



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

JOÃO NAVES DE MORAES

**COMBINAÇÃO DE TÉCNICAS 3D DE MEDIÇÃO PARA O
MAPEAMENTO DE EDIFICAÇÕES PREDIAIS**

Recife

2022

JOÃO NAVES DE MORAES

**COMBINAÇÃO DE TÉCNICAS 3D DE MEDIÇÃO PARA O
MAPEAMENTO DE EDIFICAÇÕES PREDIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Área de Concentração: Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Orientadora: Profa. Dra. Andréa de Seixas

Coorientador: Prof. Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés

Recife

2022

M828c Moraes, João Naves de.
Combinação de técnicas 3D de medição para o mapeamento de edificações prediais / João Naves de Moraes. - 2022.
210 folhas, il.; tab., abr. e sigl.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Andréa de Seixas.
Coorientador: Prof. Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2022.

Inclui Referências, Apêndices e Anexos.

1. Engenharia Cartográfica. 2. Levantamentos geodésicos. 3. Métodos terrestres de medição. 4. Pontos altos e inacessíveis. 5. Erro médio quadrático.

6. Mapeamento 3D. 7. Controle dimensional. I. Seixas, Andréa de (Orientadora).

II. Garnés, Silvio Jacks dos Anjos (Coorientador). III. Título.

JOÃO NAVES DE MORAES

**COMBINAÇÃO DE TÉCNICAS 3D DE MEDIÇÃO PARA O MAPEAMENTO
DE EDIFICAÇÕES PREDIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Área de concentração: Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Aprovada em: 28/ 02/ 2022.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dr. Techn. Andréa de Seixas (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Francisco Jaime Bezerra Mendonça (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Irineu da Silva (Examinador Externo)
Universidade de São Paulo

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Mestre e Senhor Jesus. À minha mãe e meu pai, pelo apoio e compreensão, Marilena de Oliveira Naves e Delane Alexandre de Moraes.

À professora Andréa de Seixas, ao professor Sílvio Jacks dos Anjos Garnés, conselheiros da dissertação; aos professores Francisco Jaime Bezerra Mendonça e Irineu da Silva, examinadores; à Luciene Ferreira Gama pela ajuda e aos amigos Leandro Luiz Silva de França e Ermerson de Vasconcelos Silva.

À Elizabeth Galdino do Nascimento, PPGCGTG -UFPE.

À CAPES via PPGCGTG -UFPE.

RESUMO

Esta dissertação provê uma metodologia que determina com acurácia a posição planialtimétrica de pontos de referência e objetos, necessários tanto para o controle tridimensional e bidimensional de edificações prediais como para o mapeamento 3D. Neste sentido, os Métodos Terrestres de Medição planialtimétrica com estação total (MTMs) são estudados, tais como: Interseção a Vante, Triangulação, Nivelamento Trigonométrico com visadas curtas e longas e Método da Poligonação. Além do Posicionamento Geodésico por Satélites e respectiva integração. Os pontos de apoio imediato foram determinados aplicando o método de Poligonação com centragem forçada e o posicionamento GNSS Relativo Estático. Para a determinação altimétrica destes pontos também foi utilizado o Nivelamento Trigonométrico, com visadas curtas e longas, neste último caso são consideradas visadas longas a partir de 250 m. Como parâmetro se utiliza o Nivelamento com a tecnologia GNSS. Com a metodologia investigada foram obtidas acurácias posicionais de ± 2 mm a ± 4 mm para os vértices (ou pontos) de Referência, ou ainda Apoio Imediato. Para estes pontos, os valores calculados são obtidos por meio dos procedimentos de compensação, método tradicional - Poligonal Fechada (maiores precisões), e de ajuste (em Rede 3D) (maiores acurácias), respectivamente; neste último, os menores valores são obtidos pelo ajuste das observações em rede por medidas dos métodos clássicos topográficos. O ajustamento em Rede 3D ou Rede Geodésica 3D apresentou maior acurácia se utilizando apenas de coordenadas GNSS e observações relativas aos métodos topográficos (distâncias inclinadas, ângulos horizontais e zenitais) entre os vértices do método de Poligonação. Com a introdução de distâncias inclinadas GNSS o ajuste resulta em uma estatística mais elevada. O erro de fechamento do transporte altimétrico para o percurso P1, P8, ..., P1 (sentido anti-horário) foi de (-0,0571 m), -5,71 cm para o perímetro de 1.263,165 m; este erro está em concordância com os valores calculados com a compensação pelo Método Tradicional - Poligonal Fechada (Quantidades de Fechamento da Poligonal Fechada). Nesta dissertação é contemplada também uma metodologia para a determinação planialtimétrica de pontos altos e inacessíveis situados em fachadas de edifício predominantemente vertical. Para esta finalidade, foram aplicados os métodos da Interseção a Vante (sem a medição de distância) e da Triangulação, envolvendo instrumentos, acessórios e processos de medição angular, fornecendo uma perspectiva de aplicação da Engenharia Geodésica em Sítios Urbanos. A determinação de pontos altos e inacessíveis (arestas) contidos nas estruturas arquitetônicas de edificações situados nas extremidades das fachadas

