a linha de visada ou de colimação e o eixo secundário;
- Inclinação do eixo secundário: Devido ao desvio causado pela falta de perpendicularidade entre o eixo principal e o eixo secundário;
- Erro de zero no ATR: corresponde a não coincidência da pontaria com o centro do prisma. Este origina variações na linha de visada tanto na direção horizontal, quanto vertical.

Os erros humanos estão associados à operação do equipamento e incluem falhas no centramento e nivelamento do instrumento, erros de pontaria, leitura incorreta dos dados, configuração inadequada de parâmetros (como constantes de prisma e correções atmosféricas), além de procedimentos operacionais inconsistentes.

Já os erros ambientais estão relacionados às condições externas durante a medição, destacando-se os efeitos da temperatura, pressão e umidade do ar, que influenciam diretamente a propagação das ondas eletromagnéticas utilizadas na medição de distâncias. Além disso, a refração atmosférica pode provocar desvios na trajetória do sinal, afetando tanto medições lineares quanto angulares.

Uma prática fundamental para a redução de erros sistemáticos, especialmente os instrumentais, consiste na realização de medições em posição direta (PD) e posição inversa (PI). Esse procedimento permite compensar erros como colimação, índice vertical e inclinação de eixos, uma vez que tais efeitos tendem a apresentar sinais opostos nas duas posições, sendo reduzidos por meio da média das observações.

Outro aspecto importante refere-se ao equilíbrio térmico do instrumento. Antes do início das medições, é necessário que a estação total permaneça exposta ao ambiente de trabalho por um período suficiente para que sua temperatura interna se iguale à temperatura externa (Dzierzega; Scherrer, 2003).

De modo geral, recomenda-se um tempo de estabilização entre 15 e 30 minutos, dependendo da diferença térmica entre o local de armazenamento e o ambiente de medição. A ausência desse equilíbrio pode afetar o desempenho de componentes sensíveis, como o compensador eletrônico e o sistema de medição de distância, introduzindo erros nas observações.

Recomenda-se ainda a verificação periódica do equipamento em campo, utilizando rotinas internas disponíveis nas estações totais. Nesses procedimentos, o próprio instrumento estima determinados parâmetros de erro, armazena esses valores e aplica correções automáticas nas medições subsequentes. Complementarmente, a realização de calibrações em laboratório especializado permite avaliar o desempenho do equipamento com maior rigor metrológico, garantindo a confiabilidade e a rastreabilidade das medições.

## 2.2 NIVELAMENTO

O levantamento altimétrico consiste na determinação das diferenças de nível entre pontos do terreno, sendo amplamente empregado em obras de engenharia para a definição de cotas, declividades e volumes. A escolha do método de nivelamento é influenciada por fatores como a extensão da área, os objetivos do levantamento, as características do terreno, a precisão requerida, o tempo, os custos e os equipamentos disponíveis.

Métodos de nivelamento direto: o geométrico, que é o mais preciso e utilizado em grandes obras. Métodos de nivelamento indiretos: o trigonométrico, que se baseia em relações trigonométricas e oferece suporte altimétrico a levantamentos topográficos, sendo menos preciso que o geométrico e diferença de altitude entre pontos, obtidas com GNSS.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram empregadas o nivelamento geométrico e o trigonométrico.

### 2.2.1 Nivelamento Geométrico

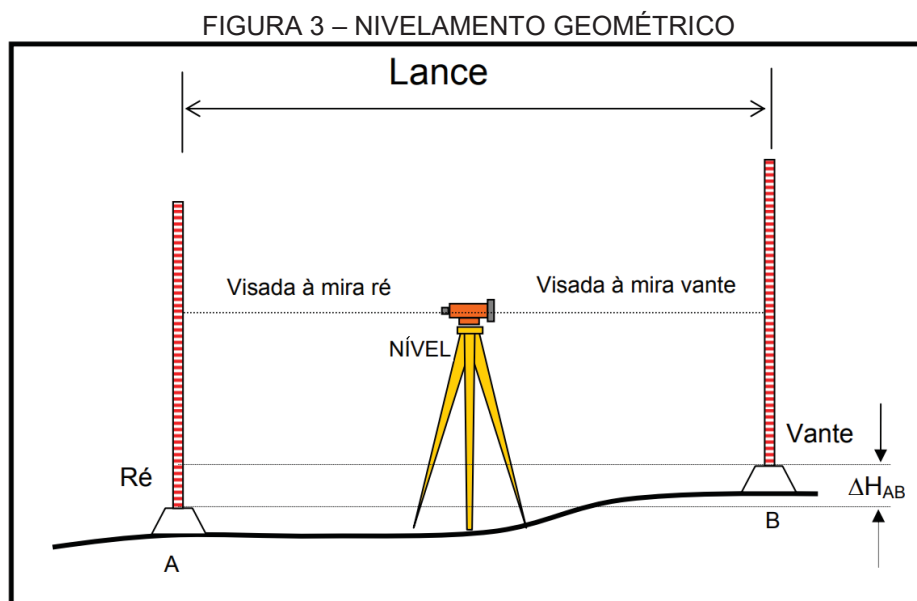
Segundo as especificações e normas para levantamentos geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), o nivelamento geométrico é

a técnica mais empregada em levantamentos altimétricos de alta precisão (IBGE, 2017).

Para esse tipo de levantamento, os equipamentos utilizados são os níveis digitais, e miras gravadas em código de barras. A leitura da mira é obtida através do processamento digital de sua imagem, gravada na memória do nível, com a imagem obtida pelo CCD (Charge-Compled Device) que compõem o nível.

Os componentes principais do nível são uma luneta com sistema de lentes para criar uma linha de visada e um compensador para estabilizar o plano horizontal definido pela linha de visada perpendicular à vertical. Adicionalmente, um sensor de posição acoplado com a lente focal fornece uma informação da distância (grosseira). Um sensor observa a posição do compensador e um divisor de feixe guia parte da luz ao CCD-sensor (Andolfato, 2010).

Para realizar as medições de desnível entre dois pontos quaisquer A e B, as miras devem ser posicionadas verticalmente sobre os pontos, com o auxílio de níveis esféricos. A distância entre as miras é chamada de lance e o equipamento é posicionado de maneira equidistante entre A e B, com auxílio de um tripé. Assim, é possível realizar as leituras na mira de ré e na mira de vante para calcular o desnível, identificado como  $\Delta H_{AB}$  (Figura 3).



Fonte: Adaptado de Veiga, Zanetti e Faggion (2012).

Para que o equipamento possa ser utilizado é necessário a verificação periódica dos erros instrumentais, como o de verticalidade do eixo principal, que

é quando o nível do instrumento, não está perfeitamente horizontalizado, logo o eixo principal do instrumento não coincide com a vertical.

Segundo IBGE (2017) para evitar a ocorrência e propagação de erros sistemáticos alguns cuidados devem ser observados durante a execução do nivelamento:

- Garantir que as distâncias das visadas de ré e vante sejam aproximadamente iguais, reduzindo os efeitos da curvatura da Terra e da refração atmosférica;
- Limitar as visadas a até 60 metros no nivelamento geométrico duplo;
- Para evitar os efeitos da reverberação atmosférica, as leituras mínimas nas miras devem ser feitas a uma altura superior a 50 cm;
- Aplicar o método de leitura das miras ré, vante, vante, ré para o cálculo do desnível, sem deslocar as miras dos pontos;
- Utilizar as miras em pares, alternando entre ré e vante, para que a mira utilizada no ponto de partida (lida a ré) também seja utilizada no ponto de chegada (lida a vante);
- As miras devem ser posicionadas sobre chapas ou pinos, e ao longo do trajeto, sobre sapatas, nunca diretamente no solo.

Vale ressaltar, que desde 1990 o IBGE adota o valor de  $3 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$  como critério para o controle da qualidade do fechamento das seções de nivelamento.

### 2.2.2 Nivelamento Trigonométrico

O nivelamento trigonométrico é uma técnica empregada para determinar diferenças de elevação entre pontos a partir da medição de ângulos verticais e distâncias inclinadas. O método fundamenta-se em princípios trigonométricos, permitindo a obtenção do desnível entre pontos a partir de observações realizadas com estações totais.

Na prática, esse método é amplamente utilizado em levantamentos planialtimétricos, locação de obras, determinação de perfis longitudinais e transversais, além do monitoramento de estruturas, como barragens e taludes. Sua principal vantagem está na possibilidade de realização de medições a

médias e longas distâncias, sem a necessidade de visadas horizontais rigorosas, o que o torna especialmente adequado em terrenos acidentados ou de difícil acesso.

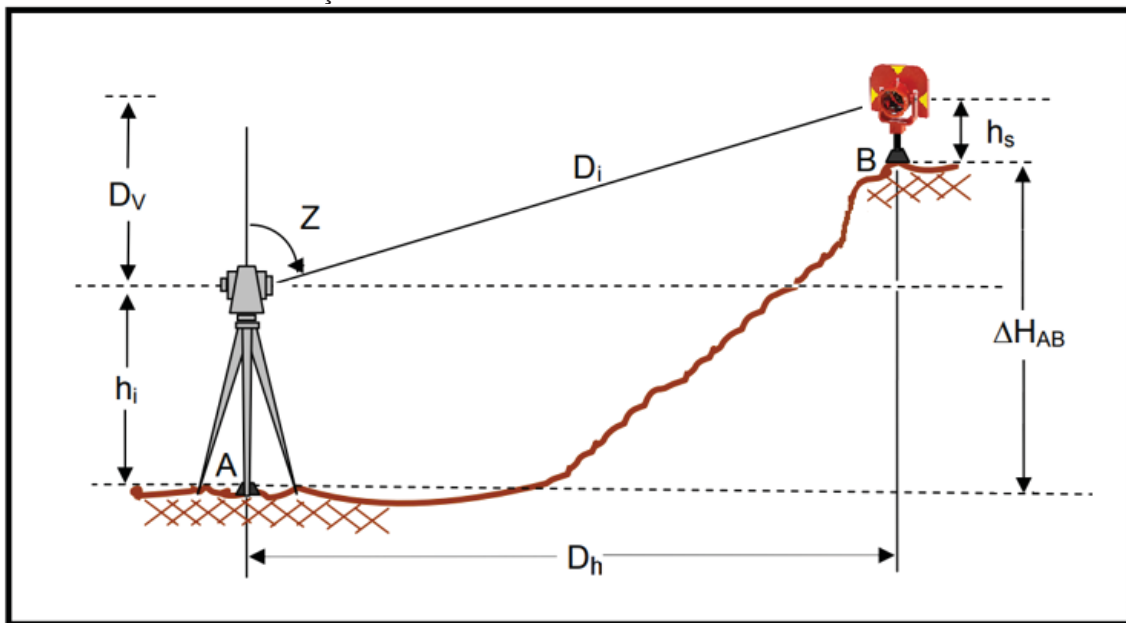
O nivelamento trigonométrico constitui uma alternativa eficiente em situações nas quais o uso do nivelamento geométrico tradicional se torna inviável. Nesse contexto, o método se destaca pela maior rapidez e praticidade tanto na coleta de dados quanto na realização dos cálculos.

Contudo, um dos principais desafios do nivelamento trigonométrico é a precisão das medições. Como ressaltado por Santos e Ferreira (2019), a precisão do método depende diretamente da exatidão na medição dos ângulos e das distâncias, logo, está sujeita a precisão dos equipamentos e de fatores como a refração atmosférica e curvatura terrestre.

Para minimizar esses efeitos, é comum aplicar correções às observações. No caso da curvatura da Terra, considera-se que a superfície de referência não é plana, o que provoca um desvio sistemático na linha de visada em relação ao nível médio. Já a refração atmosférica atua, causando a curvatura do raio de visada devido às variações de densidade do ar ao longo do percurso. Dessa forma, as correções de curvatura e refração são frequentemente aplicadas de forma conjunta, permitindo obter valores mais próximos do desnível real.

Na Figura 4, apresenta-se um exemplo de nivelamento trigonométrico. Nessa configuração,  $Z$  representa o ângulo zenital, medido no plano vertical que contém o eixo vertical do instrumento e o ponto observado, enquanto  $D_i$  corresponde à distância inclinada entre o equipamento e o ponto de interesse. Os pontos A e B são aqueles entre os quais se deseja determinar o desnível, sendo  $h_i$  a altura do instrumento e  $h_s$  a altura do prisma.

FIGURA 4 – OBTENÇÃO DO DESNÍVEL NO NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO



Fonte: Adaptado Gomes (2006).

Onde:

A e B = Pontos de interesse;

$h_i$  = Altura do instrumento;

$h_s$  = Altura do prisma;

$D_i$  = Distância inclinada do instrumento ao alvo;

$Z$  = Ângulo zenital;

$\Delta H_{AB}$  = Desnível de A para B;

$D_v$  = Componente de distância inclinada no eixo horizontal ou distância vertical;

$D_h$  = Componente da distância inclinada no plano ou distância horizontal.

A partir dos dados da distância inclinada ( $D_i$ ), ângulo zenital ( $Z$ ), altura do instrumento ( $h_i$ ) e altura do prisma ( $h_s$ ) é possível determinar o desnível entre os pontos A e B. De acordo com a Figura 3 por trigonometria é possível encontrar o valor do desnível, conforme equações (4) e (5);

$$h_i + D_v = \Delta H_{AB} + h_s \quad (4)$$

$$\Delta H_{AB} = h_i - h_s + D_v \quad (5)$$

Para determinar a distância vertical é necessário decompor a distância inclinada, conforme equações (6), onde  $D_v$  é a componente da distância no eixo vertical;

$$D_v = D_i \cos Z \quad (6)$$

A equação (5) só é válida em pequenas distâncias, pois não leva em conta a curvatura da Terra, nem o efeito da refração no ângulo zenital. Para lances longos, visadas com distâncias maiores de 100m entre a estação total e o alvo, esses efeitos precisam ser considerados (Gemael, 1987).

Para corrigir o efeito da curvatura da terra, um termo é adicionado à equação (5), conforme equação (7):

$$C = \frac{D_h^2}{2R} \quad (7)$$

Onde:

$D_h$  = Distância horizontal do instrumento ao alvo;

$R$  = Raio da terra (Aproximadamente 6.400.000 m);

$C$  = Efeito devido à curvatura da terra.

A equação (8) é a componente da distância inclinada no eixo horizontal:

$$D_h = D_i \sin Z \quad (8)$$

Para corrigir o efeito da refração um termo pode ser adicionado à equação (Conforme demonstrado na equação (8)):

$$\delta = \frac{kD_h^2}{2R} \quad (9)$$

Onde:

$k$  = Coeficiente de refração ( $k = 0,13$ , estabelecido por Gauss, é amplamente adotado em condições atmosféricas padrão, sendo aplicado para reduzir os efeitos da refração nas medições).

$D_h$  = Distância horizontal do instrumento ao alvo;

$R$  = Raio da terra;

Rearranjando a equação (5) e incluindo o termo correspondente ao efeito da curvatura da terra e a correção devido à refração atmosférica, o desnível trigonométrico pode ser descrito conforme equação (11):

$$\Delta H_{AB} = h_i - h_s + D_v + \frac{D_h^2}{2R} + \frac{kD_h^2}{2R} \quad (10)$$

Ou:

$$\Delta H_{AB} = h_i - h_s + D_v + \frac{D_h^2}{2R}(1 - k) \quad (11)$$

Onde:

$\Delta H_{AB}$  = Desnível de A para B;

$h_i$  = Altura do instrumento;

$h_s$  = Altura do prisma;

$D_v$  = Componente de distância inclinada no eixo vertical;

$D_h$  = Componente da distância inclinada no plano horizontal;

$R$  = Raio médio da terra;

$k$  = Coeficiente de refração.

Uma possibilidade de obtenção de desníveis precisos equivalente ao nivelamento trigonométrico é utilizar o método Leap-Frog, amplamente discutido em: (Santos, 2009; Gomes et al, 2006)

### 2.3 REFRAÇÃO ATMOSFÉRICA EM MEDIÇÕES GEODÉSICAS

A refração atmosférica é um fenômeno físico associado à variação do índice de refração do ar ao longo do percurso de propagação de uma onda eletromagnética. Em levantamentos geodésicos, esse efeito constitui uma das principais fontes de erro sistemático, influenciando diretamente a precisão das medições realizadas com instrumentos como estações totais (Hennes, 2002; Ingensand, 2008).

Quando uma onda eletromagnética se propaga na atmosfera, sua velocidade e direção são afetadas pelas variações das condições físicas da atmosfera, principalmente temperatura, pressão e umidade. Essas variações alteram a densidade do meio e, conseqüentemente, o índice de refração, fazendo com que a trajetória da onda não seja uma reta (Brunner, 1984; Torge, 2001).

Como resultado, a refração atmosférica pode provocar três efeitos principais nas medições geodésicas (Hennes, 1998):

- Mudança na direção da linha de visada, que devido ao efeito da refração atmosférica, altera a posição aparente do alvo, tanto na direção horizontal quanto vertical:
  - Variação na velocidade de propagação da onda, influenciando as medições de distância;
  - Curvatura do feixe eletromagnético ao longo do trajeto.

