

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 Wiggers¹; Pedro Luis Faggion²; Wander da Cruz³; Andreas Jerke⁴; Samir de Souza Oliveira Alves⁵

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

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

² Universidade Federal do Paraná/Departamento Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: faggion@ufpr.br

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

³ Universidade Federal do Paraná/Departamento Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: wander.cruz@ufpr.br

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

⁴ Universidade Federal do Paraná/Departamento Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: andreasjerke@ufpr.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9476-5201>

⁵ 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 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, 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.

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 consequentemente 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.

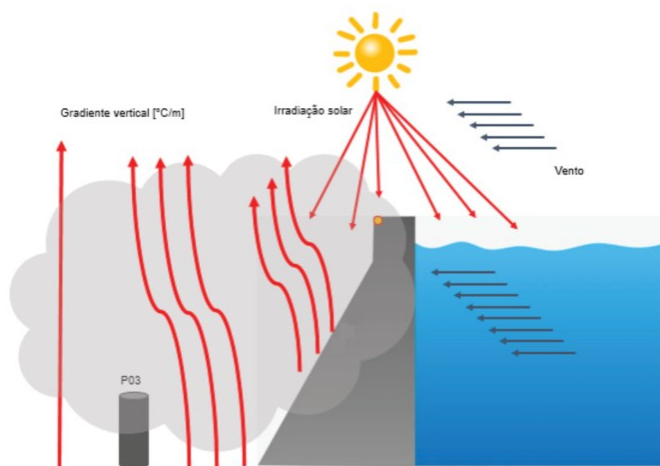


Figura 1 – Esquema gradiente temperatura em uma barragem.

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.

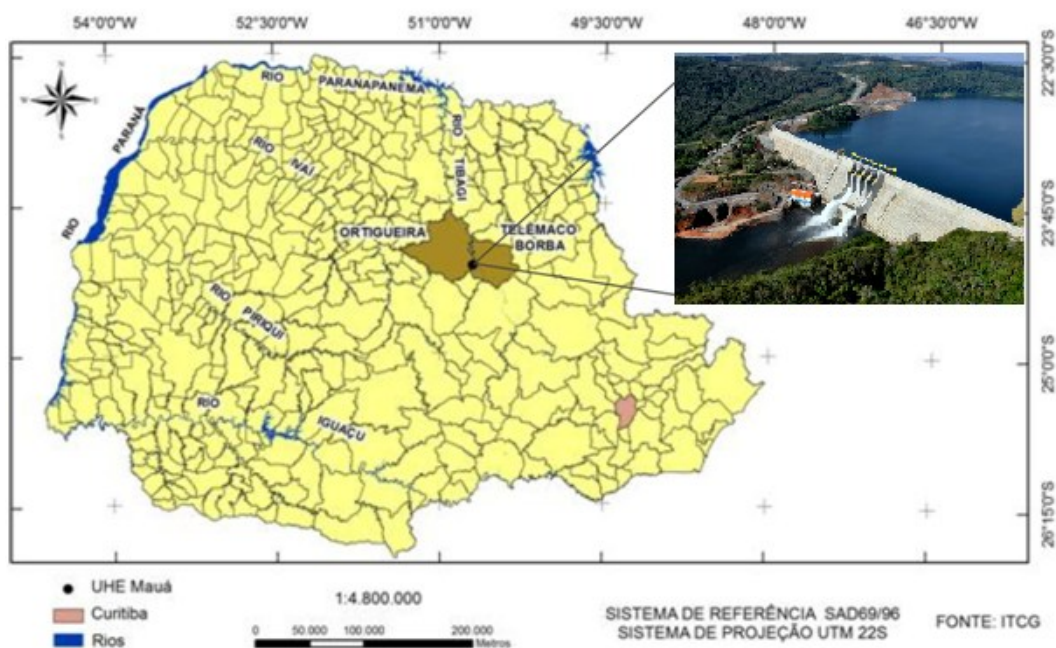


Figura 2 – Área onde foram realizados os levantamentos.

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 km² 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 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 (%)
Manhã	943	47-57	940	34-45	940	30
Tarde	938	22	939	19	945	23
Noite	942	43-52	931	86-90	949	77

Fonte: Autores (2024).