de prédio delimitam a dimensão planialtimétrica da estrutura edificada. Fez-se relevante a abordagem do método da Interseção a Vante, considerando a intervisibilidade ou não entre os vértices de coordenadas conhecidas; para o controle da qualidade são realizadas medições abundantes. Com a metodologia investigada foram obtidas acurácias posicionais de ± 2 mm a ± 5 mm para os Pontos-Objetos, adequadas aos levantamentos cadastrais de alta acurácia.

Palavras-chave: levantamentos geodésicos; métodos terrestres de medição; pontos altos e inacessíveis; erro médio quadrático; mapeamento 3D; controle dimensional.

ABSTRACT

This dissertation is aimed at providing a methodology for accurately determining planialtimetric position, as well as the reference points and objectives necessary for both two and three-dimensional controls for buildings and 3D mapping. Planialtimetric Terrestrial Measurement Methods (MTMs) with total station are therefore studied, including Point Intersection, Triangulation, Trigonometric Leveling with short and long target distances, and Polygonization, as well as Geodetic Satellite Positioning. Points for immediate support were determined by applying the Polygonization method with forced centering and Relative Static GNSS positioning and their integration. Trigonometric Leveling was also used to obtain altimetric readings with short and long target distances, with long target distances considered to be at a minimum of 250 m. Leveling using GNSS technology was also used as a parameter. Positional accuracies of ± 2 mm to ± 4 mm were obtained using the methodologies investigated for reference vertices (or points), as well as Immediate Support. For these points, the calculated values are obtained through the compensation procedures, traditional method - Closed Polygonal (higher precisions), and adjustment (in 3D Network) (higher accuracies), respectively; in the latter, the lowest values are obtained by adjusting observations made in the network through measurements from classical topographic methods. Adjustments made in the 3D Networks and 3D Geodesic Network presented greater accuracy when only GNSS coordinates and observations related to topographic methods (inclined distances, horizontal and zenithal angles) were used among Polygonization method vertices. When GNSS inclined distances were introduced, the adjustment resulted in increasingly elevated statistics. The altimetric transport closing error for the P1, P8, ..., P1 parameters (in a counterclockwise direction) was (-0.0571 m), -5.71 cm for the perimeter of 1,263,165 m; this error is congruent with compensated values calculated using the Traditional Method - Closed Polygon (Closing Quantities for Closed Polygons). This dissertation will also cover a planialtimetric determination methodology for high and inaccessible points situated a building facades that are predominantly vertical. For these purposes, methods for Point Intersection (without measuring distance) and Triangulation were applied, which involved instruments, accessories, and angular measurement processes, providing a perspective on applications for Geodetic Engineering in urban areas. The determination of high and inaccessible points (edges) contained in architectural structures situated on the extremities of building's facades delimit the building's planialtimetric dimension. The approaches contained in the Point Intersection methods are relevant when considering

whether or not intervisibility exists between the vertices of known coordinates; an abundance of measures are taken in the interests of quality control. Positional accuracies of ± 2 mm to ± 5 mm were obtained using the methodologies investigated. Object Points appropriate for high-accuracy cadastral surveying.

Keywords: geodesic surveying; terrestrial measurement methods; high and inaccessible points; mean squared error; 3D mapping; dimensional control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Altitude normal	33
Figura 2 –	Sistema cartesiano geocêntrico fixo na Terra	37
Figura 3 –	Sistema de Referência Terrestre Internacional (Sistema de Referência – IERS) e Sistema de Referência Intermediário Terrestre (sistema CIP/ TIO), com Ângulo de Rotação Terrestre (ERA) e movimento do CIP no ITRS (movimento polar)	39
Figura 4 –	Latitude e longitude astronômicas e Sistema Astronômico Local com os eixos definidos conforme utilizado nos trabalhos de Topografia no Brasil, ou ainda, Sistema Topográfico Local	42
Figura 5 –	Receptor de Posicionamento Cinemático em Tempo Real com compensação de inclinação baseada em Unidade de Medição Inercial (IMU)	48
Figura 6 –	Representação do Posicionamento Relativo	51
Figura 7 –	Nivelamento com a tecnologia GNSS	52
Figura 8 –	Relações geométricas da poligonal geometricamente aberta	56
Figura 9 –	Relações geométricas da poligonal topograficamente apoiada	56
Figura 10 –	Interseção a vante por meio dos ângulos direcionais	59
Figura 11 –	Relações geométricas do método de Interseção Espacial Analítica	60
Figura 12 –	Coordenadas espaciais do alvo P em função dos ângulos diretores	61
Figura 13 –	Interseção a Vante por meio dos ângulos horizontais α e β	70
Figura 14 –	Influência da curvatura da Terra em um nivelamento	72
Figura 15 –	Refração	73
Figura 16 –	Efeito da refração no nivelamento	74
Figura 17 –	Efeito da refração e da curvatura da Terra em um nivelamento trigonométrico	76
Figura 18 –	Representação dos elementos no nivelamento trigonométrico técnica Leap Frog	77
Figura 19 –	Edifício SUDENE. Recife (PE)	82