Esses efeitos são mais significativos na camada mais próxima à superfície terrestre, denominada troposfera, onde as condições atmosféricas são altamente variáveis, pois é a região onde ocorrem praticamente todos os fenômenos meteorológicos. Nessa região, a presença de gradientes térmicos, resultantes da troca de calor entre o solo e o ar, da ação do vento e da influência de obstáculos, gera um ambiente turbulento que afeta diretamente a propagação das ondas eletromagnéticas (Schaal, 1995).

Em aplicações práticas, como no monitoramento de barragens, a influência da refração atmosférica pode ser ainda mais acentuada devido às condições geográficas do ambiente. A presença de superfícies com diferentes características, como a grande área com água represada, concreto e vegetação, favorece a formação de gradientes de temperatura e, conseqüentemente, variações no índice de refração ao longo das linhas de visada (Brys; Justyniak, 2016).

Para minimizar os efeitos da refração, diferentes abordagens têm sido propostas na literatura. Entre elas, destacam-se o uso de modelos atmosféricos, a realização de medições em condições ambientais mais estáveis e a aplicação de correções baseadas em parâmetros meteorológicos locais (Torge, 2001). No entanto, tais modelos frequentemente requerem dados detalhados do perfil atmosférico ao longo de toda a trajetória da onda, o que nem sempre é viável em levantamentos de campo, (Redovnikovic; Alisic; Luketic, 2013) como no caso deste estudo, que utiliza dados atmosféricos pontuais.

No caso específico do nivelamento trigonométrico, a refração atmosférica é usualmente considerada por meio do coeficiente de refração vertical ( $k$ ), que representa a relação entre a curvatura da trajetória da onda. Um valor clássico frequentemente adotado é  $k = 0,13$ , proposto por Gauss, o qual permite corrigir parcialmente os efeitos da refração nas medições (Torge, 2001). Entretanto, estudos demonstram que esse coeficiente pode variar significativamente em função das condições atmosféricas locais e da geometria de observação, não sendo adequado como valor fixo em todas as situações (Brocks, 1950; Wiggers, 2019).

Pesquisas têm buscado estimar o coeficiente de refração vertical a partir de medições geodésicas, como no uso de visadas recíprocas e simultâneas, permitindo uma representação das condições atmosféricas da região (Hirt et al., 2010; Wiggers, 2019). Além disso, estudos como o de Redovnikovic, Alisic e Luketic (2013) destacam a importância da refração lateral, evidenciando sua influência nas medições de direções horizontais, aspecto ainda pouco explorado em aplicações práticas.

Dessa forma, a adequada compreensão e modelagem da refração atmosférica são fundamentais para o aprimoramento da precisão das medições geodésicas, especialmente em aplicações que demandam alta acurácia, como o monitoramento de estruturas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido na área da Usina Hidrelétrica Governador Jayme Canet Júnior, no estado do Paraná, onde foi implantada uma rede de monitoramento geodésico composta por pilares de referência localizados a montante e jusante da barragem, além de dois pontos de monitoramento materializados na crista da estrutura. Os pilares foram construídos antes mesmo na finalização da construção da barragem, de forma que sua fundação atingisse as rochas da região, garantindo estabilidade posicional ao longo do tempo, e equipados com sistemas de centragem forçada, assegurando elevada repetibilidade na reocupação dos pontos.

As observações geodésicas foram realizadas em duas campanhas. O primeiro levantamento ocorreu nos dias 09 e 10 de agosto de 2021, utilizando apenas uma estação total, com medições realizadas em três períodos do dia e a partir de três posições distintas, duas a montante e uma a jusante do barramento, monitorando dois pontos localizados na crista da barragem. O segundo levantamento foi realizado nos dias 13 e 14 de novembro de 2023, empregando simultaneamente três estações totais, posicionadas nos três pilares, também em três períodos do dia.

Para a execução das campanhas, foram utilizados os seguintes equipamentos:

Primeira campanha (09 e 10 de agosto de 2021):

- Estação total Leica TS15, com precisão angular de 1" e precisão linear de 1 mm + 1,5 ppm;
- Prisma Leica modelo GPR111;
- Estação meteorológica tipo datalogger, com precisão de 0,25% para pressão, 1 °C para temperatura e 5% para umidade relativa.

Segunda campanha (13 e 14 de novembro de 2023):

- Estação total Leica TS15, com precisão angular de 3" e precisão linear de 1 mm + 1,5 ppm;
- Estação total Leica TS15, com precisão angular de 5" e precisão linear de 1 mm + 1,5 ppm;
- Estação total Leica TCRA1205, com precisão angular de 5" e precisão linear de 1 mm + 1,5 ppm;

- Prismas Leica modelos GPR111 e ZRD121;
- Termohigrômetro tipo datalogger, com precisão de  $\pm 1,5$  mbar para pressão, 1 °C para temperatura e 3% para umidade relativa;
- Nível digital Leica DNA03, com precisão de 0,3 mm/km em duplo nivelamento, e respectivos acessórios.

As estações totais utilizadas são dotadas de um sistema de reconhecimento automático de alvos, permitindo a medição de ângulos verticais, direções horizontais e distâncias inclinadas de forma automatizada. Antes das campanhas, foram realizados procedimentos de verificação e calibração, com o objetivo de minimizar erros instrumentais sistemáticos. Adicionalmente, foram executadas seis séries de leituras em pontaria direta e inversa da luneta, contribuindo para a redução de erros sistemáticos associados às observações.

A seleção dos pontos monitorados foi definida em função da visada a partir das três estações de observação (pilares), sendo escolhidos por apresentarem visibilidade simultânea. As linhas de visada entre os pilares e os pontos monitorados são heterogêneas, o que permite investigar a influência das condições atmosféricas ao longo de diferentes trajetos de propagação da onda eletromagnética.

Quanto à estratégia de observação, na primeira campanha as medições foram realizadas com apenas uma estação total por vez. Já na segunda campanha, adotou-se uma abordagem simultânea realizada em duas etapas, inicialmente por meio de visadas recíprocas e simultâneas entre os pilares e, posteriormente, com observações simultâneas realizadas a partir de cada pilar em direção aos dois pontos monitorados. Essa estratégia foi empregada com o objetivo de reduzir os efeitos das variações das condições atmosféricas ao longo do tempo de observação.

Os levantamentos foram conduzidos em diferentes períodos do dia, visando captar a variabilidade temporal dos parâmetros atmosféricos. Durante as medições, foram registrados temperatura do ar, pressão atmosférica e umidade relativa, permitindo a caracterização das condições ambientais no momento das observações e subsidiando a análise de sua influência nos resultados.

No processamento dos dados, as distâncias inclinadas foram corrigidas posteriormente com base nos parâmetros atmosféricos registrados, de modo a

reduzir a influência das variações do índice de refração na velocidade de propagação da onda eletromagnética. A adoção dessas correções, aliada aos procedimentos de calibração instrumental e à estratégia de observação empregada, permitiu mitigar as principais fontes de erros grosseiros e sistemáticos.

Para avaliar a influência da refração atmosférica na componente altimétrica, os desníveis também foram determinados por meio de nivelamento geométrico de alta precisão, adotado como referência. Com base na equação do nivelamento trigonométrico e utilizando esses valores como referência, foi determinado o coeficiente de refração vertical ( $k$ ) para cada linha de visada entre os pilares. A utilização de visadas recíprocas e simultâneas contribuiu para a obtenção de um volume maior de dados para posterior análise desse coeficiente calculado.

Posteriormente, os desníveis dos dois pontos situados na crista da barragem foram recalculados por nivelamento trigonométrico, considerando tanto o valor clássico do coeficiente de refração ( $k = 0,13$ ) quanto os valores determinados experimentalmente. A comparação com os resultados do nivelamento geométrico permitiu avaliar quantitativamente a influência da refração atmosférica.

Por fim, analisou-se a variabilidade do coeficiente de refração ao longo das diferentes linhas de visada e períodos de observação, bem como sua relação com os parâmetros atmosféricos registrados. Essa análise possibilitou quantificar a amplitude dos efeitos da refração nas medições geodésicas e avaliar seu impacto na determinação de desníveis, permitindo verificar a hipótese de que, uma vez mitigadas as demais fontes de erro, a refração atmosférica constitui um dos principais fatores limitantes da acurácia em levantamentos com estação total.

De posse desses dados e aplicando tais abordagens, foram gerados os artigos apresentados a seguir.

## 4 ARTIGOS DESENVOLVIDOS

### 4.1 ANÁLISE DOS EFEITOS DA REFRAÇÃO NO MONITORAMENTO DE BARRAGENS ESTUDO DE CASO UHE GOVERNADOR JAYME CANET JUNIOR

Esse artigo teve como objetivo avaliar as variações de temperatura, pressão e umidade ao longo do dia na determinação de coordenadas de pontos de monitoramento na usina hidrelétrica de energia Governador Jayme Canet Junior, utilizando irradiação topográfica com estação total, a partir de três marcos geodésicos distintos, com o propósito de calcular as coordenadas de dois marcos geodésicos situados na crista da barragem.

Os resultados mostram que, mesmo após a correção das distâncias em função das condições meteorológicas, as coordenadas calculadas apresentaram discrepâncias, sugerindo que sejam devido aos efeitos da refração nas medidas das direções horizontais e ângulos verticais. As coordenadas médias foram mais influenciadas pelas condições atmosféricas no ponto ocupado pela estação total no levantamento (Pilar), do que pelo período do dia, evidenciando que as diferentes trajetórias da onda eletromagnética, associadas às características físicas do meio, desempenham papel relevante nos resultados.

A análise das elipses de erro permitiu uma avaliação da precisão posicional das coordenadas estimadas. Essas elipses, derivadas da matriz variância-covariância, representam graficamente a incerteza bidimensional associada às coordenadas, permitindo identificar não apenas a magnitude dos erros, mas também sua direção predominante. Observou-se que, de modo geral, as elipses apresentaram maiores dimensões no período da manhã, indicando aumento da dispersão das coordenadas nesse intervalo.

Esse comportamento pode ser associado ao estabelecimento de gradientes térmicos mais significativos nas primeiras horas do dia, decorrentes da incidência solar sobre as diferentes superfícies do entorno, o que ocasiona variações do índice de refração e, conseqüentemente, maior instabilidade na determinação das coordenadas.

Adicionalmente, a orientação das elipses evidencia a anisotropia das incertezas, indicando que a precisão posicional não é uniforme em todas as

direções. Esse comportamento está associado à geometria da visada, à propagação dos erros das observações e às condições atmosféricas locais, incluindo os efeitos da refração. Dessa forma, a análise conjunta do tamanho e da orientação das elipses reforça a interpretação de que a refração atmosférica constitui uma fonte relevante de incerteza na determinação das coordenadas, mesmo após a aplicação das correções nas distâncias.

O artigo foi aceito 17 de maio de 2024 na Revista de Geociências do Nordeste, classificado como A2 no Qualis periódico da Capes referente ao quadriênio 2017-2020 e possui CiteScore 0,5 da Scopus. O artigo pode ser acessado pelo link

<https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/35730>



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

*Northeast Geosciences Journal*

v. 11, nº 1 (2025)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n1ID35730>

## Análise dos efeitos da refração no monitoramento de barragens Estudo de Caso UHE Governador Jayme Canet Junior

### *Refractive Index Analysis in Dam Monitoring: Case Study Hydro electric power plant Governor Jayme Canet Junior*

Dayane Wiggers<sup>1</sup>; Pedro Luis Faggion<sup>2</sup>; Wander da Cruz<sup>3</sup>; Andreas Jerke<sup>4</sup>; Samir de Souza Oliveira Alves<sup>5</sup><sup>1</sup> Universidade Federal do Paraná/Departamento Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: dayane@ufpr.brORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7339-9436><sup>2</sup> Universidade Federal do Paraná/Departamento Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: faggion@ufpr.brORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4881-8720><sup>3</sup> Universidade Federal do Paraná/Departamento Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: wander.cruz@ufpr.brORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0738-1283><sup>4</sup> Universidade Federal do Paraná/Departamento Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: andreasjerke@ufpr.brORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9476-5201><sup>5</sup> Universidade do Estadual do Rio de Janeiro/Departamento de Engenharia Cartográfica, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Email: samir.alves@eng.uerj.brORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3083-0681>

**Resumo:** A influência da refração atmosférica no monitoramento de barragens é um tema que requer estudo e discussão, em função das variações das condições atmosféricas causadas por características próprias região. O local de estudo é a barragem da Usina Hidrelétrica Governador Jayme Canet Junior, localizada entre os municípios de Ortigueira e Telêmaco Borba, no estado do Paraná. Em função da construção da barragem a região apresenta uma grande área inundada a montante, o barramento é composto por uma grande estrutura em concreto compactado a rolo (CCR), que absorve a radiação solar ao longo do dia, de forma a gerar um gradiente de temperatura importante. A pesquisa avaliou as variações de temperatura, pressão e umidade ao longo do dia na determinação de coordenadas de pontos de monitoramento, utilizando irradiação topográfica com estação total, juntamente com um sistema de busca automática do ponto a ser monitorado. Para tal, realizou um levantamento, destes pontos, a partir de três marcos geodésicos distintos, dois a montante e um a jusante, com o propósito de calcular as coordenadas de dois marcos geodésicos situados na crista da barragem denominados CG01 e CG02. Os resultados mostram que, mesmo após a correção das distâncias em função das condições meteorológicas, as coordenadas calculadas apresentaram discrepâncias e esta variação sugere que os possíveis erros, podem ocorrer, devido a efeitos da refração nas medidas das direções horizontais e ângulos verticais<sup>1</sup>, pois observamos um comportamento, onde as coordenadas médias são mais influenciadas pelo ponto ocupado no levantamento, do que pelo período do dia. Analisando as elipses de erro é possível verificar que as maiores variações foram no período da manhã, o que sugere que a incidência solar pode causar uma alteração do índice de refração na região e consequentemente nas coordenadas.

**Palavras-chave:** Monitoramento de estruturas; Usina hidrelétrica; Refração.

**Abstract:** The influence of atmospheric refraction on dam monitoring is a topic that requires study and discussion, due to variations in atmospheric conditions caused by the region's specific characteristics. The study site is the dam of the Governador Jayme Canet Junior Hydroelectric Plant, located between the municipalities of Ortigueira and Telêmaco Borba, in the state of Paraná. Due to the dam construction, there is a large flooded area, and in the downstream a large roller-compacted concrete (CCR) structure, which absorbs solar radiation throughout the day and results in a significant temperature gradient. The research evaluated the temperature, pressure, and humidity variations throughout the day to calculate monitored point coordinates, which were surveyed using topographic irradiation by total station and automatic target recognition as a search system surveying these. To this purpose, the points surveying was carried out using three different geodetic landmarks, two at the dam upstream and one downstream, to calculate the coordinates of two geodetic landmarks CG01 and CG02 located on the dam crest. The results show that, even after correcting the distances depending on meteorological conditions, the calculated coordinates showed discrepancies and this variation suggests that possible errors may be due to the effects of refraction in the horizontal directions and vertical angles measurements, as we observed a behavior where the average coordinates are more influenced by the point occupied in the survey than by the time of day. Based on the error ellipses analysis, it is possible to verify that the biggest variations were in the morning, which suggests that solar incidence can cause refractive index changes in the region and, therefore, the coordinates.

**Keywords:** Monitoring of structures; Hydroelectric plant; Refraction.

Recebido: 25/03/2024; Aceito: 17/05/2024; Publicado: 30/01/2025.

<sup>1</sup> No artigo todos os ângulos verticais têm origem no zênite, desta forma, podem ser denominados ângulo zenital.

## 1. Introdução

Grandes obras de engenharia precisam ser monitoradas periodicamente, e no caso das barragens de acordo com a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), criada pela Lei 12.334/2010 (BRASIL, 2010), são estabelecidos critérios com o objetivo de garantir um padrão de segurança, com a finalidade de prevenir ou reduzir a possibilidade de acidentes ou desastres e suas possíveis consequências.

Para que esse padrão de segurança seja alcançado é necessário realizar inspeções, com o objetivo de avaliar as condições físicas da estrutura, buscando identificar e monitorar possíveis falhas, que possam afetar a mesma. Para isso, diversos métodos podem ser utilizados, dependendo da precisão exigida no levantamento, a escolha do método e equipamentos empregados é relevante.

Para o monitoramento de barragens é preciso observar as influências da baixa atmosfera (já que as medidas são realizadas no máximo a 100 metros da superfície), pois erros são introduzidos nessa região, devido à variação das condições ambientais como, temperatura, pressão e umidade. Nas usinas hidrelétricas de geração de energia (UHE), a barragem tem a finalidade de represar uma grande quantidade de água, para utilização da sua energia potencial na geração de energia elétrica. Diante desse cenário, a região apresenta características bem específicas, ou seja, a montante do barramento uma grande área inundada e a jusante uma área com características distintas, onde há presença de vegetação, e dependendo da forma de construção da barragem pode apresentar estrutura de terra-enrocamento, concreto, com vertedouro (por onde a água é liberada quando o reservatório atinge sua cota máxima), entre outras formas de construção. Essas características podem afetar a distribuição de massas de ar e conseqüentemente os parâmetros ambientais ao longo desse percurso.