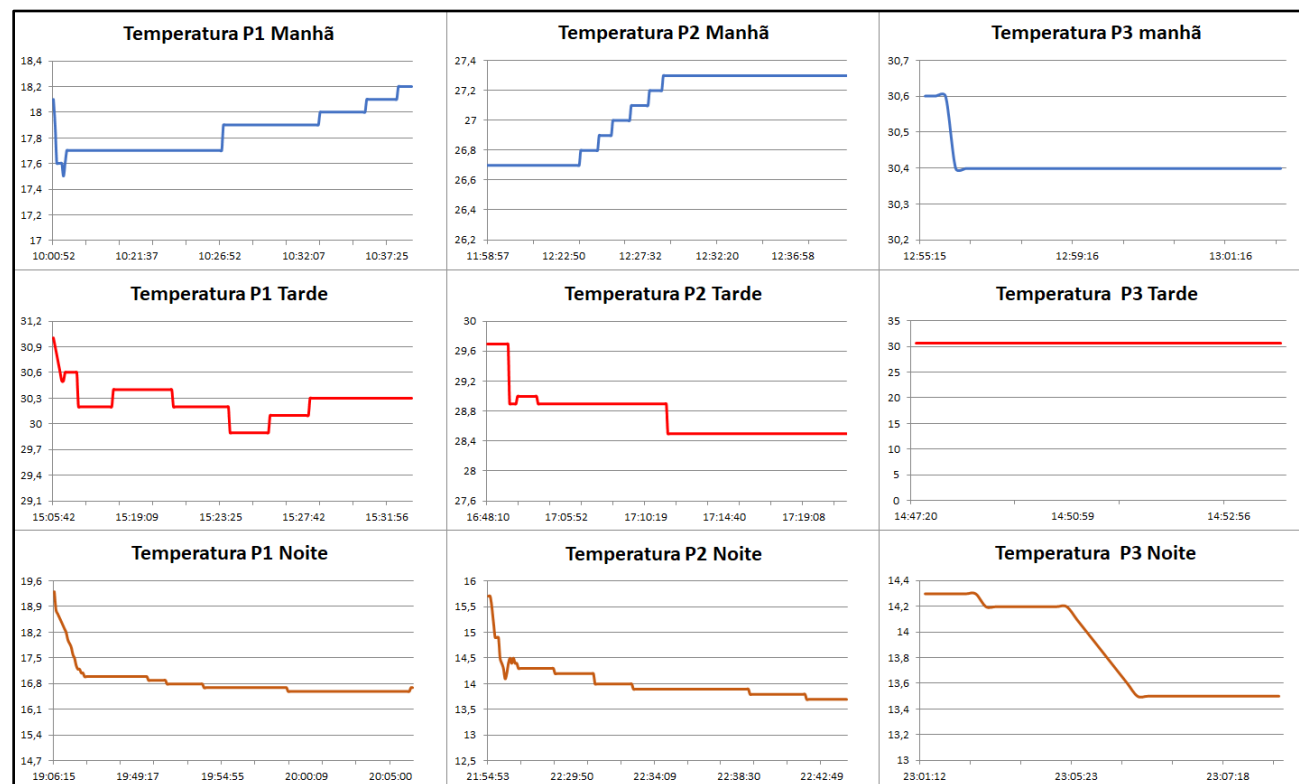


Figura 5 – Variação temperatura ao longo do levantamento.

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 $x = \left(\frac{7,5 t}{237,3+t} \right) + 0,7857$.

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)	σ (m)	Y(m)	σ (m)	Altitude (m)	σ (m)
Pilar 01	903,834	0,001	73,730	0,001	4,629	0,002
Pilar 02	149,123	0,001	142,377	0,001	15,998	0,002
Pilar 03	653,586	0,001	453,844	0,001	-49,976	0,002

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)	σ (mm)	X(m)	σ (mm)	X (m)	σ (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)	σ (mm)	Y(m)	σ (mm)	Y(m)	σ (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)	σ (mm)	X(m)	σ (mm)	X (m)	σ (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)	σ (mm)	Y(m)	σ (mm)	Y(m)	σ (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).

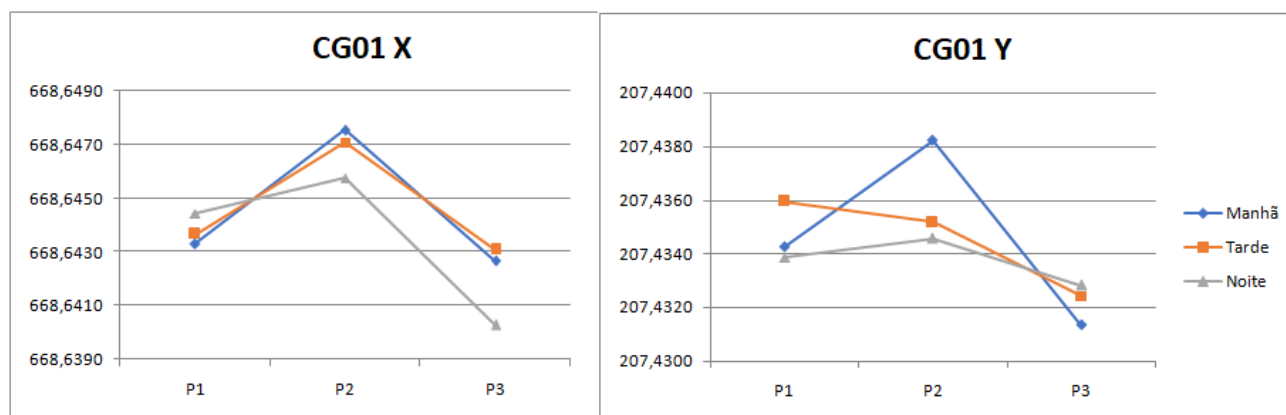


Figura 7 – Coordenadas CG 01.