Figura 20 –	Representação da área de levantamentos geodésicos/topográficos definida pelas coordenadas plano-retangulares UTM (metros) em SIRGAS2000	83
Figura 21 –	Procedimentos metodológicos	85
Figura 22 –	Posicionamento GNSS realizado	889
Figura 23a –	Estação de referência PERC, instalada no prédio do IFPE	89
Figura 23b –	Ocupação GNSS da estação de referência SAT GPS 91551	900
Figura 23c –	Ocupação GNSS do ponto de apoio ponto P5	900
Figura 24 –	Observações dos ângulos zenitais e distâncias inclinadas ao solo	93
Figura 25 –	Localização da Referência de Nível RN_EPS03, do ponto P9 e do ponto de referência P1	97
Figura 26 –	Ortofotocarta da década de 70. Em destaque, o Edifício SUDENE com os Pontos de Detalhes medidos	100
Figura 27 –	Geometria do método da Interseção a Vante com centragem forçada e excesso de visadas e, o objeto de estudo, o Edifício SUDENE com os Pontos de Detalhes medidos. Área definida pelas coordenadas plano-retangulares UTM (metros) em SIRGAS2000	100
Figura 28 –	Levantamento GNSS e Coordenadas Cartesianas Geocêntricas dos Pontos de Referência (ou Apoio) (P1 a P8), da estação da RBMC (Rede Ativa) PERC, e do ponto SAT GPS 91551 (Rede Passiva)	108
Figura 29 –	Elementos para o georreferenciamento da poligonal	113
Figura 30 –	Localização dos pontos da poligonal fechada	114
Figura 31 –	Tela do software AstGeoTop com disposição dos elementos de entrada para proceder o ajustamento	117
Figura 32 –	Poligonal Enquadrada com centragem forçada	122
Figura 33 –	Precisões Planimétricas para os triângulos ajustados em milímetros	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Altitude Ajustada e o respectivo desvio-padrão da estrutura da Rede Altimétrica do Campus Recife da UFPE em relação aos pinos de superfícies semi-esféricas	84
Tabela 2 – Coordenadas Geodésicas (φ, λ, h) em SIRGAS2000 do ponto PERC; dadas em graus, minutos e segundos e altitude geodésica em metros	84
Tabela 3 – distâncias inclinadas reduzidas ao solo	94
Tabela 4 – Ângulos horizontais das estações poligonais	94
Tabela 5 – Ângulos zenitais reduzidos ao solo das estações poligonais	95
Tabela 6 – Distâncias inclinadas GNSS	95
Tabela 7 – Coordenadas geodésicas e plano-retangulares UTM em SIRGAS2000 e respectivos desvios-padrões e desvios-padrões horizontais adotando a estação de referência PERC	104
Tabela 8 – Erros de fechamento horizontais e verticais para cada seção triangular entre a estação PERC, o vértice SAT GPS 91551 e cada vértice de apoio implantado	105
Tabela 9 – Diferenças de Coordenadas, Desvios-padrões e Coeficientes de Correlação em coordenadas cartesianas geocêntricas para as linhas de bases GNSS formadas	106
Tabela 10 – Pontos de Referência para a Poligonação com centragem forçada	111
Tabela 11 – Elementos da Poligonal Fechada	112
Tabela 12 – Coordenadas da poligonal compensadas pelo método proporcional aos lados (compensação linear) e compensação angular calculada pelo Inverso dos lados adjacentes	113
Tabela 13 – Elementos e Quantidades de Fechamento da Poligonal	115
Tabela 14 – Injunções iniciais para o cálculo da poligonal fechada	116
Tabela 15 – Ajustamento em rede 3D por processo iterativo do método de Gauss-Newton Modificado Globalizado	117
Tabela 16 – Resultados Referentes aos Parâmetros	118
Tabela 17 – Erro esférico no Sistema Geodésico Local	119
Tabela 18 – Ajustamento em rede 3D por processo iterativo do método de Gauss-Newton Modificado Globalizado	120