Na região da barragem a radiação solar diária, pode gerar gradientes térmicos irregulares, devido às características de absorção do calor, que provocam variações das condições atmosféricas em diferentes direções. Dependendo da região é possível que essa radiação fique encapsulada, gerando uma grande variação de temperatura, pressão e umidade. De acordo com o trabalho realizado por Rodriguez (2018 e 2019), em duas usinas hidrelétricas, utilizando uma distribuição de sensores, com o objetivo de verificar o comportamento da temperatura na região, foi possível avaliar que as duas regiões estudadas apresentaram resultados que indicam a possível presença de microclimas. De acordo com o período do dia, a radiação solar pode gerar gradientes de temperatura em função da absorção de calor pela estrutura e em seu entorno. Por outro lado, a área da crista do barramento e do reservatório os ventos podem conduzir a massa de ar que fica sobre a água, influenciando a temperatura das camadas próximas a lâmina da água.

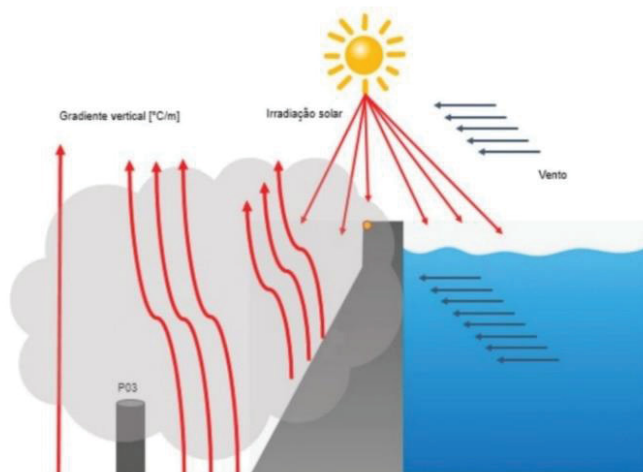


Figura 1 – Esquema gradiente temperatura em uma barragem.  
Fonte: Adaptado Rodriguez (2018).

Sabendo da possível variação das condições ambientais no monitoramento da área de estudo, é importante lembrar o postulado ou o princípio físico “do tempo mínimo”, que significa que quando uma onda eletromagnética percorre um meio o tempo de percurso entre dois pontos é minimizado. Esse tempo mínimo equivale a dizer também, que é o menor percurso óptico. Lembrando que o conceito de percurso óptico é igual ao produto entre a distância percorrida e o índice de refração

local (HECHT, 1991), ou seja, será o caminho com o menor índice de refração. Se o índice de refração varia perpendicularmente à direção de propagação, o raio será desviado (BOCKEM, et al., 2000).

O termo refração atmosférica descreve essa alteração na direção da onda eletromagnética, conforme ela se propaga através de diferentes camadas da parte inferior da atmosfera da Terra. Quando utilizamos estação total, as direções, ângulos e distâncias são obtidos através da reflexão da onda eletromagnética em um alvo, localizado no ponto a ser monitorado. Estudando a propagação dessas ondas eletromagnética na atmosfera, a partir do instrumento até o alvo, é fundamental o conhecimento das características médias da densidade da atmosfera e seu gradiente no instante da realização das medições, logo, para cada ponto ao longo do desse percurso (TSOULIS, PETROVIC, KILIAN 2008).

Uma análise rigorosa da densidade é obtida através das condições de temperatura, pressão, umidade e composição do ar, mas na prática é bastante complexo ter acesso a todas essas variáveis, o que se faz é medir pontualmente esses parâmetros e então estimar uma densidade ao longo do caminho, por isso é importante estudar o coeficiente de refração atmosférica, bem como seu efeito nas observações, para que seja possível determinar as coordenadas dos pontos de interesse, de maneira a minimizar erros, corrigindo as observações que sofreram sob o efeito dessa variação de densidade, gerando uma curvatura ou desvio da onda eletromagnética, de forma a tornar as observações mais precisas.

Nesse trabalho foram estudados esses efeitos, nas medidas de direção horizontal, ângulo vertical e distância inclinada e, conseqüentemente, no cálculo das coordenadas ao longo de três períodos do dia, (manhã, tarde e noite) para avaliar se devido a radiação solar e características topográficas da região, ocorrem variações nas coordenadas calculadas.

## 2. Metodologia

### 2.1 Área de estudo

A área de estudo localiza-se junto a Usina Hidrelétrica Governador Jayme Canet Júnior, anteriormente denominada Usina Hidrelétrica de Mauá, que fica entre os municípios de Ortigueira e Telêmaco Borba, no estado do Paraná, no Brasil.

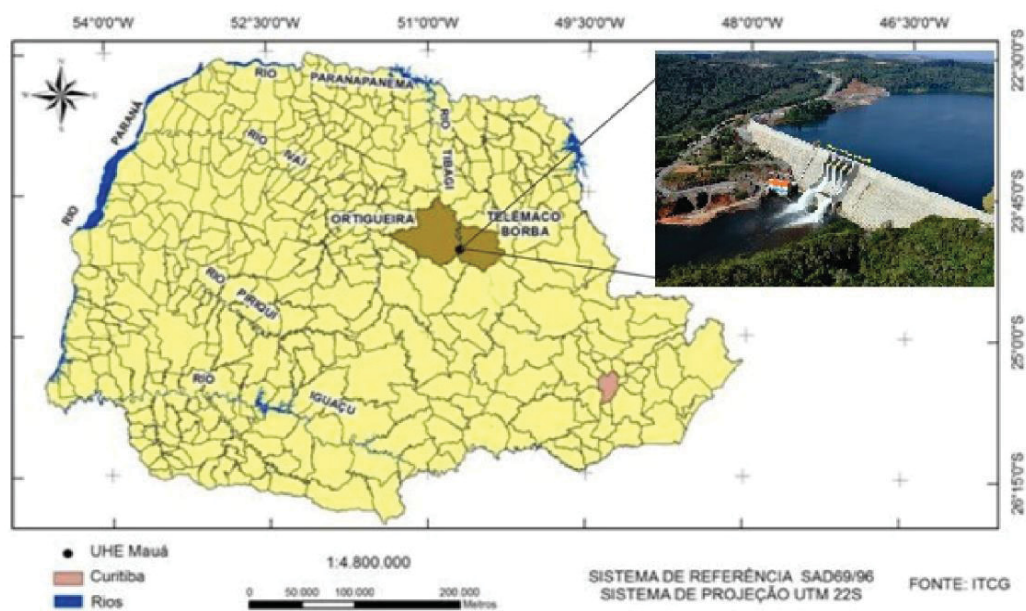


Figura 2 – Área onde foram realizados os levantamentos.  
Fonte: Adaptado Siguel (2013).

A barragem atende ao consumo de aproximadamente 1 milhão de pessoas, fica na região do Salto Mauá, no rio Tibagi. A barragem de concreto possui 745 m de comprimento na parte superior e 85 m de altura máxima, proporcionando a

formação de 83,9 km<sup>2</sup> de área inundada no reservatório, quando operado no nível máximo, com altitude normal de 635 m (COPEL, 2021). A área de estudo foi escolhida como parte de um projeto muito mais amplo da Universidade Federal do Paraná em convênio com a COPEL (Companhia Paranaense de Energia Elétrica), onde realiza o monitoramento geodésico da barragem como um todo.

## 2.2 Equipamentos Utilizados

Para a medição das direções horizontais, ângulos verticais<sup>1</sup> e distâncias inclinadas, utilizou-se a Estação Total Leica TS15, que possui a capacidade de realizar leituras de forma automática, através da função de reconhecimento automático de alvos (ATR), um sistema de detecção do prisma com maior rapidez e uma menor influência do operador. Para realizar a medida o equipamento utiliza uma onda eletromagnética de comprimento 785 nm e quando utilizado em conjunto com o prisma Leica modelo GPR111 possui precisão da medida angular de 1" e precisão na medida da distância:  $\pm (1 \text{ mm} + 1,5 \text{ ppm})$  (LEICA GEOSYSTEMS, 2015).

Esses equipamentos são submetidos a rigorosos critérios de verificação, com a utilização de colimadores, assim como uma base linear para aferição de seu medidor eletrônico de distância, em estruturas disponíveis do Laboratório de instrumentação geodésica (LAIG), pertencente a Universidade Federal do Paraná, onde também são classificados, garantindo a confiabilidade da precisão nominal do instrumento.

A temperatura, pressão atmosférica e umidade foram medidas por uma estação meteorológica portátil, chamada Data Logger, cuja precisão na medida da pressão é 0,25%, da temperatura é de 1 °C e de umidade relativa 5%.

## 2.3 Levantamento de Campo

O levantamento foi realizado no dia 09 e 10 de agosto de 2021, em três posições distintas, duas delas a montante do barramento e uma a jusante. O ponto denominado Pilar 01 situa-se na margem direita, a montante do barramento, o Pilar 02, também a montante, na margem esquerda, o Pilar 03 encontra-se a jusante, os pontos monitorados denominados CG01 e CG02 estão localizados na crista da barragem.

Esses três pilares foram construídos antes mesmo da finalização da construção da barragem e para certificar sua estabilidade, foram construídos de forma que sua fundação alcance as rochas da região. Na parte superior dos pilares foi instalado um sistema de centragem forçada, com uma rosca padrão 5/8", compatível com os equipamentos geodésicos. Este sistema garante que esses pontos possam ser reocupados pelo equipamento ou prisma em épocas distintas. De acordo com Nadal (2000), a estimativa da repetibilidade na reocupação utilizando esse sistema é da ordem do décimo de milímetro.



Figura 3 – Pontos utilizados nos levantamentos (norte verdadeiro).  
Fonte: Adaptado Google Earth (2021).



Figura 4 – Ponto localizado na crista da barragem (CG01).  
Fonte: Autores (2021).

Os pontos monitorados estão localizados na crista da barragem e como já descritos, são denominados CG01 e CG02. O procedimento de campo fundamentou-se na realização de seis séries de leituras, em pontaria direta e inversa da luneta (PD, PI). A primeira série, como forma de orientação para o sistema de reconhecimento automático de alvos e os demais de forma automática pelo sistema ATR do equipamento. O levantamento foi realizado em três horários distintos, no dia 09 no período da noite, com início às 19 h e término 23 h 10 min, no dia 10 no período da manhã, com início às 10 h e finalização às 13 h e no período da tarde, início às 14 h 50 min e finalização às 17 h 20 min.

Tabela 1 – Variações de Pressão e Umidade

	Pilar 01		Pilar 02		Pilar 03	
	Pressão (mBar)	Umidade (%)	Pressão (mBar)	Umidade (%)	Pressão (mBar)	Umidade (%)
<b>Manhã</b>	943	47-57	940	34-45	940	30
<b>Tarde</b>	938	22	939	19	945	23
<b>Noite</b>	942	43-52	931	86-90	949	77

Fonte: Autores (2024).

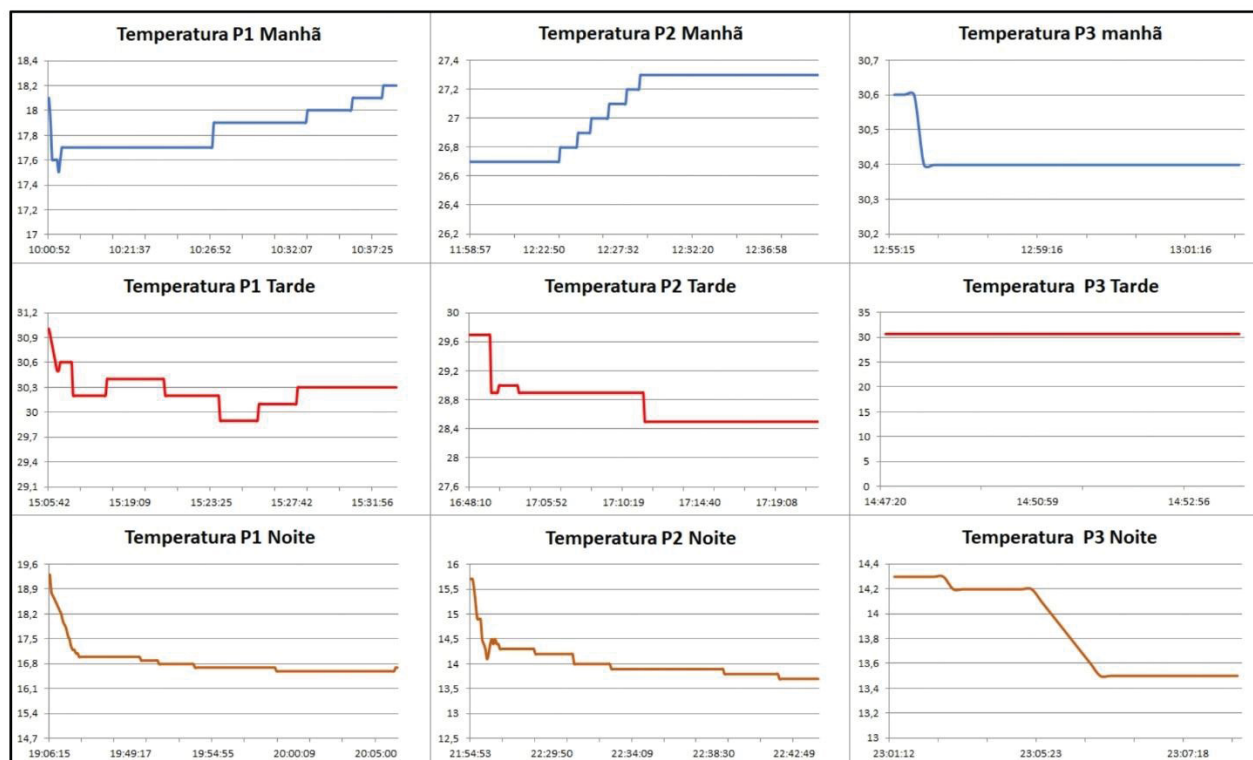


Figura 5 – Variação temperatura ao longo do levantamento.

Fonte: Autores (2024).

O levantamento dos pontos materializados pelos prismas (CG01 e CG02), consiste em instalar a estação Total TS15 no Pilar 01, orientar no Pilar 02 e na sequência realizar as medições nos dois pontos de interesse. Prosseguindo o equipamento foi instalado no Pilar 02, com a orientação no Pilar 01 e por último o equipamento foi instalado no Pilar 03 com orientação no Pilar 02. Todos os levantamentos seguiram rigorosamente os procedimentos contidos na NBR 13.133 (ABNT, 2021).

## 2.4 Processamento dos dados

Após os dados obtidos com a estação total conforme instruções indicadas no manual do equipamento é necessário corrigir as distâncias medidas, devido às variações das condições atmosféricas (LEICA GEOSYSTEMS, 2015). Sabendo disso, no mesmo instante da realização das medições, efetuou-se o levantamento das condições atmosféricas, utilizando o equipamento Data Logger.

Conhecendo as informações de pressão, umidade e temperatura, é possível realizar a correção das distâncias inclinadas, de acordo com a equação 1 (LEICA GEOSYSTEMS, 2015):

Equação 1 Correção atmosférica:

$$K' = 286,34 - \left[ \frac{0,29525p}{1 - \alpha t} - \frac{4,126 \cdot 10^{-4}h}{1 + \alpha t} \cdot 10^x \right]$$

Em que:  $K'$  = Correção atmosférica em PPM,  $p$  = Pressão em mbar ou hPa,  $t$  = Temperatura em °C,  $h$  = Umidade do ar,  $\alpha = 1/273,15$  e  $x = \left( \frac{7,5t}{237,3+t} \right) + 0,7857$ .

Para a correção das distâncias inclinadas utilizou-se o software Excel.

## 2.5 Sistema de referência utilizado

Com o objetivo de facilitar o entendimento e a interpretação das coordenadas oriundas dos levantamentos topográficos realizados, estabeleceu-se um sistema Geodésico Cartesiano Local (SGCL), nomeado Sistema de Barragem (SB), sendo um referencial cartesiano local com um eixo "X" no sentido longitudinal da estrutura com orientação positiva na direção da margem direita e o eixo "Y" perpendicular a este e orientação positiva no sentido do fluxo do rio (montante para jusante). O eixo "Z", com sentido positivo para o Zênite. Mais detalhes, sobre a implantação deste sistema de referência podem ser encontrados em Da Cruz (2015).



Figura 6 – Croqui sistema de referência utilizado (norte verdadeiro).

Fonte: Adaptado Google Earth (2021).

## 2.6 Cálculo das coordenadas

Com as coordenadas de partida já no SGCL e os valores ângulo vertical, direção horizontal e distância inclinada (corrigida de acordo com a equação 1) das 6 séries de observações medidas, calculou-se todas as coordenadas dos pontos levantados, utilizando o software o Posição.