Fonte: Autores (2023).

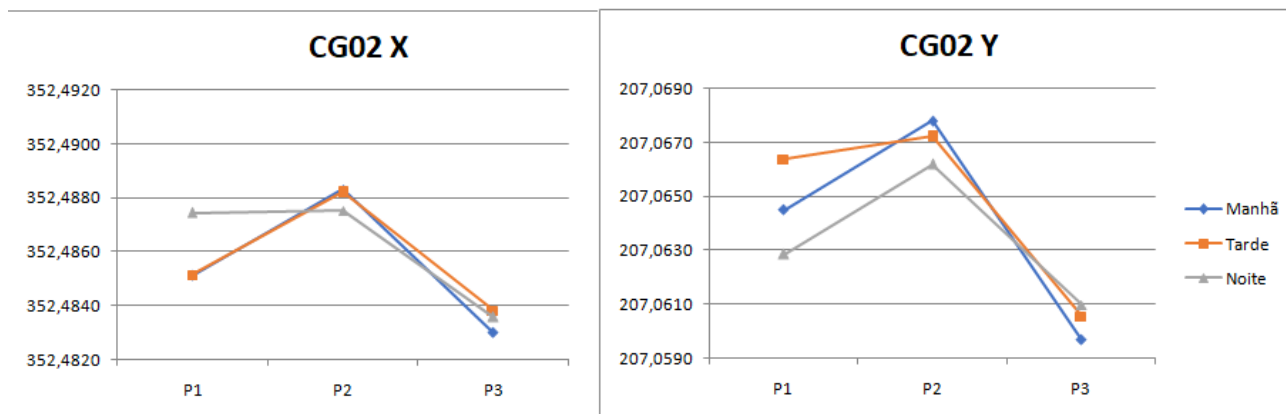


Figura 8 – Coordenadas CG02.

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	
	$\sigma_x(\text{mm})$	$\sigma_y(\text{mm})$	$\sigma_x(\text{mm})$	$\sigma_y(\text{mm})$	$\sigma_x(\text{mm})$	$\sigma_y(\text{mm})$
CG01	1,4	1,6	1,4	2,6	1,6	1,3
CG02	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 Gemaël, 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 Gemaël, 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 .