Tabela 19 – Resultados Referentes aos Parâmetros	120
Tabela 20 – Erro esférico no Sistema Geodésico Local	120
Tabela 21 – Verificação do Ajustamento pelo Teste Global	121
Tabela 22 – Coordenadas Totais Compensadas dos Pontos de Referência pelo método da Poligonação com centragem forçada	124
Tabela 23 – Pontos Ajustados da Poligonal Enquadrada	125
Tabela 24 – Elipses de Erros P(95%) de Confiança	125
Tabela 25 – Coordenadas Astronômicas ($\varphi a, \lambda a$) e h (altitude geodésica) em SIRGAS2000 dos pontos RECF, P1 a P8, PERC e SAT GPS 91551, respectivamente; dadas em graus, minutos e segundos	126
Tabela 26 – Coordenadas astronômicas ($\varphi a, \lambda a$) considerando-se as componentes do desvio da vertical do lugar, para a origem RECF e demais pontos, (P1 a P8, PERC e SAT GPS 91551). Coordenadas representadas no sistema de projeção UTM e altitudes geodésicas em SIRGAS2000 e respectivos desvios-padrões adotando a estação de referência PERC	127
Tabela 27 – Pontos de Referência em coordenadas topográficas planas locais	127
Tabela 28 – Diferenças entre as coordenadas geodésicas locais e topográficas planas locais para os Pontos de Referência	128
Tabela 29 – Coordenadas altimétricas dos pontos de referência determinadas por nivelamento trigonométrico	129
Tabela 30 – Coordenada altimétrica do ponto P1 a partir da Referência de Nível RN_EPS03 por nivelamento trigonométrico por caminhamento (Leap Frog)	130
Tabela 31 – Altitudes ortométricas (H) dos pontos de referência, desvios-padrões das altitudes ortométricas, Ondulações Geoidais, respectivos desvios-padrões das Ondulações Geoidais e discrepâncias entre as altitudes ortométricas em metros. Altitudes determinadas por modelo geoidal desenvolvido por Garnés (2017), Lima (2017) e pelo MAPGEO2015 (IBGE), ambos, respectivamente, em conjunto com as altitudes geodésicas GNSS (h)	131

Tabela 32 – Altitudes ortométricas através da relação $HP \approx -hQ + hP + HQ$ em conjunto com altitudes geodésicas GNSS dos pontos de referência (h)	132
Tabela 33 – Altitudes ortométricas através da relação $HP \approx [-hQ + hP + NQ - NP] + HQ$, em conjunto com altitudes geodésicas GNSS dos pontos de referência (h). Por meio de modelo geoidal local, desenvolvido por Garnés (2017), e dados de Lima (2017)	132
Tabela 34 – Coordenadas ajustadas dos pontos de Detalhes a partir do método da Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais (HÄBLER e WACHSMUTH, 1984) com uso de coordenadas geodésicas locais e topográficas planas locais.	133
Tabela 35 – Observações ajustadas e respectivos desvios-padrões, método da Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais (HÄBLER e WACHSMUTH, 1984) (coordenadas geodésicas locais)	135
Tabela 36 – Observações ajustadas e respectivos desvios-padrões, método da Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais (HÄBLER e WACHSMUTH, 1984) (coordenadas topográficas planas locais)	136
Tabela 37 – Coordenadas dos pontos de Detalhes a partir do método da Interseção a Vante 2D por meio dos Ângulos Horizontais (KAHMEN e FAIG 1988, SILVA e SEGANTINE 2015) com uso de coordenadas geodésicas locais e topográficas planas locais	137
Tabela 38 – Coordenadas geodésicas locais e topográficas planas locais, origem RECF e as altitudes ortométrica e geodésica calculadas pelo método da Interseção Espacial Analítica, descrita em Silva e Segantine (2015) para os pontos de detalhes	139
Tabela 39 – Altitudes ortométricas calculadas pela Interseção Espacial Analítica (SILVA e SEGANTINE 2015); com o uso do modelo geoidal local Garnés (2017), Lima (2017) em conjunto com as altitudes geodésicas advindas de GNSS, e por meio do Nivelamento Trigonométrico por caminhamento	140