Tabela 2 – Coordenadas de partida no SGCL.

	X (m)	$\sigma$ (m)	Y(m)	$\sigma$ (m)	Altitude (m)	$\sigma$ (m)
Pilar 01	903,834	0,001 <sup>2</sup>	73,730	0,001 <sup>2</sup>	4,629	0,002 <sup>2</sup>
Pilar 02	149,123	0,001 <sup>2</sup>	142,377	0,001 <sup>2</sup>	15,998	0,002 <sup>2</sup>
Pilar 03	653,586	0,001 <sup>2</sup>	453,844	0,001 <sup>2</sup>	-49,976	0,002 <sup>2</sup>

Fonte: Autores (2024).

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1 Coordenadas obtidas

Segundo Dalmolin (2004), toda medida contém algum erro, ou seja, não é possível obter valores idênticos para um conjunto de medidas, mas valores dispersos dentro de um intervalo que variam em função desses erros. Conforme Gemael, Machado e Wandresen (2015), os erros não são provenientes apenas de falhas humanas, mas também da imperfeição dos equipamentos e das condições ambientais que envolvem a medição. Nesse caso o levantamento de seis séries de observações foi realizado, com o objetivo de obter um único resultado que possa representar esse ponto com um grau de confiança adequado, segundo a NBR 13.133 (ABNT, 2021), a média aritmética das observações é o valor mais provável, quando se desconhece o valor verdadeiro e nesse caso, pode ser calculada.

Conforme Taylor (2012), a maneira mais útil de estimar a qualidade desses dados, é verificando a dispersão das medidas, para isso é necessário calcular o desvio padrão dessa média, de forma a avaliar como esses valores individuais estão distantes do valor médio.

As coordenadas foram calculadas para cada série de observações, sendo representadas pela média das seis séries para o ponto CG01 e para o ponto CG02, com seus respectivos valores de desvio padrão, os dados estão identificados conforme período do levantamento e ponto ocupado pela estação total.

Tabela 3 – Coordenadas Calculadas CG01.

CG01	Pilar 01		Pilar 02		Pilar 03	
	X(m)	$\sigma$ (mm)	X(m)	$\sigma$ (mm)	X (m)	$\sigma$ (mm)
Manhã	668,6433	0,79	668,6475	1,09	668,6427	3,06
Tarde	668,6437	0,78	668,6471	0,24	668,6431	1,28
Noite	668,6444	0,93	668,6435	0,41	668,6403	0,74
	Y(m)	$\sigma$ (mm)	Y(m)	$\sigma$ (mm)	Y(m)	$\sigma$ (mm)
Manhã	207,4342	1,31	207,4382	3,11	207,4313	3,06
Tarde	207,4359	1,26	207,4352	2,78	207,4324	0,41
Noite	207,4339	1,32	207,4346	2,94	207,4328	0,23

Fonte: Autores (2024).

Tabela 4 – Coordenadas Calculadas CG02.

CG02	Pilar 01		Pilar 02		Pilar 03	
	X(m)	$\sigma$ (mm)	X(m)	$\sigma$ (mm)	X (m)	$\sigma$ (mm)
Manhã	352,4851	0,80	352,4883	1,39	352,4830	1,97
Tarde	352,4852	0,66	352,4882	0,52	352,4838	0,82
Noite	352,4874	1,86	352,4875	1,22	352,4836	1,29
	Y(m)	$\sigma$ (mm)	Y(m)	$\sigma$ (mm)	Y(m)	$\sigma$ (mm)
Manhã	207,0645	1,90	207,0678	1,39	207,0597	2,29
Tarde	207,0664	2,90	207,0672	0,52	207,0606	1,05
Noite	207,0628	2,56	207,0662	1,22	207,0610	1,66

Fonte: Autores (2024).

<sup>2</sup> Diferenças no desvio padrão ocorreram no décimo de milímetro, mas foram mascarados pelo arredondamento para milímetros.

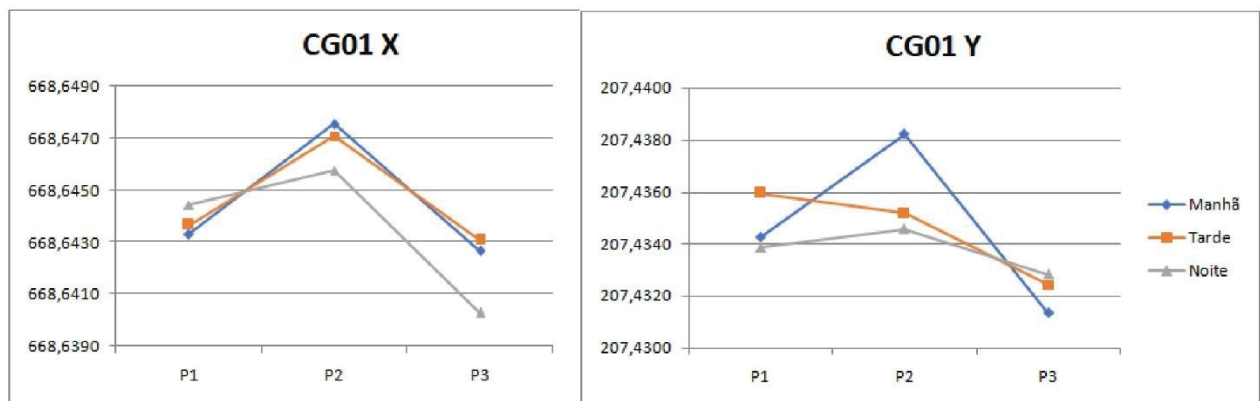


Figura 7 – Coordenadas CG 01.  
Fonte: Autores (2023).

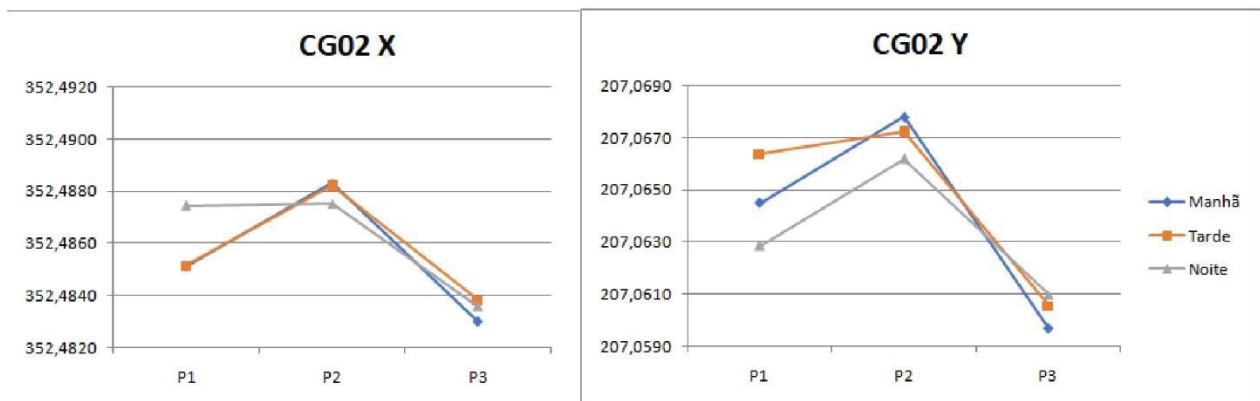


Figura 8 – Coordenadas CG02.  
Fonte: Autores (2023).

### 3.2 Análise dos erros

Para analisar a precisão das coordenadas calculadas, analisou-se a precisão das medidas de distância, segundo NBR 13.133 (ABNT, 2021), que foi da ordem de 1 mm, na sequência realizou-se a propagação de erros com base na precisão nominal do equipamento e na precisão das medidas realizadas de forma indireta (como as medidas de altura do instrumento e sinal), a incerteza das coordenadas calculadas para os pontos CG01 e CG02 nos eixos x e y.

Tabela 5 – Propagação de erros.

	Pilar 01		Pilar 02		Pilar 03	
	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_y$ (mm)	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_y$ (mm)	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_y$ (mm)
<b>CG01</b>	1,4	1,6	1,4	2,6	1,6	1,3
<b>CG02</b>	1,5	2,7	1,3	1,5	1,7	1,9

Fonte: Autores (2023).

Na sequência analisou-se estatisticamente as coordenadas calculadas de acordo com o teste de hipótese, considerando o período do dia e o ponto ocupado, de forma a verificar se os valores médios das coordenadas são iguais ou não. A hipótese nula afirma que as coordenadas são iguais e a hipótese alternativa que eles são diferentes.

- Hipótese nula  $H_0: X_{i,j} = X_{i,j}$
- Hipótese alternativa:  $H_a: X_{i,j} \neq X_{i,j}$

Os coeficientes  $i$  identificando o ponto ocupado (Pilar 01, Pilar 02 ou Pilar 03) e  $j$  identificando o período do dia (Manhã, Tarde ou Noite), de forma que todas as combinações sejam avaliadas, excluindo combinações com os mesmos coeficientes.

Para avaliar as hipóteses utilizou-se a distribuição de  $t$  de *Student*, que segundo Gemael, Machado e Wandresen (2015) é a distribuição indicada quando a amostra tem menos que 30 elementos, ele pode ser calculado a partir da Equação 2.

Equação 2: T de Student:

$$T = \frac{\overline{x_{i,j}} - \overline{x_{i,j}}}{\sqrt{\frac{s^2}{v} + \frac{s^2}{v}}}$$

Onde:  $T$  = distribuição  $T$  de *Student*;  $\overline{x_{i,j}}$  = Média aritmética das observações (assumindo  $i$  como local ocupado e  $j$  período do dia, de forma que combinações com coeficientes iguais seja excluída);  $s$  = Desvio padrão da média;  $v$  = graus de liberdade.

Nesse caso utilizou-se nível de significância de 5%, assumindo o grau de liberdade igual a 10, podemos verificar na tabela de  $T$  de *Student* que o valor crítico que é de 2,228. Logo todas as combinações de hipótese foram testadas de forma que a hipótese nula seja verdadeira para valores entre -2,228 e 2,228.

De acordo com o valor crítico, todas as estatísticas calculadas apresentaram valores inferiores ao limite estabelecido, sendo assim, a hipótese nula é verdadeira para todos as combinações.

Outra análise estatística realizada, foi a elipse de erros. Segundo Gemael, Machado e Wandresen (2015) a partir da matriz variância e covariância é possível estimar as coordenadas em uma região compreendida dentro de uma elipse, onde é expresso em valores numéricos desvio-padrão das direções  $x$  e  $y$ . A formulação matemática pode ser vista em Wolf e Ghilani (1997).

O tamanho das elipses é uma maneira de mensurar o grau de confiança em relação à posição das coordenadas ajustadas, pois avaliando a dimensão da elipse é possível verificar as incertezas em  $x$  e  $y$ .

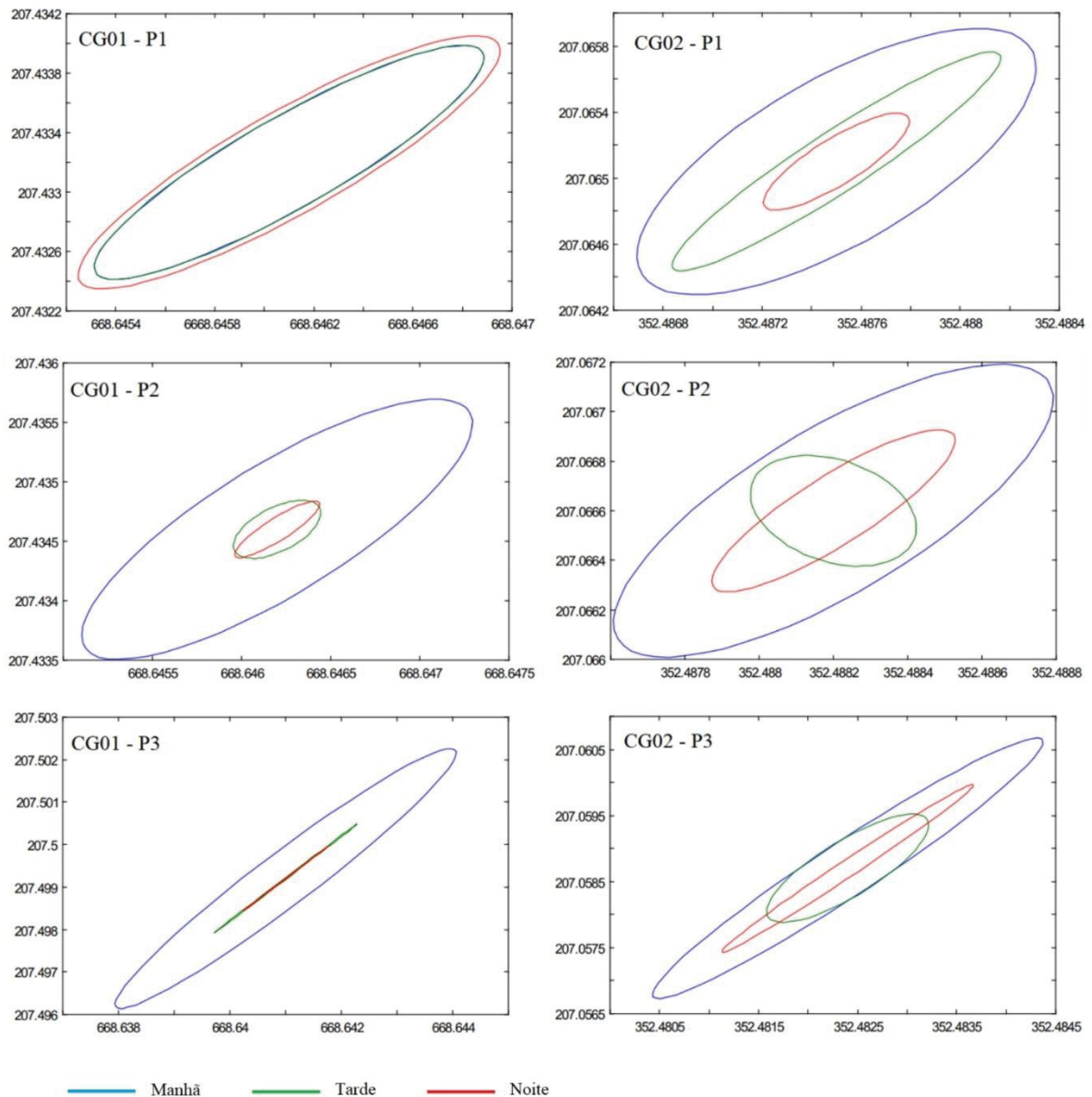


Figura 9 – Elipses de erro dos pontos CG01 e CG02 a partir dos pilares 01, 02 e 03.

Fonte: Autores (2024).

#### 4. Considerações finais

As coordenadas obtidas para CG01 e CG02 a partir dos três pontos, Pilar 01, Pilar 02 e Pilar 03, foram selecionadas devido a variação do meio percorrido pela onda eletromagnética, pois cada linha de visada possui características distintas, logo, condições atmosféricas bem diferentes, as linhas de visada foram representadas por cores, a linha de cor vermelha representa a vista em duas dimensões do caminho entre o Pilar 01 aos pontos CG01 e CG02, já a linha de cor amarela é o percurso entre o Pilar 02 e os pontos CG01 e CG02 e a linha de cor azul entre o Pilar 03 e os dois pontos CG.

A linha de visada a partir do Pilar 01 é a que passa mais próximo a água do reservatório, já que o desnível entre o pilar e os pontos CG é de aproximadamente 4 metros, além de o percurso ser quase todo acima do reservatório.

Já a linha de visada a partir do Pilar 02 possui outras características, o desnível entre os pontos monitorados e o ponto ocupado é de aproximadamente 15 metros, ou seja, o trajeto é mais afastado da lâmina de água e a visada é formada por um misto de vegetação, concreto e água, mudando a proporção conforme o ponto monitorado.

O levantamento a partir do Pilar 03, que fica a jusante da barragem, apresenta um desnível da ordem de aproximadamente 50 metros e, além disso, a linha de visada não percorre um trajeto próximo da superfície, possui uma massa de água menor e parte da visada é sobre o concreto que forma a barragem.