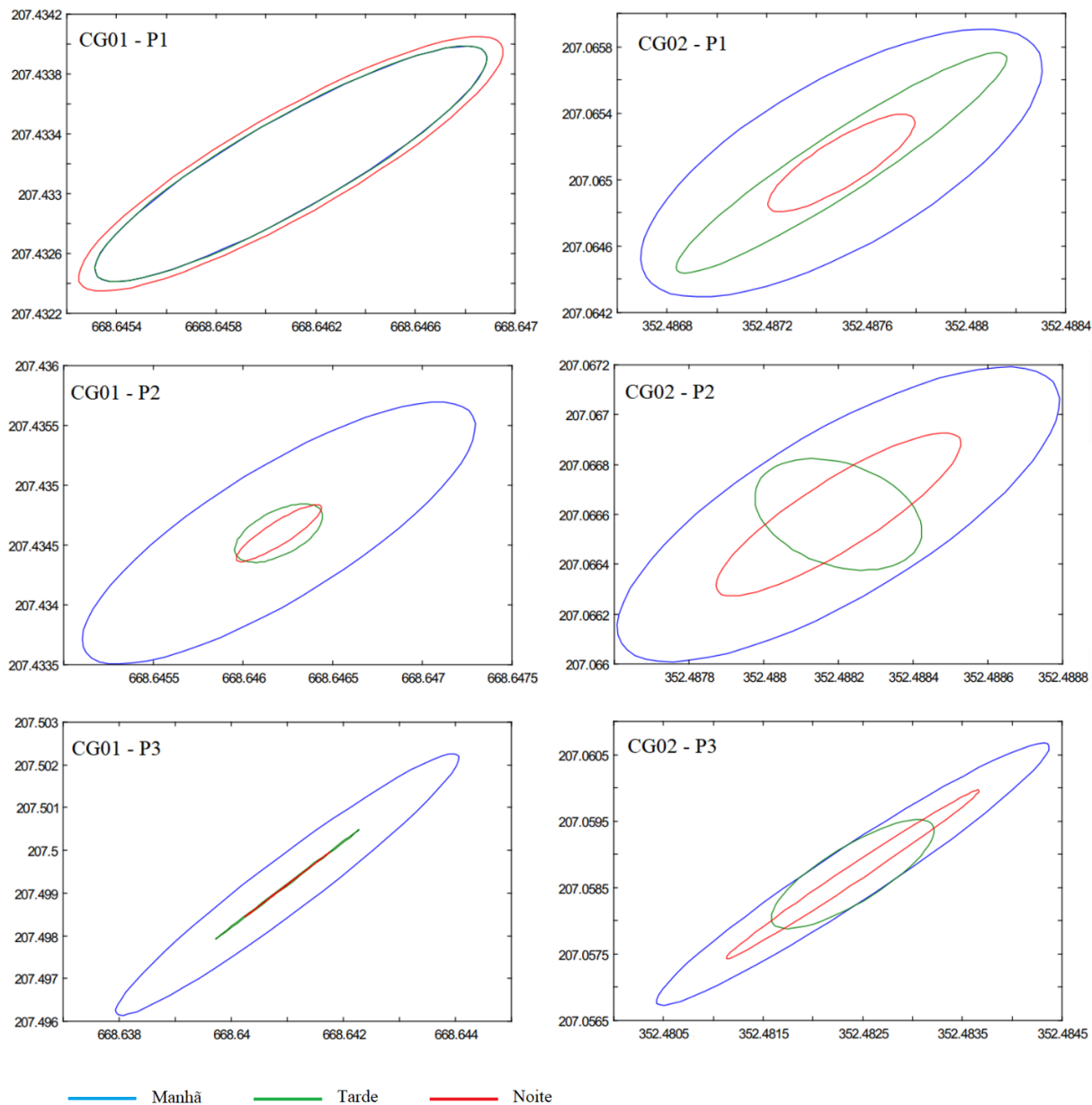


Figura 9 – Elipses de erro dos pontos CG01 e CG02 a partir dos pilares 01, 02 e 03.
Fonte: Autores (2024).

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.

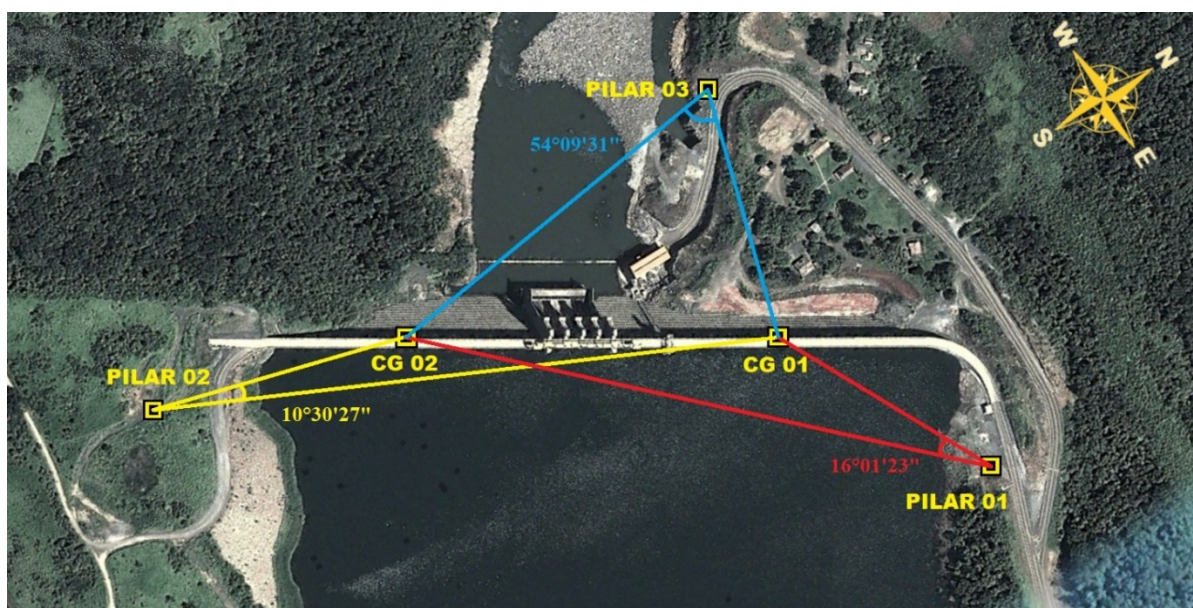


Figura 10 – Linhas de visada com seus respectivos ângulos (indicação norte verdadeiro).

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. 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, 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/l12334.htm. Acesso em 02/02/2023
- COPEL - Companhia Paranaense de Energia. Geração. 2021. Disponível em: <http://www.consorcio Cruzeiro do Sul.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.