Tabela 40 – Distâncias horizontais e distâncias planas no plano de projeção topográfico entre as coordenadas ajustadas dos pontos de Detalhes a partir do método da Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais (HÄBLER e WACHSMUTH, 1984)	141
Tabela 41 – Distâncias horizontais e distâncias planas no plano de projeção topográfico entre coordenadas calculadas pelo método da Interseção Espacial Analítica para os pontos de Detalhes, método descrito em Silva e Segantine (2015)	141
Tabela 42 – Diferenças de coordenadas entre a Interseção Espacial Analítica e Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais	143
Tabela 43 – Resultados e coordenadas de entrada da Interseção Espacial Analítica para os pontos Q1, Q6 e Q3	144
Tabela 44 – Diferenças entre resultados e coordenadas de entrada para o método da Interseção Espacial Analítica para os pontos Q1, Q6 e Q3	144
Tabela 45 – Coordenadas calculadas pelo método da Interseção Espacial Analítica com uso de coordenadas ajustadas em rede geodésica 3D	146
Tabela 46 – Coordenadas calculadas pelo método da Interseção Espacial Analítica com uso de coordenadas ajustadas em rede geodésica 3D e distância inclinada aproximada	147
Tabela 47 – Valores da Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais (HÄBLER e WACHSMUTH, 1984) com o uso das coordenadas dos Pontos de Referência ajustadas em Rede 3D	148
Tabela 48 – Diferenças entre resultados da Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais com uso das coordenadas dos Pontos de Referência (ajustadas em Rede 3D e coordenadas GNSS, Tabelas 47 e 34, nesta ordem)	149

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BIH	<i>Bureau International de L'Heure</i>
CIO	Origem Intermediária Celeste
CIP	Polo Intermediário Celeste
DD	Dupla Diferença de Fase
DGFI	<i>Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut</i>
DGPS	<i>Differential GPS</i>
DP	Desvio-Padrão
EMQ	Erro Médio Quadrático
EOP	Parâmetros de Orientação Terrestre
ERA	Ângulo de Rotação da Terra
GAST	Tempo Sideral Aparente de Greenwich
GCRS	Sistema de Referência Celeste Geocêntrico
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GLONASS	<i>GLObal NAVigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GTRS	Sistema Geocêntrico de Referência Terrestre
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IAU	União Astronômica Internacional
ICRS	Sistema de Referência Celeste Internacional
IERS	Serviço Internacional de Rotação da Terra e Sistemas de Referência
IFPE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco
IGN	<i>Institut Geographique National</i>
ITRF	Frame/ Realização de Referência Terrestre Internacional
ITRS	Sistema de Referência Terrestre Internacional
IUGG	União Internacional de Geodésia e Geofísica
LAST	Tempo Sideral Aparente Local
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MTMs	Métodos Terrestres de Medição planialtimétrica com estação total
NBR	Norma Brasileira
NGA	<i>National Geospatial-Intelligence Agency</i>

NMM	Nível Médio dos Mares
PD e PI	Posições Direta e Inversa
ppm	partes por milhão
PPT	Plano de Projeção Topográfico ou Plano de Projeção Local
RAFB	Rede Altimétrica Fundamental do Brasil
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
RRNN	Referências de Nível
SGL	Sistema Geodésico Local
SGR	Sistema Geodésico de Referência
SI	Sistema Internacional
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
TCG	Tempo Coordenado Geocêntrico
TIO	Origem Intermediária Terrestre
TIRS	Sistema de Referência Intermediário Terrestre
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UT1	Tempo Universal 1
UTC	Tempo Universal Coordenado
UTM	Universal Transversa de Mercator
WGS	<i>World Geodetic System</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	21
1.2	JUSTIFICATIVAS	22
1.3	OBJETIVOS	23
1.3.1	Geral	23
1.3.2	Específicos	24
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24
2	CONCEITOS ESSENCIAIS E ASSOCIADOS À INTEGRAÇÃO ENTRE LEVANTAMENTOS GEODÉSICOS E TOPOGRÁFICOS	26
2.1	NORMAS TÉCNICAS	26
2.1.1	ABNT NBR 14645	26
2.1.2	ABNT NBR 13133	27
2.1.3	ABNT NBR 14166	28
2.2	PROBLEMA DE MÍNIMOS QUADRADOS	28
2.2.1	Problema de Mínimos Quadrados Não-Linear	28
2.2.1.1	Método de Gauss-Newton	29
2.3	DATAS GEODÉSICOS VERTICAIS E ALTITUDES COM SIGNIFICADO FÍSICO	30
2.4	ALTITUDE NORMAL	33
2.5	SISTEMAS DE REFERÊNCIA: FUNDAMENTOS	35
2.5.1	Introdução	35
2.5.2	Sistema de Referência Terrestre	36
2.5.3	Definição do Sistema de Referência Terrestre Internacional (ITRS)	38
2.5.4	Acurácia das realizações do Sistema de Referência Terrestre Internacional (ITRS)	39
2.5.5	Sistema geodésico topocêntrico	40
2.5.6	Sistema topográfico local	41
2.5.7	Transformações entre o referencial geodésico cartesiano geocêntrico para o referencial geodésico topocêntrico	42
2.5.8	Transformações entre o referencial geodésico cartesiano geocêntrico para o referencial topográfico local	45
2.6	SISTEMAS DE PROJEÇÃO DERIVADOS DA PROJEÇÃO TRANSVERSA DE MERCATOR	46