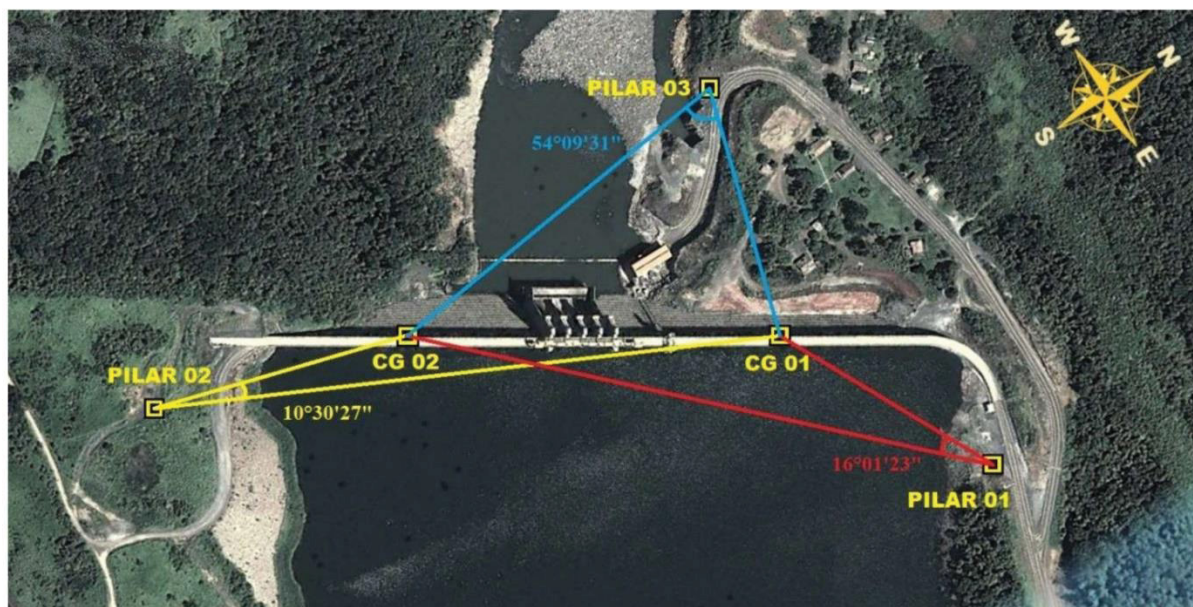


Figura 10 – Linhas de visada com seus respectivos ângulos (indicação norte verdadeiro).

Fonte: Adaptado Google Earth (2021).

Sabendo que as coordenadas foram calculadas após a correção das distâncias, pode-se estabelecer que as variações das mesmas são provenientes de erros introduzidos nas medidas, possivelmente das direções horizontais e ângulos verticais.<sup>1</sup> Observando os gráficos, as coordenadas calculadas mostram que ao longo do dia não variam significativamente. Porém, existe uma tendência que depende mais do ponto ocupado pelo equipamento durante o monitoramento. Isso não ocorre quando as coordenadas de CG01 são obtidas a partir de P1 no período da tarde e a partir de P2 no período da manhã, pois estes apresentam um comportamento divergente.

Todas as demais coordenadas mostram um comportamento similar, em que as coordenadas X são menores a partir do Pilar 03, valores intermediários a partir do Pilar 01 e valores maiores quando levantados a partir do Pilar 02. O mesmo acontece com as coordenadas em Y, os menores valores das coordenadas são obtidos a partir do Pilar 03 depois a coordenada a partir do Pilar 01 e o maior valor da coordenada Y é obtido a partir do Pilar 02.

Verificando esse comportamento e sabendo que o erro devido a variação da distância já foi minimizado, sugere-se que os possíveis erros podem ser, devido a efeitos da refração na medida das direções horizontais e ângulos verticais,<sup>1</sup> como já descrito anteriormente, a influência da distribuição de temperatura, pressão e umidade nessa região, provocaria variação do índice de refração ao longo do caminho da onda eletromagnética. Essa variação poderia ser uma justificativa para as variações nas coordenadas calculadas.

Analisando as elipses de erro é possível verificar que em quase todas as elipses de erro (exceto CG01 a partir do Pilar 01), as maiores variações foram no período da manhã, o que sugere que a incidência solar pode causar uma alteração do índice de refração ao longo do período de levantamento. Após esses estudos recomenda-se uma investigação mais detalhada, com observações recíprocas e simultâneas, para verificar o comportamento das coordenadas com as variações do índice de refração ao longo do dia.

## Agradecimentos

Agradecemos ao curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas pela oportunidade de desenvolver essa pesquisa, a COPEL por disponibilizar a área para o estudo.

## Referências

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 13133: Execução do levantamento topográfico – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- BÖCKEM, B. et al. Refraction Influence Analysis and Investigations on Automated elimination of Refraction Effects on Geodetic Measurements. *XVI IMEKO World Congress*, 2000.
- BRASIL. [Lei nº12.334]. *Política nacional de segurança de barragens*. Brasília, DF: Presidente da República, [2010]. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm). Acesso em 02/02/2023
- COPEL - Companhia Paranaense de Energia. Geração. 2021. Disponível em: <http://www.consorcioceirodosul.com.br/a-usina>. Acesso em: 20 out. 2021.
- DA CRUZ, W. *Integração de dados de monitoramento de estruturas antrópicas. Estudo de caso: UHE Mauá*. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2015.
- Dalmolin, Q. *Ajustamento por Mínimos Quadrados*. 2ª ed. Ed UFPR, 2004. 175p.
- Gemael, C.; Machado, A. M. L.; Wandresen, R. *Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas*. 2. ed. Ed. UFPR. 2015. 428p.
- Hecht, E. *Óptica*. 1 ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1991. 724p.
- LEICA GEOSYSTEMS. Leica TS15. *Manual de operação, versão 3.0, espanhol*. 2015.
- NADAL, C. A. *Método da inserção óptica tridimensional aplicado à engenharia de precisão*. Curitiba, 2000. 116f. Tese (doutorado em Ciências Geodésicas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2000.
- RODRIGUEZ, F. A. C. *Automação da Correção da Primeira Velocidade em Medidas Eletrônicas de Distância com Base em uma Rede de observação de Parâmetros Ambientais Multi-estações*. Curitiba, 2018. 151f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2018.
- Rodriguez, F. A. C.; Veiga, L. A. K. Desenvolvimento de Interface para Automação da Coleta de Temperatura Baseada em Redes Multiestação Aplicada ao Monitoramento de Estruturas Empregando-se Estações Totais, *Revista Brasileira de Cartografia*. v. 71, n. 3, 781–805, 2019.
- SIGUEL, A. R. *Monitoramento da Barragem da Usina Hidrelétrica Mauá Utilizando irradiação Tridimensional*. Curitiba, 2013. 171f. Dissertação (mestrado em ciências geodésicas) - Pós-graduação em ciências geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- Taylor, J.R. *Introdução à Análise de Erros*. Bookman, 2012. 176p.
- Tsoulis, D.; Petrović, S.; Kilian, N. Theoretical and Numerical Aspects of the Geodetic Method for Determining the Atmospheric Refraction Coefficient Using Simultaneous and Mutual Zenith Observations. *Journal of Surveying Engineering* V. 134, n. 1, 3-12, 2008.
- Wolf, P. R.; Ghilani, C. D. *Adjustment computations: statistics and least squares in surveying and GIS*. 3ed. John Wiley & Sons Inc., 1997. 562p.

## 4.2 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL UTILIZANDO VISADAS RECÍPROCAS E SIMULTÂNEAS ANÁLISE DE SUA APLICAÇÃO NO CÁLCULO DO DESNÍVEL UTILIZANDO NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO

Um estudo para analisar como são os efeitos da refração atmosférica na determinação de desníveis, foi o apresentado nesse artigo, utilizando dados obtidos pelo método de nivelamento geométrico de primeira ordem. A partir da equação do método de nivelamento trigonométrico, calculou-se o valor do índice de refração local, de forma recíproca e simultânea, entre três pilares situados as margens da barragem e em três períodos distintos do dia. Após esse cálculo, analisou-se o comportamento do índice de refração vertical calculado e sua relação com as condições atmosféricas local, assim como, nos valores de desnível entre os pilares P1, P2 e P3 e dois pontos de monitoramento situados na crista da barragem, denominados CG01 e CG02.

Analisando os valores dos desníveis obtidos através do nivelamento trigonométrico, utilizando o índice de refração calculado, em cada período do dia e para cada linha de visada, é possível perceber que os desníveis apresentaram melhora na maior parte dos casos, em comparação com o  $k = 0,13$ . Porém, este mesmo comportamento não foi observado para os desníveis obtidos a partir do Pilar 3 situado a jusante da barragem. Estima-se que esse fenômeno ocorreu em função da alta umidade do local, devido a névoa, provocada em razão da vazão da água pelo vertedouro, que estava com as três comportas abertas.

O artigo foi aceito 05 de março de 2025, na Revista de Geociências do Nordeste, classificado como A2 no Qualis periódico da Capes referente ao quadriênio 2017-2020 e possui CiteScore 0,5 da Scopus. O artigo pode ser acessado pelo link

<https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/36762/20304>



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

*Northeast Geosciences Journal*

v. 11, nº 1 (2025)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n1ID36762>

## Determinação do índice de refração vertical, utilizando visadas recíprocas e simultâneas: análise de sua aplicação no cálculo do desnível utilizando nivelamento trigonométrico

*Determination of the vertical refractive index, using reciprocal and simultaneous views: analysis of its application in calculating the unevenness using trigonometric leveling*

Dayane Wiggers<sup>1</sup>; Pedro Luis Faggion<sup>2</sup>; Wander da Cruz<sup>3</sup>; Samir de Souza Oliveira Alves<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Paraná/Departamento Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: dayane@ufpr.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7339-9436>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Paraná/Departamento Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: dayane@ufpr.br

ORCID D: <https://orcid.org/0000-0002-4881-8720>

<sup>3</sup> Universidade Federal do Paraná/Departamento Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: dayane@ufpr.br

ORCID D: <https://orcid.org/0000-0003-0738-1283>

<sup>4</sup> Universidade do Estadual do Rio de Janeiro/Departamento de Engenharia Cartográfica, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Email: samir.alves@eng.uerj.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3083-0681>

**Resumo:** A segurança e a eficiência operacional de barragens são aspectos cruciais para sua utilização. No entanto, o monitoramento dessas estruturas enfrenta diversos desafios. No contexto do monitoramento de barragens, a utilização de estações totais tem sido uma prática para o controle do deslocamento de pontos de monitoramento. No entanto, a refração atmosférica pode introduzir erros significativos nas medições realizadas, afetando a precisão e confiabilidade dos resultados. Pensando nisso, neste trabalho foi realizado um estudo na usina hidrelétrica de geração de energia denominada, Jayme Canet Junior, para avaliar como são os efeitos da refração atmosférica na determinação da constante de refração ( $k$ ), necessária para o cálculo de desníveis utilizando nivelamento trigonométrico, utilizando como referência os desníveis obtidos pelo método de nivelamento geométrico de primeira ordem. A partir da equação do método de nivelamento trigonométrico, calculou-se o valor do índice de refração local, de forma recíproca e simultânea, entre três pilares. Dois situados montante, na margem direita (P1) e na margem esquerda (P2) e um terceiro a jusante. As medições foram realizadas em três períodos distintos do dia. Após os cálculos, analisou-se o comportamento do índice de refração, sua relação com as condições atmosféricas local e nos valores de desnível entre os pilares P1, P2 e P3 e dois pontos de monitoramento situados na crista da barragem, denominados CG01 e CG02. Analisando os valores dos desníveis obtidos através do nivelamento trigonométrico, utilizando o índice de refração ( $k$ ) calculado, em cada período e para cada linha de visada, é possível perceber que os valores dos desníveis apresentam melhora na maior parte dos casos em comparação com o emprego do valor  $k = 0,13$ . Porém, este mesmo comportamento não foi observado para os desníveis obtidos a partir do Pilar 3 (P3 – CG01; P3 – CG02), situado a jusante da barragem. Estima-se que esse fenômeno ocorreu em função da alta umidade do local, devido a névoa, provocada em razão da vazão da água pelo vertedouro, que estava com as três comportas abertas.

**Palavras-chave:** Índice de refração vertical; Monitoramento de estruturas; Nivelamento.

**Abstract:** The safety and operational efficiency of dams are crucial aspects for their use. However, monitoring these structures faces several challenges. In the context of dam monitoring, the use of total stations has been a practice for controlling the movement of monitoring points. However, atmospheric refraction can introduce significant errors into the measurements performed, affecting the accuracy and reliability of the results. With this in mind, in this work a study was carried out at the hydroelectric power generation plant called Jayme Canet Junior, to analyze the effects of atmospheric refraction in determining unevenness, using data obtained by the first order geometric leveling method. Using the trigonometric leveling method equation, the value of the local refractive index was calculated, reciprocally and simultaneously, between three pillars located on the banks of the dam and in three different periods of the day. After this calculation, the behavior of the refractive index was analyzed, its relationship with local atmospheric conditions and the difference in level between pillars P1, P2 and P3 and two monitoring points located on the crest of the dam, called CG01 and CG02. Analyzing the unevenness values obtained through trigonometric leveling, using the calculated refractive index ( $k$ ), in each period and for each line of sight, it is possible to see that the unevennesses show improvement in most cases compared to  $k = 0,13$ . However, this same behavior was not observed for the differences in level obtained from Pillar 3 (P3 – CG01; P3 – CG02), located downstream of the dam. It is estimated that this phenomenon occurred due to the high humidity in the area, due to fog, caused by the flow of water through the spillway, which had three gates open.

**Keywords:** Vertical refractive index; Monitoring of structures; Leveling.

Recebido: 26/06/2024; Aceito: 10/03/2025; Publicado: 08/04/2025.

<sup>1</sup> No artigo todos os ângulos verticais têm origem no zênite, desta forma, podem ser denominados ângulo zenital.

## 1. Introdução

A segurança e a eficiência operacional de barragens são aspectos cruciais para sua utilização. No entanto, o monitoramento dessas estruturas enfrenta diversos desafios. No contexto do monitoramento de barragens, a utilização de estações totais tem sido uma prática para o controle do deslocamento de pontos de monitoramento dessas estruturas. No entanto, a refração atmosférica pode introduzir erros significativos nas medições realizadas por estas estações, afetando a precisão e confiabilidade dos resultados.

A refração atmosférica é um fenômeno óptico, que resulta da variação da densidade do ar, devido a variação de parâmetros ambientais como, temperatura, pressão e umidade, causando um desvio da onda eletromagnética utilizada pelo equipamento para realizar as medições (RUEGER, 1996). Essa curvatura pode distorcer a geometria das medições realizadas, afetando assim a determinação das coordenadas e conseqüentemente o monitoramento dos pontos de interesse na estrutura.

Esse fenômeno tem sido objeto de estudo em diversas áreas, incluindo geodésia, e ocorre devido à variação da densidade do ar, resultando na curvatura dos feixes de luz à medida que atravessam diferentes camadas da atmosfera (TORGE, 2001). A influência da refração atmosférica no monitoramento de estruturas, como barragens de geração de energia, tem despertado crescente interesse devido a diversos acidentes e incidentes ocorridos nos últimos anos.

Estudos anteriores têm investigado os efeitos da refração atmosférica nas medições realizadas por estações totais em diversas condições ambientais e geográficas. Por exemplo, pesquisas de Shen et al. (2017) demonstraram que a refração atmosférica pode causar desvios consideráveis nas medições de distância e direção, especialmente em regiões com variações abruptas de temperatura e umidade.

Para mitigar os efeitos adversos da refração atmosférica na determinação de desnível com estação total, têm sido propostas diferentes abordagens. Uma delas é a utilização de modelos matemáticos para corrigir as medições, considerando as condições atmosféricas locais. Estes modelos consideram parâmetros como temperatura, pressão e umidade do ar, para calcular os desvios introduzidos pela refração atmosférica e corrigir os valores medidos de acordo com esse parâmetro.

Em suma, compreender e mitigar os efeitos da refração atmosférica nas medições com estação total é fundamental, para garantir a segurança e eficiência operacional dessas estruturas. Futuras pesquisas nesta área, podem se concentrar no desenvolvimento de modelos mais precisos e eficazes de correção atmosférica, bem como na integração de diferentes técnicas de monitoramento, para obter resultados mais confiáveis.

Nesse trabalho foram estudados os efeitos da refração atmosférica, utilizando dados dos desníveis obtidos pelo método de nivelamento geométrico de primeira ordem, com precisão melhor que 1mm/km e a partir da equação do método de nivelamento trigonométrico, calculou-se o valor do índice de refração local, em três períodos do dia e com características de temperatura, pressão e umidade distintas. Após esse cálculo, analisou-se o comportamento do índice de refração, nos valores de desnível, entre esses pilares (P1, P2 e P3) e dois pontos situados na crista da barragem, denominados CG01 e CG02.

## 2. Metodologia

### 2.1 Área de estudo

A área de estudo localiza-se na Usina Hidrelétrica Governador Jayme Canet Júnior, que fica entre os municípios de Ortigueira e Telêmaco Borba, formado pelo represamento do rio Tibagi, pertencente a região do Salto Mauá, no estado do Paraná, no Brasil. A barragem atende ao consumo de aproximadamente 1 milhão de pessoas, feita em concreto compactado a rolo e dimensões de 745 m de comprimento na parte superior e 85 m de altura máxima, proporcionando a formação de 83,9 km<sup>2</sup> de área inundada no reservatório, quando operado em seu nível máximo (WIGGERS et al, 2020).



Figura 1 – Área onde foram realizados os levantamentos.

Fonte: Adaptado de Siguel (2013).