2.6.1	Os sistemas LTM e RTM	47
3	INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E MÉTODOS DE LEVANTAMENTOS GEODÉSICOS/ TOPOGRÁFICOS	48
3.1	RECEPTORES GNSS: INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS	48
3.2	POSICIONAMENTO GNSS RELATIVO ESTÁTICO	49
3.3	NIVELAMENTO COM A TECNOLOGIA GNSS	51
3.4	MÉTODOS TERRESTRES DE MEDIÇÃO PLANIALTIMÉTRICA COM ESTAÇÃO TOTAL (MTMS)	53
3.4.1	Estações Totais Robóticas: Inovações tecnológicas	53
3.4.1.1	Estações Totais Robóticas de Monitoramento de Autoaprendizagem	54
3.4.2	Triangulação	55
3.4.3	Poligonação	55
3.4.4	Método da Interseção a Vante 2D e Interseção Espacial Analítica	57
3.4.4.1	Ajustamento e Controle de Qualidade do Método da Interseção a Vante 2D	63
3.4.4.2	Acurácia da Interseção	69
3.4.5	Nivelamento Trigonométrico	70
3.4.5.1	Erro Devido à Influência da Curvatura Terrestre	71
3.4.5.2	Erro Devido à Influência da Refração no Raio de Visada	73
3.4.5.3	Consideração da Curvatura Terrestre e Refração Atmosférica nos Nivelamentos Unilaterais	75
3.4.5.4	Técnica Leap Frog	77
3.4.6	Posicionamento por Métodos Clássicos em 3D	79
4	MATERIAIS E MÉTODOS PARA A DEFINIÇÃO DE PONTOS DE REFERÊNCIA	81
4.1	OBJETO DE ESTUDO E LOCALIZAÇÃO	81
4.2	ORIGEM (SISTEMA GEODÉSICO DE REFERÊNCIA): DADOS TOPOGRÁFICOS/ GEODÉSICOS CONHECIDOS – MARCOS TOPOGRÁFICOS/ GEODÉSICOS PRÉ-EXISTENTES	83
4.3	SÍNTESE METODOLÓGICA	84
4.4	MÉTODOS DE LEVANTAMENTOS GEODÉSICOS	85
4.4.1	Materiais utilizados e respectivas precisões	86
4.4.2	Medição e processamento dos Pontos de Referência medidos com o método de posicionamento GNSS Relativo Estático	87
4.4.2.1	Medição	87

4.4.2.2	Processamento	90
4.4.3	Transformação de Coordenadas Cartesianas Geocêntricas SIRGAS2000 em Coordenadas Cartesianas no Sistema Geodésico Local (SGL)	90
4.4.4	Transformação de coordenadas cartesianas geocêntricas SIRGAS2000 em coordenadas topográficas planas locais (STL)	91
4.4.5	Medição e processamento dos pontos de apoio pelo método da Poligonação com centragem forçada	91
4.4.6	Ajustamento das observações em rede por medidas dos métodos clássicos topográficos e com uso das distâncias inclinadas GNSS	93
4.4.7	Coordenadas altimétricas dos vértices de referência	96
5	MATERIAIS E MÉTODOS PARA A DEFINIÇÃO DE PONTOS-OBJETO	99
5.1	DADOS GEODÉSICOS E MATERIAIS UTILIZADOS	99
5.2	MEDIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS PONTOS – OBJETO PELOS MÉTODOS DE INTERSEÇÃO A VANTE, TRIANGULAÇÃO E INTERSEÇÃO ESPACIAL ANALÍTICA	99
5.2.1	Método da Interseção a Vante com centragem forçada e com excesso de visadas	99
5.2.2	Triangulação	101
5.2.3	Interseção Espacial Analítica	102
6	RESULTADOS E ANÁLISES PARA PONTOS DE REFERÊNCIA E PONTOS-OBJETO	103
6.1	RESULTADOS E ANÁLISES DOS PONTOS DE REFERÊNCIA MEDIDOS COM O MÉTODO DE POSICIONAMENTO GNSS RELATIVO ESTÁTICO	103
6.1.1	Considerações e Análise dos Resultados	109
6.2	TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS CARTESIANAS GEOCÊNTRICAS SIRGAS2000 EM COORDENADAS CARTESIANAS NO SISTEMA GEODÉSICO LOCAL (SGL)	110
6.3	PROCESSAMENTO E COMPENSAÇÕES OU AJUSTAMENTOS DOS DADOS MEDIDOS COM ESTAÇÃO TOTAL	111
6.3.1	Método Tradicional - Poligonal Fechada	111
6.3.2	Ajustamento das observações em rede por medidas dos métodos clássicos topográficos	115
6.3.2.1	Ajustamento das Observações em Rede por Medidas dos Métodos	119