## 2.2 Equipamentos Utilizados

Para a medição das direções horizontais, ângulos verticais e distâncias inclinadas, utilizou-se três Estações Totais, duas Leica, modelo TS15 e uma TCRA 1205, as quais possuem a capacidade de realizar leituras de forma automática, através da função de reconhecimento automático de alvos (ATR), um sistema de detecção do prisma com maior rapidez e menor influência do operador.

As estações TS15 quando utilizadas em conjunto com o prisma Leica modelo GPR111, possuem precisão da medida angular de 3" e 5" e precisão linear de 1mm + 1,5ppm (LEICA GEOSYSTEMS, 2015A). Já a estação TCRA 1205 possui precisão angular de 5" e linear de 1mm + 1,5ppm (LEICA GEOSYSTEMS, 2015B).

Esses equipamentos foram submetidos a rigorosos critérios de verificação, com a utilização de colimadores, assim como uma base linear para calibração de seu medidor eletrônico de distância, em estruturas disponíveis do Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG), pertencente a Universidade Federal do Paraná, onde também são classificados, garantindo a confiabilidade da precisão nominal do instrumento.

Juntamente com a estação total, utilizam-se prismas Leica, modelo GPR111, que foram instalados acima da alça do equipamento, para que fosse possível realizar visadas recíprocas e simultâneas. E nos pontos CG01 e CG02 utilizou-se Prismas 360°, modelo ZRD121.



*Figura 2 – Instalação prisma na alça da estação total.  
Fonte: Autores (2024).*

Já os dados de nivelamento geométrico foram obtidos com o nível digital Leica DNA03 capaz de realizar medições eletronicamente com um desvio padrão de  $\pm 0,3$  mm/km para duplo nivelamento, quando utilizada mira de invar gravada em código de barras (LEICA GEOSYSTEMS, 2006). Juntamente com o conjunto de nível e mira, faz-se necessário durante o caminhamento à utilização de sapatas, de modo a garantir que o mesmo ponto seja ocupado na leitura de ré e vante. Para as medidas da altura das roscas, utilizou-se um paquímetro com precisão nominal de 0,01mm.

O conjunto nível e mira é calibrado periodicamente também no Laboratório de Instrumentação Geodésica, onde através da utilização de um interferômetro é possível estabelecer uma equação de correção das medidas, garantindo a confiabilidade da precisão nominal do instrumento. Mais detalhes podem ser consultados em Gemin (2017).

A temperatura, pressão atmosférica e umidade foram medidas por uma estação meteorológica portátil, o termohigrômetro Datalogger, cuja precisão na medida da pressão é  $\pm 1,5$ mbar, da temperatura é de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  e de umidade relativa  $\pm 3\%$ .

### **2.3 Levantamento de Campo**

Nos dias 13 e 14 de novembro de 2023, realizou-se o nivelamento trigonométrico em três posições distintas, duas delas a montante do barramento e uma a jusante. O ponto denominado Pilar 01 situa-se na margem direita, a montante do barramento, o Pilar 02, também a montante, na margem esquerda, o Pilar 03 encontra-se a jusante.

Esses três pilares foram instalados antes mesmo da finalização da construção da barragem e para certificar sua estabilidade, foram construídos de forma que sua fundação alcance as rochas da região (SIGUEL, 2013). Na parte superior dos pilares foi instalado um sistema de centragem forçada, com uma rosca padrão 5/8", compatível com os equipamentos geodésicos. Este sistema garante que esses pontos possam ser reocupados pelo equipamento ou prisma em épocas distintas. De acordo com Nadal (2000), a estimativa da repetibilidade na reocupação utilizando esse sistema é da ordem do décimo de milímetro.



Figura 3 – Pontos utilizados nos levantamentos (norte verdadeiro).

Fonte: Wiggers *et al.* (2025).

Para que fosse possível realizar as visadas recíprocas e simultâneas, desenvolveu-se um adaptador acoplado a alça da estação total, que materializa a projeção do ponto cardan da estação. Este, foi desenvolvido pelos autores, através do escaneamento da alça, de forma que suas dimensões fossem estabelecidas, em seguida o projeto da peça foi realizado, através do software Tinkercad e então utilizando a impressora 3D, marca Creality CR10 V2, foi possível imprimir a peça que foi fixada na alça das estações totais, através de abraçadeiras de nylon.



Figura 4 – Suportes desenvolvidos para o levantamento em visadas recíprocas.

Fonte: Autores (2024).

O procedimento de campo fundamentou-se na realização de seis séries de leituras, em pontaria direta e inversa da luneta (PD, PI). O levantamento foi realizado em três horários distintos, no dia 13 no período da tarde, com início às 15 h 37 min e término 16 h, no dia 14 no período da manhã um levantamento, com início às 7 h e 13 min e finalização às 7 h e 31 min e outro também no período da manhã, com início às 10 h e 59 min e finalização às 11 h 14 min. As visadas foram realizadas simultaneamente entre os pilares 01 e 02 e depois entre os pilares 02 e 03, também de forma simultânea. Os pontos CG01 e CG02 foram visados a partir dos três pilares, de forma simultânea, com a utilização de prismas 360°. Com a utilização de rádios de comunicação, estabeleceu-se o momento de início das medições. Durante o levantamento realizou-se a medição da temperatura, pressão e umidade em cada um dos pilares, ocupados pelas estações totais.

O nivelamento geométrico entre os três pilares foi realizado em outras campanhas, já que os autores pertencem a um grupo de trabalho que desenvolve atividades de pesquisa, no monitoramento dessa barragem, há um longo período. Os nivelamentos foram realizados seguindo todas as recomendações contidas nas especificações e normas para levantamentos

topográficos da NBR 13133 (ABNT, 2021), e nas Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos em território brasileiro, do IBGE (IBGE,1983) e apresentam valores de erro cometido menores que os valores de erro permitido, em todas as seções.

No nivelamento geométrico entre os pilares 01 e 02, utilizou-se os dados da última campanha realizada em janeiro de 2023. O trabalho iniciou-se no Pilar 02, com a mira de invar apoiada em cima do parafuso de centragem forçada (Figura 5), o caminhamento até o Pilar 01, foi realizado utilizando pontos auxiliares materializados com o auxílio das sapatas, passando pelos pontos CG01 e CG02, localizados na crista da barragem e então pelo referencial de nível (RN) 5, que está localizado ao lado do Pilar 01. Utilizou-se o método de leitura da mira ré, vante, vante, ré para o cálculo do desnível.

Do Pilar 01 até o Pilar 03 existe somente uma campanha de nivelamento geométrico, realizado em julho de 2019. Que foi conduzida da mesma maneira descrita acima, terminando novamente com a mira apoiada em cima do parafuso de centragem forçada do Pilar 03. Após a finalização, com o auxílio de um paquímetro mediu-se a altura das roscas, de forma que todos os desníveis tivessem como referência a base da rosca, a mesma utilizada pelo nivelamento trigonométrico.

A partir dos dados de distância entre o equipamento e a mira, posicionada a ré e a vante, e os valores da altura das miras observadas, o desnível entre os dois pontos será a o valor medido em ré, menos o valor medido em vante. Considerando a base da rosca de centragem forçada, sendo assim, a equação de nivelamento geométrico, dois termos são introduzidos quando essas medições forem realizadas acima das roscas, que se refere a essa altura.

Equação 1 Cálculo desnível geométrico reduzido a base das roscas:

$$\Delta H_{AB \text{ reduzido}} = L_{r\acute{e}} + H_{r \text{ ré}} - L_{v\text{ante}} - H_{r \text{ vante}}$$

Em que:  $\Delta H_{AB \text{ reduzido}}$  = Desnível de A para B reduzido a base da rosca,  $L_{r\acute{e}}$  = Leitura da altura na mira de ré,  $H_{r \text{ ré}}$  = Altura da rosca na leitura de ré,  $L_{v\text{ante}}$  = Leitura da altura na mira de vante,  $H_{r \text{ vante}}$  = Altura da rosca na leitura de vante.



Figura 5 – Nivelamento geométrico no pilar de centragem forçada.  
Fonte: Autores (2024).

## 2.4 Processamento dos dados

Após a coleta dos dados com a estação total, conforme instruções indicadas no manual do equipamento, é necessário corrigir as distâncias medidas, devido às variações das condições atmosféricas (LEICA GEOSYSTEMS, 2015A). Sabendo disso, no mesmo instante da realização das medições, efetuou-se o levantamento das condições atmosféricas, utilizando o equipamento termohigrômetro Datalogger, com intervalos de 5 segundos em cada registro, os parâmetros não variaram significativamente ao longo do levantamento, logo foram utilizados seus valores médios.

Tabela 1 – Variações de Temperatura, Pressão e Umidade

	Pilar 01 - Pilar 02		
	Temperatura (°C)	Pressão (mBar) (mbbçsedk mBar)	Umidade (%)
Tarde	34,0	934,1	59,9
Manhã 1	21,6	938,1	91,3
Manhã 2	21,6	936,5	70,5
Pilar 02 - Pilar 01			
Tarde	29,8	934,2	61,6
Manhã 1	22,8	936,6	77,5
Manhã 2	22,8	935,0	63,6
Pilar 02 - Pilar 03			
Tarde	29,0	934,3	64,8
Manhã 1	22,1	936,3	78,5
Manhã 2	22,1	935,2	63,9
Pilar 03 - Pilar 02			
Tarde	28,4	940,2	73,2
Manhã 1	22,8	942,5	88,4
Manhã 2	22,8	942,1	76,7

Fonte: Autores (2024).

Conhecendo as informações de pressão, umidade e temperatura, medidos durante o levantamento, é possível realizar a correção dos valores das distâncias inclinadas medidos (LEICA GEOSYSTEMS, 2015A; LEICA GEOSYSTEMS, 2015B):

Equação 2 Correção atmosférica TS15:

$$\Delta D = 286,338 - \left[ \frac{0,29535p}{1 + \alpha t} - \frac{4,126 \cdot 10^{-4}h}{1 + \alpha t} \cdot 10^x \right]$$

Equação 3 Correção atmosférica TCRA1205:

$$\Delta D = 286,34 - \left[ \frac{0,29525p}{1 + \alpha t} - \frac{4,126 \cdot 10^{-4}h}{1 + \alpha t} \cdot 10^x \right]$$

Em que:  $\Delta D$  = Correção atmosférica em PPM,  $p$  = Pressão em mbar ou hPa,  $t$  = Temperatura em °C,  $h$  = Umidade do ar em %,  $\alpha = 1/273,15$  e  $x = \left( \frac{7,5t}{237,3+t} \right) + 0,7857$ .

Para a correção das distâncias inclinadas utilizou-se o software Excel. Com os valores das distâncias inclinadas corrigidas e dos ângulos verticais<sup>1</sup> medidos, é possível encontrar os valores das componentes da distância vertical e horizontal.

Utilizando a equação para cálculo do desnível através do nivelamento trigonométrico é possível rearranjá-lo de forma que seja possível encontrar o valor do índice de refração, já que o valor do desnível obtido através do nivelamento geométrico é conhecido, ou seja, o  $\Delta H_{AB}$ .

Equação 4 Cálculo desnível trigonométrico:

$$\Delta H_{AB} = h_i - h_s + D_v + \frac{D_h^2}{2R} + \frac{kD_h^2}{2R}$$

Em que:  $\Delta H_{AB}$  = Desnível de A para B,  $h_i$  = Altura do instrumento,  $h_s$  = Altura do sinal (Prisma),  $D_v$  = Componente de distância inclinada no eixo vertical,  $D_h$  = Componente da distância inclinada no plano horizontal,  $R$  = Raio da terra,  $k$  = Coeficiente de refração.

Se isolarmos o termo  $k$ , que se refere ao coeficiente de refração, pode-se escrever uma equação para a sua determinação.

Equação 5 Cálculo coeficiente de refração vertical:

$$k = \frac{(2R\Delta H_{AB} + 2Rh_i - 2Rh_s + 2RD_v + D_h^2)}{D_h^2}$$

Em que: k = Coeficiente de refração vertical, R = Raio da terra,  $\Delta H_{AB}$  = Desnível de A para B,  $h_i$  = Altura do instrumento,  $h_s$  = Altura do Prisma,  $D_v$  = Componente de distância inclinada no eixo vertical,  $D_h$  = Componente da distância inclinada no plano horizontal.

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1 Nivelamento geométrico

Os valores dos desníveis entre os pilares e os pontos CG01 e CG02, conforme descrito anteriormente e reduzidos a base da rosca, são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Desníveis geométrico entre os pontos.

Linha	Desnível (m)
Pilar01 - Pilar02	11,2944 <sup>3</sup>
Pilar02 - Pilar01	-11,2944 <sup>3</sup>
Pilar02 - Pilar03	-65,8658 <sup>3</sup>
Pilar03 - Pilar02	65,8658 <sup>3</sup>
Pilar01 - CG01	-4,2619
Pilar01 - CG02	-4,2605
Pilar02 - CG01	-15,5546
Pilar02 - CG02	-15,5531
Pilar03 - CG01	50,3095
Pilar03 - CG02	50,3110

Fonte: Autores (2024).

#### 3.2 Índice de refração vertical

Com as distâncias inclinadas já corrigidas dos efeitos ambientais, conforme equações 2 e 3, analisou-se a precisão das distâncias medidas com MED, segundo NBR 13.133 (ABNT, 2021), que foi da ordem de 1,4 mm. Utilizando-se a Equação 5 e com as informações das componentes da distância vertical e horizontal e os valores da altura do instrumento e do prisma, calculou-se os valores do coeficiente de refração vertical para todas as visadas separadamente. Esse cálculo foi realizado para as quatro linhas de visada, em três períodos do dia em que o levantamento foi realizado, sendo possível avaliar o índice de refração vertical ao longo de cada visada individualmente. O índice de refração vertical poderia ser calculado através da equação 4, onde os valores de  $\Delta H_{AB}$ , como foram medidos de forma recíproca e simultânea entre os pilares poderiam ser considerados iguais, mas optou-se por utilizar o valor obtido através do nivelamento geométrico, pois este método garante maior precisão nos resultados, sendo considerado como referência.

Tabela 3 – Alturas do instrumento e prisma.

ALTURAS	(mm)
Hi (P1 P2 P3)	236,7
Hs (P1 P2 P3)	466,2
Hs (P2 - P1) manhã e almoço	469,2

<sup>3</sup> Os valores dos desníveis entre os pilares são iguais devido a utilização do valor médio.

Hs prisma	300,0
-----------	-------

Fonte: Autores (2025).

Tabela 4 – Distâncias período da tarde.

DISTÂNCIAS CORRIGIDAS	Ângulo zenital	Dh (m)	Dv (m)	DI s/ correção	DI c/ correção
Pilar 01 - Pilar 02	89°7'59"	757,8341	11,4717	757,8890	757,9210
Pilar 02 - Pilar 01	90°50'22"	757,8309	-11,1013	757,8830	757,9122
Pilar 02 - Pilar 03	96°19'18"	592,8706	-65,6834	596,4754	596,4980
Pilar 03 - Pilar 02	83°38'20"	592,8774	66,0854	596,5278	596,5492

Fonte: Autores (2025).

Tabela 5 – Distâncias período da manhã 1.

DISTÂNCIAS CORRIGIDAS	Ângulo zenital	Dh (m)	Dv (m)	DI s/ correção	DI c/ correção
Pilar 01 - Pilar 02	89°8'4"	757,8304	11,4713	757,8940	757,9172
Pilar 02 - Pilar 01	90°50'22"	757,8363	-11,0925	757,8934	757,9175
Pilar 02 - Pilar 03	96°19'20"	592,8717	-65,6812	596,4802	596,4989
Pilar 03 - Pilar 02	83°38'20"	592,8774	66,0930	596,5319	596,5500

Fonte: Autores (2025).

Tabela 6 – Distâncias período da manhã 2.

DISTÂNCIAS CORRIGIDAS	Ângulo zenital	Dh (m)	Dv (m)	DI s/ correção	DI c/ correção
Pilar 01 - Pilar 02	89°8'3"	757,8319	11,4746	757,8904	757,9188
Pilar 02 - Pilar 01	90°50'24"	757,8307	-11,1108	757,8836	757,9122
Pilar 02 - Pilar 03	96°19'27"	592,8719	-65,6940	596,4782	596,5005
Pilar 03 - Pilar 02	83°38'20"	592,8783	66,0855	596,5294	596,5500

Fonte: Autores (2025).

Tabela 7 – Índice de refração para cada linha de visada.

Linha de visada	Período	k
Pilar 01 - Pilar 02	Tarde	-0,1235
	Manhã 1	-0,1329
	Manhã 2	-0,0587
Pilar 02 - Pilar 01	Tarde	0,1505
	Manhã 1	0,2784
	Manhã 2	-0,1293
Pilar 02 - Pilar 03	Tarde	-0,7144
	Manhã 1	-0,6344
	Manhã 2	-1,1013
Pilar 03 - Pilar 02	Tarde	0,6397
	Manhã 1	0,9151
	Manhã 2	0,6432

Fonte: Autores (2025).