	Clássicos Topográficos e com uso das Distâncias Inclinadas GNSS	
6.3.3	Processamento dos Pontos de Referência medidos com o método de Poligonação com centragem forçada – Poligonal Enquadrada	122
6.3.3.1	Considerações e Análise dos Resultados	125
6.4	COORDENADAS ASTRONÔMICAS E TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS CARTESIANAS GEOCÊNTRICAS SIRGAS2000 EM COORDENADAS TOPOGRÁFICAS PLANAS LOCAIS (STL)	126
6.5	COORDENADAS ALTIMÉTRICAS DOS VÉRTICES DE REFERÊNCIA	128
6.6	RESULTADOS E DISCUSSÃO MÉTODO DA INTERSEÇÃO A VANTE COM CENTRAGEM FORÇADA E COM EXCESSO DE VISADAS E TRIANGULAÇÃO	133
6.7	RESULTADOS E DISCUSSÃO MÉTODO DA INTERSEÇÃO ESPACIAL ANALÍTICA	138
6.8	RESULTADOS E DISCUSSÃO MÉTODO DA INTERSEÇÃO ESPACIAL ANALÍTICA COM DADOS CALCULADOS PELO AJUSTE EM REDE GEODÉSICA 3D	145
6.9	RESULTADOS E DISCUSSÃO: O USO DE DADOS AJUSTADOS EM REDE PARA CÁLCULO DA INTERSEÇÃO A VANTE 2D	148
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	151
7.1	CONCLUSÕES	151
7.2	RECOMENDAÇÕES	155
	REFERÊNCIAS	157
	APÊNDICE A - PONTOS E ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA LEVANTADOS/ OBTIDOS E PROCESSADOS	171
	APÊNDICE B - RELATÓRIO GNSS	182
	APÊNDICE C - POLIGONAL FECHADA	191
	APÊNDICE D - CADERNETA DE CAMPO DA POLIGONAL FECHADA	197
	APÊNDICE E - CADERNETA DE CAMPO PARA DETERMINAÇÃO DAS DISTÂNCIAS E ÂNGULOS NO CÁLCULO 3D DA POLIGONAL FECHADA	203
	ANEXO A - REFERÊNCIA DE NÍVEL RN_EPS03 (SILVA E SEIXAS, 2017)	206
	ANEXO B - REDE DE REFERÊNCIA CADASTRAL DO CAMPUS RECIFE DA UFPE	208
	ANEXO C - RELATÓRIO DE ESTAÇÃO GEODÉSICA	209

1 INTRODUÇÃO

A definição e materialização de estruturas geodésicas planialtimétricas (tridimensionais) com alta acurácia são fundamentais para diversas atividades envolvendo as Ciências Geodésicas e a Engenharia. Estas são vinculadas aos vértices geodésicos das redes de referência fundamentais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE): redes planimétrica, altimétrica e gravimétrica. Sendo assim, de grande importância que as observações de adensamento das redes sejam efetuadas com o uso das redes (de referência) fundamentais, necessárias ao posicionamento acurado de objetos naturais ou artificiais.

No contexto desta dissertação se realiza uma metodologia que determine com acurácia a posição planialtimétrica de pontos de referência e pontos de detalhes para o mapeamento 3D de edificações prediais.

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Uma das maiores dificuldades relacionadas ao mapeamento se refere à falta de infraestrutura adequada a levantamentos geodésicos/topográficos nas imediações da área de estudo. Pontos de controle são úteis para avaliar a qualidade de técnicas de medição independentes, estes são definidos e determinados principalmente para projetos de engenharia.

A determinação de pontos altos e inacessíveis (arestas) contidos nas estruturas arquitetônicas de edificações, os quais estão situados nas extremidades das fachadas de um prédio, delimitam a dimensão planialtimétrica da estrutura edificada. A definição destes pontos e o desenvolvimento de procedimentos metodológicos para a realização de levantamentos topográficos/geodésicos, a partir de métodos ópticos de medição, permite o aperfeiçoamento dos métodos para a determinação planialtimétrica de pontos.

Esta dissertação tem como princípio a obtenção de dados de campo para finalidades específicas, como referências para planejamentos dos métodos de nivelamento trigonométrico e interseção a vante de pontos-objeto para trabalhos de mapeamento 3D.

Neste sentido, os Métodos Terrestres de Medição planialtimétrica com estação total (MTMs) são estudados, tais como: Interseção a Vante, Nivelamento Trigonométrico com visadas curtas e longas e Poligonação. Além do Posicionamento Geodésico por Satélites.