Observa-se que os valores de  $k$  encontrados, apresentam um comportamento muito semelhante para cada linha de visada. Como as medições foram realizadas de forma recíprocas e simultâneas, ou seja, as condições ambientais ao longo do caminho da onda eletromagnética eram as mesmas, pode-se perceber que os valores dos índices de refração vertical apresentaram valores próximos, mas com sinal contrário.

Quando o meio ao qual as medidas são realizadas, apresentam uma densidade variável, existirá uma curvatura desse feixe, de forma que ele percorra o menor percurso óptico, logo, ao analisar os valores de pressão, temperatura e umidade relativa, podemos fazer uma aproximação do valor da densidade na região próxima aos pilares, onde os parâmetros ambientais foram medidos.

### 3.3 Densidade

Para calcular o valor da densidade precisaríamos levar em conta uma série de fatores como composição do ar, umidade, poluição, além de aspectos termodinâmicos, o que na prática é bastante complexo. Segundo Gill, 1982 o ar seco tem uma composição pouco variável (Nitrogênio 78,1%, Oxigênio 21,0% e Argônio 0,9%), o que varia nesse caso é a quantidade de vapor de água presente nessa mistura. Segundo Petty (2008) a água diferente dos gases permanentes, está constantemente variando na atmosfera. Essas mudanças ocorrem principalmente pela sua evaporação da superfície e da vegetação. Como esses processos dependem, fortemente, das condições locais, a distribuição da água na atmosfera é altamente variável.

Partindo da definição descrita em Petty (2008), que estabelece uma relação matemática para o cálculo da densidade, através de aproximações que partem da definição da lei dos gases ideais, e transformam a temperatura medida em uma temperatura virtual, que é definida como a temperatura que uma parcela de ar seco teria, para que a densidade da parcela seja, igual à densidade da parcela de ar úmido, supondo com as mesmas condições de pressões.

Equação 6 Definição temperatura virtual:

$$T_v = \left[ 1 + \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) q \right] T$$

$$\varepsilon = \frac{R_d}{R_v} = 0,622$$

$$q \approx w = 0,03$$

Em que:  $T_v$  = Temperatura virtual (K),  $R_d$  = constante do gás para o ar seco,  $R_v$  = constante do gás para o vapor de água pura,  $w$  = razão entre a massa de vapor de água e massa de ar seco,  $T$  = Temperatura (K).

Tabela 8 – Temperatura virtual para cada linha de visada.

Linha de visada	Período	Temperatura Virtual (K)
Pilar 01 - Pilar 02	Tarde	312,7498
	Manhã 1	300,1237
	Manhã 2	300,1237
Pilar 02 - Pilar 01	Tarde	308,4732
	Manhã 1	301,3456
	Manhã 2	301,3456
Pilar 02 - Pilar 03	Tarde	307,6586
	Manhã 1	300,6329
	Manhã 2	300,6329
Pilar 03 - Pilar 02	Tarde	307,0477
	Manhã 1	301,3456
	Manhã 2	301,3456

Fonte: Autores (2024).

Mais detalhes dessa definição, pode ser consultada em Perry (2008).

Conhecendo os valores da temperatura virtual, pressão e constante específica do ar seco, é possível calcular o valor da densidade do ar.

Equação 7 Cálculo densidade do ar:

$$p = \rho R_d T_v$$

Em que:  $p$  = Densidade do Ar,  $R_d$  = Constante específica para o ar seco (287,047J/kg K),  $T_v$  = Temperatura virtual (K),  $p$  = Pressão (Pa).

Tabela 9 – Densidade do pilar durante o levantamento da linha de visada correspondente.

Linha de visada	Período	Densidade
Pilar 01 - Pilar 02	Tarde	1,041
	Manhã 1	1,089
	Manhã 2	1,087
Pilar 02 - Pilar 01	Tarde	1,055
	Manhã 1	1,083
	Manhã 2	1,081
Pilar 02 - Pilar 03	Tarde	1,058
	Manhã 1	1,085
	Manhã 2	1,084
Pilar 03 - Pilar 02	Tarde	1,067
	Manhã 1	1,090
	Manhã 2	1,089

Fonte: Autores (2025).

De acordo com Torge (2001), a variação da densidade tem um impacto direto na velocidade de propagação da onda eletromagnética empregada nas medições, o que pode resultar em alterações no tempo de deslocamento e na curvatura desse feixe. Como o índice de refração é influenciado por parâmetros ambientais e, conseqüentemente, pela densidade do meio, essas variações também afetarão seu valor (RÜEGGER, 1990).

A relação entre a densidade do ar e o índice de refração vertical é fundamental em levantamentos geodésicos, pois influencia a precisão das medições de distância e ângulo. À medida que a densidade do ar varia com as condições atmosféricas, o índice de refração também se altera, afetando a trajetória da onda eletromagnética. Em regiões que apresentam maior densidade, o índice de refração tende a ser maior, resultando em uma curvatura que pode distorcer as medições. Por outro lado, onde a densidade do ar é menor, o índice de refração diminui, o que pode introduzir erros na determinação das coordenadas. Portanto, para garantir a precisão em levantamentos geodésicos, é essencial considerar essas variáveis e aplicar correções adequadas que levem em conta as condições atmosféricas locais.

Com os valores do índice de refração, é possível calcular os desníveis obtidos através do nivelamento trigonométrico entre os Pilares (P1, P2 e P3) e os pontos CG01 e CG02, esses desníveis foram calculados utilizando os valores de índice de refração calculado e do índice de refração igual a 0,13, para que fosse possível a comparação dos dois.

Tabela 10 – Desnível através do nivelamento trigonométrico e suas diferenças com o desnível através do nivelamento geométrico entre os pilares e o ponto CG01.

Linha	TARDE			
	Desnível (k = 0.13)	Desnível (k calc)	Diferença (m) (k = 0.13) - Geométrico	Diferença (m) (k calc) - Geométrico
Pilar01 - CG01(K=P1-P2)	-4,2667	-4,2653	-0,0048	-0,0033

Pilar02 - CG01(K=P2-P1)	-15,5446	-15,5451	0,0100	0,0095
Pilar02 - CG01(K=P2-P3)	-15,5446	-15,5265	0,0100	0,0280
Pilar03 - CG01(K=P3-P2)	50,3274	50,3274	0,0179	0,0179
<b>Linha</b>	<b>MANHÃ 1</b>			
	<b>Desnível (k = 0.13)</b>	<b>Desnível (k calc)</b>	<b>Diferença (m) (k = 0.13) - Geométrico</b>	<b>Diferença (m) (k calc) - Geométrico</b>
Pilar01 - CG01(K=P1-P2)	-4,2640	-4,2629	-0,0020	-0,0009
Pilar02 - CG01(K=P2-P1)	-15,5446	-15,5463	0,0100	0,0083
Pilar02 - CG01(K=P2-P3)	-15,5431	-15,5167	0,0115	0,0379
Pilar03 - CG01(K=P3-P2)	50,3263	50,3274	0,0168	0,0179
<b>Linha</b>	<b>MANHÃ 2</b>			
	<b>Desnível (k = 0.13)</b>	<b>Desnível (k calc)</b>	<b>Diferença (m) (k = 0.13) - Geométrico</b>	<b>Diferença (m) (k calc) - Geométrico</b>
Pilar01 - CG01(K=P1-P2)	-4,2648	-4,2637	-0,0028	-0,0017
Pilar02 - CG01(K=P2-P1)	-15,5449	-15,5393	0,0097	0,0152
Pilar02 - CG01(K=P2-P3)	-15,5449	-15,5185	0,0097	0,0361
Pilar03 - CG01(K=P3-P2)	50,3273	50,3284	0,0178	0,0189

Fonte: Autores (2024).

Tabela 11 – Desnível através do nivelamento trigonométrico e suas diferenças com o desnível através do nivelamento geométrico entre os pilares e o ponto CG02.

<b>Linha</b>	<b>TARDE</b>			
	<b>Desnível (k = 0.13)</b>	<b>Desnível (k calc)</b>	<b>Diferença (m) (k = 0.13) - Geométrico</b>	<b>Diferença (m) (k calc) - Geométrico</b>
Pilar01 - CG02(K=P1-P2)	-4,2725	-4,2730	-0,0121	-0,0126
Pilar02 - CG02(K=P2-P1)	-15,5459	-15,5459	0,0073	0,0072
Pilar02 - CG02(K=P2-P3)	-15,5459	-15,5477	0,0073	0,0054
Pilar03 - CG02(K=P3-P2)	50,3294	50,3229	0,0184	0,0119
<b>Linha</b>	<b>MANHÃ 1</b>			
	<b>Desnível (k = 0.13)</b>	<b>Desnível (k calc)</b>	<b>Diferença (m) (k = 0.13) - Geométrico</b>	<b>Diferença (m) (k calc) - Geométrico</b>
Pilar01 - CG02(K=P1-P2)	-4,2667	-4,2602	-0,0063	0,0003
Pilar02 - CG02(K=P2-P1)	-15,5459	-15,5514	0,0073	0,0017
Pilar02 - CG02(K=P2-P3)	-15,5509	-15,5527	0,0022	0,0004
Pilar03 - CG02(K=P3-P2)	50,3281	50,3323	0,0171	0,0214
<b>Linha</b>	<b>MANHÃ 2</b>			
	<b>Desnível (k = 0.13)</b>	<b>Desnível (k calc)</b>	<b>Diferença (m) (k = 0.13) - Geométrico</b>	<b>Diferença (m) (k calc) - Geométrico</b>
Pilar01 - CG02(K=P1-P2)	-4,2651	-4,2586	-0,0046	0,0019
Pilar02 - CG02(K=P2-P1)	-15,5511	-15,5502	0,0020	0,0029
Pilar02 - CG02(K=P2-P3)	-15,5511	-15,5529	0,0020	0,0002
Pilar03 - CG02(K=P3-P2)	50,3290	50,3333	0,0181	0,0223

*Fonte: Autores (2024).*

Para avaliar a consistência dos resultados, analisou-se estatisticamente os desníveis obtidos, utilizando nivelamento trigonométrico entre os pilares e os pontos CG01 e CG02, considerando o índice de refração vertical, calculado através das visadas recíprocas e simultâneas e o índice de refração  $k = 0,13$ . Para tal, utilizou-se um teste de hipótese, para verificar se os valores dos desníveis obtidos através do nivelamento trigonométrico, utilizando  $k=0,13$  e  $k$  calculado são iguais, aos desníveis obtidos através do nivelamento geométrico. A hipótese nula afirma que eles são iguais e a hipótese alternativa que eles são diferentes.

- Hipótese nula  $H_0$ :  $\Delta H_{\text{trigonométrico}} = \Delta H_{\text{geométrico}}$
- Hipótese alternativa:  $H_a$ :  $\Delta H_{\text{trigonométrico}} \neq \Delta H_{\text{geométrico}}$

Para avaliar as hipóteses utilizou-se a distribuição de  $t$  de Student, que segundo Gemael, Machado e Wandresen (2015), é a distribuição indicada, para amostras com menos que 30 elementos.

Equação 8 T de Student

$$T = \frac{\overline{\Delta H_{\text{trigonométrico}}} - \overline{\Delta H_{\text{geométrico}}}}{\sqrt{\frac{s^2}{v} + \frac{s^2}{v}}}$$

Em que: T = Distribuição T de Student;  $\overline{\Delta H_{\text{trigonométrico}}}$  = Média dos desníveis obtidos através do nivelamento trigonométricos (assumindo  $k =$  calculado ou  $k = 0,13$ );  $\overline{\Delta H_{\text{geométrico}}}$  = Desníveis obtidos através do nivelamento geométricos;  $s$  = Desvio padrão da média;  $v$  = graus de liberdade.

Nesse caso utilizou-se nível de confiança de 95%, ou seja, significância de 5%, assumindo o grau de liberdade igual a 2, podemos verificar na tabela de T de Student que o valor crítico que é de 2,920. Logo, todas as combinações de hipótese foram testadas, de forma que a hipótese nula seja verdadeira, para valores entre -2,920 e 2,920.

Para os desníveis obtidos através do nivelamento trigonométrico dos Pilares P1, P2 e P3, para CG01 e CG 02, quando se utiliza  $k = 0,13$ , a hipótese alternativa é verdadeira, pois ficam fora dos limites de valor crítico, logo estatisticamente eles são diferentes dos desníveis através do nivelamento geométricos.

Já para o nivelamento trigonométrico do Pilar 01 para CG01, quando se emprega o índice de refração calculado, através da visada do Pilar 01 para o Pilar 02, estatisticamente ele é considerado igual ao nivelamento geométrico, ou seja, a hipótese nula é verdadeira.

Da mesma forma, o nivelamento trigonométrico do Pilar 01 para o ponto CG02, utilizando o  $k$  calculado, através da visada do Pilar 01 para o Pilar 02, também estatisticamente é classificado com igual ao nivelamento geométrico.

O desnível trigonométrico do Pilar 02 para CG02 aplicando o índice de refração calculado por meio da visada do Pilar 02 para o Pilar 01, também apresenta resultados estatisticamente iguais, isto é, a hipótese nula é verdadeira. Para as demais combinações, a hipótese nula é falsa, ou seja, os desníveis não são considerados iguais.

#### 4. Considerações finais

Ao observar esses dados e com conhecimentos sobre o comportamento do índice de refração e a variação da densidade, é possível observar que os valores apresentados em sua maioria se comportam de acordo com os princípios físicos da óptica geométrica, onde, se uma onda eletromagnética percorre um meio com índice de refração que aumenta ao longo do percurso, o feixe se desvia, de forma a se aproximar do eixo óptico, causando uma variação do desnível medido (Utilizando o nivelamento trigonométrico) e o desnível de referência (considerando os valores de nivelamento geométrico).

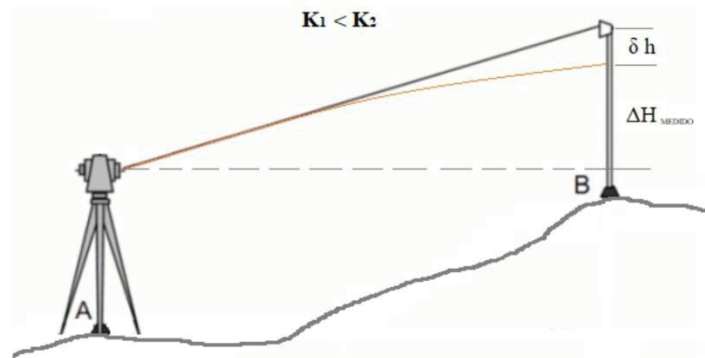


Figura 6 – Desvio de uma onda através de um meio com índice de refração menor para um meio com índice de refração maior.

Fonte: Autores (2024).

O valor do desnível medido, nesse caso, será menor que o utilizado como referência.

Equação 9 Variação desnível quando  $K_1 < K_2$ :

$$\Delta H_{AB \text{ Referência}} = \Delta H_{AB \text{ Medido}} + \delta h$$

Em que:  $\Delta H_{AB \text{ Referência}}$  = Desnível de referência de A para B, obtido através do nivelamento geométrico,  $\Delta H_{AB \text{ Medido}}$  = Desnível obtido através do nivelamento trigonométrico de A para B,  $\delta h$  = Desvio introduzido devido a curvatura do feixe.

Da mesma forma, se uma onda eletromagnética sai de um meio com um índice de refração maior e vai para um meio com índice menor, ou seja, ao longo do percurso da onda eletromagnética o índice de refração diminui, a onda se desvia de forma a se afastar do eixo óptico.

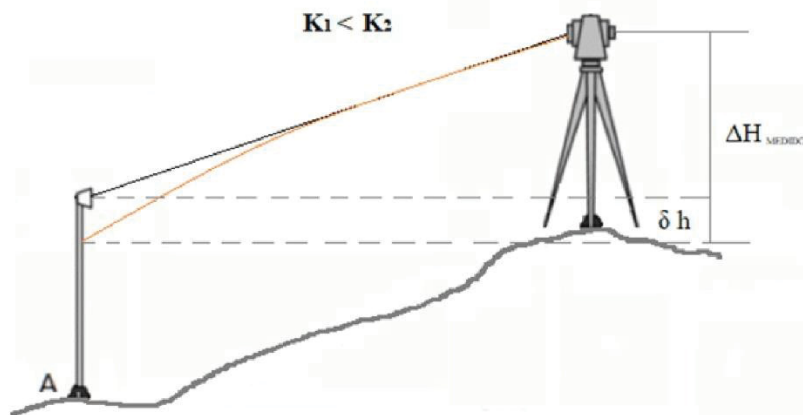


Figura 7 – Desvio de uma onda através de um meio com índice de refração maior para um meio com índice de refração menor.

Fonte: Autores (2024).

O valor do desnível medido, nesse caso, será maior que o utilizado como referência.

Equação 10 Variação desnível quando  $K_1 < K_2$ :

$$\Delta H_{BA \text{ Referência}} = \Delta H_{BA \text{ Medido}} - \delta h$$

Em que:  $\Delta H_{BA \text{ Referência}}$  = Desnível de referência de B para A, obtido através do nivelamento geométrico,  $\Delta H_{BA \text{ Medido}}$  = Desnível obtido através do nivelamento trigonométrico de B para A,  $\delta h$  = Desvio introduzido devido a curvatura do feixe.

Esse comportamento pode ser visto em todas as visadas entre P2 e P3. Em P3 as densidades são maiores e consequentemente, o índice de refração também é maior que no P2, logo, a onda eletromagnética se desvia de forma a resultar em um desnível maior que o valor de referência, quando medido a partir do P3 e um desnível menor do que o de referência, quando é medido a partir do P2.

Já nas visadas realizadas entre os Pilares 01 e 02 o comportamento foi um pouco diferente, para o período da tarde, seguiu o mesmo comportamento descrito anteriormente, mas para as medidas realizadas no período da manhã, houveram discrepâncias. No período da manhã 1, a densidade diminuiu e o coeficiente de refração aumentou, o que pode ser explicado pelas variações das condições atmosféricas entre os pontos, serem quase da ordem da precisão do equipamento, o que pode ter afetado o cálculo da densidade.

No período da manhã 2 os valores de densidade também apresentaram diminuição, mas os valores do índice de refração ficaram os dois negativos, com uma amplitude entre as medidas, da ordem de 0,1234.

Outro detalhe considerável é que ao observar as distâncias inclinadas, mesmo após a correção dos efeitos ambientais, sugerida pelo fabricante, ainda é possível verificar discrepâncias nas medidas, que são da ordem de 6,5 mm, dependendo do período do dia. Considerando que as distâncias medidas são menores de 1km, esse valor está acima da precisão nominal do instrumento, como descrito em Rueger (1996), devido a qualidade do índice de refração, surgirá uma limitação na precisão do medidor eletrônico de distância.

Analisando os valores dos desníveis obtidos, através do nivelamento trigonométrico, aplicando o índice de refração calculado, em cada período do dia e para cada linha de visada, é possível perceber que das 22 combinações formadas, pelo desnível entre os pilares (P1, P2 e P3) e os pontos CG01 e CG02, em 13 delas a utilização do índice de refração calculado, melhorou as diferenças entre os desníveis de referência e o medido, um caso não teve alteração e para 10 combinações houve uma piora quando comparado com o desnível trigonométrico empregando-se  $k=0,13$ .

Pode-se observar que dessas 10 combinações que pioram a diferenças entre os desníveis, 8 delas utilizam o índice de refração calculado, a partir de visadas entre P2 e P3. Levando em consideração que essa visada, estava sob a influência de uma névoa, devido a abertura do vertedouro, logo, pode ser uma das justificativas na piora desses resultados.

Para o nivelamento entre o Pilar 01 e CG01, pode-se concluir que quando se utiliza o índice de refração calculado através da visada de P1 para P2, os resultados do nivelamento trigonométrico sempre melhoram. Já para o nivelamento entre o Pilar 02 e o CG02 os resultados sempre melhoram quando se utiliza os valores de índice de refração calculados entre a visada de P2 para P3.

A análise estatística utilizando o teste t de Student, mostrou que o desnível do Pilar 01 para CG01, pode ser considerada igual, ao desnível de referência, quando se utiliza  $k$  calculado, a partir da visada do Pilar 01 para Pilar 02.

Assim como, o desnível entre Pilar 01 e CG02, pode ser considerado estatisticamente igual, quando se utiliza  $k$  calculado através da visada do Pilar 01 para Pilar 02.

Já o desnível do Pilar 02 para CG02, aplicando  $k$  calculado a partir da visada do Pilar 02 para o Pilar 01, também é considerado igual ao desnível de referência, ou seja, a hipótese nula é verdadeira.

As demais combinações utilizando o  $k$  calculado e o  $k=0,13$ , estatisticamente são consideradas diferentes do desnível de referência, ou seja, são falsas para a hipótese nula.

Os dados obtidos a partir do índice de refração entre o Pilar 02 e Pilar 03, apresentaram erros da ordem de 18 mm, o que sugere que a linha de visada, por estar com o vertedouro aberto, influenciou no erro oriundo do efeito da refração atmosférica.

Diante disso é necessário que mais estudos sejam realizados, para analisar o comportamento da atmosfera ao longo de todo percurso, de forma que seja possível avaliar a variação na densidade do ar e sua influência no desvio da onda eletromagnética utilizada pelo equipamento.

## Agradecimentos

Agradecemos ao curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas pela oportunidade de desenvolver essa pesquisa, e à COPEL por disponibilizar a área para o estudo.

---

**Referências**

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13133: Execução do levantamento topográfico – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- COPEL - Companhia Paranaense de Energia. Geração. 2021. Disponível em: <http://www.consorcio Cruzeiro dosul.com.br/a-usina>. Acesso em: 20 out. 2021.
- Gemael, C.; Machado, A. M. L.; Wandresen, R. *Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas*. 2. ed. Ed. UFPR. 2015. 428p.
- Gill, A. E. **Atmosphere – Ocean Dynamics**. Academic Press, 1982. 662p.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos em território brasileiro. Rio de Janeiro: IBGE, 1983.
- LEICA GEOSYSTEMS A. Leica 1205. *Manual de operação, versão 3.0, espanhol*. 2015.
- LEICA GEOSYSTEMS B. Leica TS15. *Manual de operação, versão 3.0, espanhol*. 2015.
- GEMIN, A. R. S. *Desenvolvimento de um sistema de calibração horizontal para sistemas de nivelamento digitais*. Curitiba, 2017. 135f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2017.
- NADAL, C. A. *Método da inserção óptica tridimensional aplicado à engenharia de precisão*. Curitiba, 2000. 116f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2000.
- Petty, G. W. **A First Course in Atmospheric Thermodynamics**. Sundog Pub, 2008. 337p.
- Rueger, J. M. **Electronic Distance Measurement: An introduction**. 4 ed. Berlin: Springer, 1996.
- Shen, Y. Huang, T. Guo, X. Zang, Huerta, Q. M. H. Inversion Method of Atmospheric Refraction Coefficient based on Trigonometric Leveling Network. **Jornal of Surveying Engeneering**, v. 143 (1), 2017.
- SIGUEL, A. R. *Monitoramento da Barragem da Usina Hidrelétrica Mauá Utilizando Irradiação Tridimensional*. Curitiba, 2013. 171f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2013.
- Torge, W. **Geodesy**. 3 ed. Walter de Gruyter: Berlin, 2001.
- Wiggers, D. Faggion, P. L. Da Cruz, W. Análise do Índice de Refração Vertical no Monitoramento de Barragens: Estudo de Caso UHE Governador Jayme Canet Junior. **Anuário de Geociências**, v. 43 n. 3, 2020.
- Wiggers, D. et al. Análise dos efeitos da refração no monitoramento de barragens Estudo de Caso UHE Governador Jayme Canet Junior. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 11 n. 1, 2025.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As variações das condições atmosféricas e suas implicações no monitoramento de estruturas, como no caso das barragens, são muitas vezes negligenciadas. Uma área com características tão distintas, mesmo em regiões tão próximas, pode apresentar variações significativas de temperatura, pressão atmosférica e umidade, corroborando com a hipótese de formação de microclimas na região.

Os dados coletados revelaram que as características específicas de cada pilar, como a vegetação e a proximidade de superfícies asfaltadas ou corpos d'água, impactaram as medições dos parâmetros atmosféricos. O Pilar 01, por exemplo, apresentou temperaturas mais elevadas devido à sua localização, enquanto o Pilar 02, cercado por vegetação, registrou temperaturas mais baixas. Já o Pilar 03, em uma das campanhas, foi afetado pela névoa gerada pela abertura das comportas, o que introduziu erros nas medições.

Ao analisar os efeitos da refração atmosférica na determinação de coordenadas, os resultados obtidos evidenciam que, mesmo após a aplicação das correções atmosféricas nas distâncias inclinadas, os procedimentos de calibração e da estratégia de observação empregada, ainda é possível observar discrepâncias da ordem de 8mm, entre coordenadas obtidas a partir de diferentes pilares.

Possivelmente, as variações observadas se devem a efeitos residuais associados às medições angulares, indicando que a refração atua não apenas na componente linear, mas também nas direções horizontais e ângulos verticais, comprometendo o conjunto das observações, o que reflete diretamente na qualidade das coordenadas calculadas.

Adicionalmente, constatou-se que a variabilidade das coordenadas está mais relacionada às características do ponto ocupado pelo equipamento, à linha de visada e às condições atmosféricas ao longo do trajeto da onda eletromagnética, do que ao período do dia. Embora, ao analisar as elipses de erro, seja possível observar maiores dispersões no período da manhã. Esse comportamento reforça que modelos simplificados de correção atmosférica não são suficientes para representar a complexidade do fenômeno. Assim, destaca-se a necessidade de abordagens mais rigorosas, que considerem a variabilidade

espacial do índice de refração, bem como a adoção de estratégias complementares, como observações recíprocas e simultâneas, visando minimizar esses efeitos sistemáticos e aumentar a confiabilidade das coordenadas em aplicações geodésicas de alta precisão.

Ao determinar o coeficiente de refração vertical a partir de visadas recíprocas e simultâneas entre os pilares, foi possível observar que a adoção de valores de  $k$  ajustados às condições locais proporciona resultados melhores, em comparação ao uso de valores tradicionalmente empregados na literatura.

Considerando a análise das variações de densidade do ar em relação aos desníveis trigonométricos calculados, foi possível observar que regiões com maior densidade apresentam, em geral, índices de refração mais elevados, enquanto áreas com menor densidade tendem a apresentar índices menores, resultando na introdução de erros na determinação dos desníveis.

A análise dos resultados evidenciou que, em mais da metade dos casos, os desníveis determinados com base nos os valores de índice de refração local ficaram mais próximos do valor de desnível geométrico, quando comparados aos desníveis obtidos com a adoção do valor do índice de refração determinado por Gauss.

Já nos casos em que houve piora, o índice de refração foi calculado a partir de visadas entre o pilar 2 e o pilar 3, que, no momento estava sob a influência de uma névoa, devido a abertura do vertedouro, o que possivelmente justifica essa piora.

Por fim, os resultados demonstram que a refração atmosférica exerce influência significativa no monitoramento geodésico de estruturas, podendo comprometer a detecção de deslocamentos quando não é devidamente considerada. Evidencia-se ainda, que tanto as condições atmosféricas quanto a geometria de observação desempenham papel determinante na qualidade das medições, ao passo que a modelagem do fenômeno apresenta limitações decorrentes de seu comportamento não linear e altamente variável. Nesse sentido, o trabalho avança na compreensão dos efeitos da refração atmosférica e fornece subsídios técnicos para o aprimoramento do monitoramento geodésico.

Por fim, os resultados obtidos demonstram que a refração atmosférica exerce influência relevante no monitoramento geodésico de estruturas, podendo

comprometer a detecção de deslocamentos quando não adequadamente considerada. Dessa forma, o trabalho fornece subsídios para o aprimoramento de metodologias aplicadas ao monitoramento geodésico de estruturas, especialmente em regiões com características ambientais heterogêneas. Do ponto de vista científico, esta pesquisa contribui para a ampliação do entendimento dos efeitos da refração atmosférica em medições geodésicas realizadas nesse tipo de ambiente. Destaca-se a análise experimental em condições reais, a estimativa do índice de refração local a partir de medições recíprocas e simultâneas, e a investigação de sua influência tanto nos desníveis quanto nas coordenadas planimétricas.

Recomenda-se a realização de investigações mais detalhadas e com maior volume de dados para melhor compreender o comportamento do índice de refração e suas implicações nas medições. A continuidade dessa pesquisa poderá contribuir significativamente para o entendimento dos fenômenos atmosféricos em regiões com características geográficas semelhantes.

## REFERÊNCIAS

- ANDOLFATO, S. H. D. **Sistemas de Automação de Níveis Digitais**. 2010. 109 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, 2010.
- BOCKEM, B. et al. Refraction Influence Analysis and Investigations on Automated elimination of Refraction Effects on Geodetic Measurements. **XVI IMEKO World Congress**, Viena, Áustria, 25–28 set. 2000.
- BROCKS, K. Die Lichtstrahlkrümmung in Bodennähe. **Deutsche Hydrographische Zeitschrift**, v. 3, p. 241–248, 1950.
- BRUNNER, F. K. **Geodetic Refraction: Effects of Electromagnetic Wave Propagation Through the Atmosphere**. Berlin: Springer-Verlag, 1984.
- BRYNS, H.; JUSTYNIAK, N. Mathematical-physical model of horizontal refraction in measuring alignment of elongated engineering objects. **Geomatics, Landmanagement and Landscape**. N. 1, pág 25-32, 2016.
- DUNNICLIFF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance**. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- DZIERZEGA, A.; SCHERRER, R. The compact method of testing total stations. **Survey Review**, v. 37, n. 288, p. 145–154, 2003.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2025: ano-base 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2025\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf). Acesso em: 20 abr. 2025.
- GEIGER, R.; ARON, R.H.; TODHUNTER, P. **The Climate Near the Ground**. 7 ed. Lanham: Rowman & Littlefield Publishers, 2009.
- GEMAEL, C. **Topografia: fundamentos**. 2. ed. Curitiba: UFPR, 1987.
- GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Editora UFPR, Ed.2. 2015.
- GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Elementary Surveying: an introduction to geomatics**. 13. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2012.
- GOMES, J. P. **Determinação de desníveis de precisão utilizando estação total**. 2006. 121 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, 2006.
- HENNES, M. **Zum Einfluss inhomogener Brechungsindexfelder auf die**

**Verschwenkung offener Polygonzüge am Beispiel des Tunnelvortriebs.** *Mitteilung* n. 65, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1998. 88 p. Relatório técnico institucional.

HENNES, M. Zum Refraktionseinfluss auf terrestrische geodätische Messungen im Kontext der Messtechnik und Instrumentenentwicklung. **Flurbereinigung. Bodenordnung**, v.2, p. 73–86. 2002.

HIRT, C. et al. Monitoring of the refraction coefficient in the lower atmosphere using a controlled setup of simultaneous reciprocal vertical angle measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, D21102, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA (IBGE). **Especificações e Normas para Levantamentos Geodesicos Associados ao Sistema Geodésico Brasileiro**, Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

INGENSAND, H. Concepts and solutions to overcome the refraction problem in terrestrial precision measurement. **Geodesy and cartography**, v. 34(2), p. 61–65. 2008.

KAHMEN, H.; FAIG, W. **Surveying**. Berlin: De Gruyter, 1988.

LEICA GEOSYSTEMS A. Leica TS15. **Manual de operação**, versão 3.0, espanhol. 2015.

LEICA GEOSYSTEMS B. Leica 1205. **Manual de operação**, versão 3.0, espanhol. 2015.

MIRANDA, F. A.; FAGGION, P. L.; VEIGA, L. A. K. A method to be used while monitoring points in unstable areas. **Bulletin of Geodetic Sciences**, Curitiba, v. 15, n. 4, p. 591-604, 2009.

REDOVNIKОВI, L.; ALIŠIĆ, I.; LUKETIĆ, A. Influence of lateral refraction on measured horizontal directions. **Survey Review**, v. 45, n. 331, 2013.

RUEGER, J. M. **Electronic Distance Measurement: An introduction**. 4 ed. Berlin: Springer, 1996.

SANTOS, D. P. **Avaliação do uso do nivelamento trigonométrico no transporte de altitudes para regiões de difícil acesso**. 2009. 120 p. Dissertação (mestrado em ciências geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Pós-graduação em ciências geodésicas, Curitiba, 2009.

SANTOS, R. C.; FERREIRA, M. L. **Métodos de Nivelamento em Topografia**. Rio de Janeiro: Engenharia Editora, 2019.

SCHAAL, R. E. **Efeitos da Refração na Atmosfera em Observações Geodésicas Próximas ao solo**. 1995. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 1995.

SIGUEL, A. R. **Monitoramento da Barragem da Usina Hidrelétrica Mauá Utilizando irradiação Tridimensional**. 2013. 171 p. Dissertação (mestrado em ciências geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Pós-graduação em ciências geodésicas, Curitiba, 2013.

TORGE, W. **Geodesy**. 3 ed. Walter de Gruyter: Berlin, 2001.

TSOULIS, D.; PETROVIC, S.; KILIAN, N. Theoretical and Numerical Aspects of the Geodetic Method for Determining the Atmospheric Refraction Coefficient Using Simultaneous and Mutual Zenith Observations. **Journal of Surveying Engineering**, v.134, n. 1, p. 3-12, 2008.

VEIGA, L. A. K.; ZANETTI, M. A. Z.; FAGGION, P. L. **Apostila Fundamentos de topografia**. Curitiba: UFPR, 2012.

WIGGERS, D. **Análise do índice de refração vertical no monitoramento de barragens: Estudo de caso UHE Governador Jaime Canet Junior** . 2019. 133 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, 2019.

YUEQUIAN, S. et al. Inversion Method of Atmospheric Refraction Coefficient based on Trigonometric Leveling Network. **J. Surv. Eng**, v.143, n.1, 2017.