No Brasil, há poucas pesquisas que se referem à determinação de pontos inacessíveis em estruturas de edificação e Erros Médios Quadráticos (EMQs) para os pontos-objeto. Gama et al., (2015), Gomes, Mendonça e Seixas (2021), Gomes (2020), Santos et al., (2021), França et al., (2021), Santos (2019), Rocha et al., (2012), Tenório e Seixas (2008) são algumas das pesquisas sobre este tema no Brasil. Seixas, Souza e Gama (2014), Souza (2012) tratam, por exemplo, dos pontos altos das torres de Olinda. Canto e Seixas (2020) utilizam o método da interseção a vante para determinação do centro virtual das seções transversais de torres eólicas e o método da irradiação 3D para a determinação dos raios das seções transversais destas torres.

A combinação de técnicas de medição 3D para a definição de um campo de pontos de referência e campo de pontos-objeto mostra-se ser de relevância. Por meio do Posicionamento Geodésico por Satélites e os Métodos Terrestres de Medição (MTMs) são determinados Erros Médios Quadráticos (EMQs) da ordem de poucos milímetros, para os pontos observados. Estas acurácias, dependentes, entretanto, da precisão nominal da estação total utilizada e metodologias de levantamentos. As mesmas (acurácias posicionais), na ordem de milímetros, tanto para os pontos de referência como para os pontos-objeto, são, portanto, adequadas às diversas finalidades na Engenharia.

Nesta dissertação os padrões de acurácia a serem adotados são estabelecidos pelas normas e especificações de levantamentos geodésicos vigentes no Brasil (ABNT NBR 13133 (2021)(1994); IBGE (2017); e ABNT NBR 14166 (1998)).

1.2 JUSTIFICATIVAS

A área de estudo desta dissertação contempla o Edifício da antiga Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) e seu entorno. O mesmo passou no ano de 2018 a compor ao patrimônio da Universidade Federal de Pernambuco. Por solicitação da Superintendência de Infraestrutura da UFPE foi solicitado ao Departamento de Engenharia Cartográfica um Levantamento Topográfico no prédio, o que possibilitou a elaboração de projeto de extensão aprovado pelo Pleno e o desenvolvimento de pesquisas de campo envolvendo mapeamento 3D de edificações tratadas nesta dissertação.

Uma aplicação para os Métodos Terrestres de Medição planialtimétrica com estação total (MTMs) é a determinação de pontos altos e inacessíveis. Em áreas urbanizadas alvos altos são de grande importância, pois os mesmos podem ser visíveis a grandes distâncias, de modo que podem servir para a definição azimutal e controle geométrico de vários levantamentos de campo. Outra aplicação, é a determinação de

pontos (ou arestas) de edificações; como citado anteriormente, os mesmos delimitam a dimensão planialtimétrica da estrutura edificada. Portanto, levantamentos cadastrais de alta acurácia.

Esta pesquisa é útil para finalidades nas quais são requeridas acurácias. O Decreto Lei nº 9.310, de 2018, (BRASIL, 2018) atualmente em vigor no Brasil institui as normas gerais e os procedimentos aplicáveis à Regularização Fundiária Urbana e estabelece os procedimentos para a avaliação e a alienação dos imóveis da União. Conforme este decreto, Seção II. Do levantamento topográfico georreferenciado. Art. 29. § 3º O erro posicional esférico do vértice definidor de limite deverá ser igual ou menor a \pm oito centímetros de raio.

Esta pesquisa torna simplificada a assimilação de conceitos restritos constantes na norma Decreto nº 9.310, de 2018 para o cadastro urbano no Brasil (BRASIL, 2018); Normas Técnicas ABNT NBR 14166 (1998) Rede de Referência Cadastral Municipal e ABNT NBR 13133 (1994) Execução de Levantamento Topográfico, e sua respectiva atualização (2021). Por apresentar forma de obtenção de dados distinta da maioria dos trabalhos vistos atualmente, que se utilizam da Fotogrametria, é extremamente útil o completo entendimento por parte de interessados em levantamentos geodésicos-topográficos o método de obtenção e avaliação dos dados até a etapa final.

Pernambuco é um estado do Brasil favorecido. Através do PE3D (2016), este possui Recobrimento Aerofotogramétrico e LIDAR (*Light Detection And Ranging*), tecnologia óptica de detecção e alcance de luz, em todo o seu território. Neste sentido, levantamentos aerofotogramétricos realizados com uso de *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs), Veículos Aéreos Não Tripulados, requerem pontos de controle para a integração de dados.

Esta dissertação contribui para a coleta de dados de alta qualidade e no estudo de técnicas de medição adequadas para confrontar projetos como construídos.

1.3 OBJETIVOS

A seguir são apresentados os objetivos: geral e específicos da dissertação.

1.3.1 Geral

Esta dissertação tem como objetivo geral avaliar (analisar) a combinação de técnicas 3D de medição com o emprego de receptores GNSS e estação total para o mapeamento 3D de edificações prediais.

1.3.2 Específicos

- Definir e determinar pontos de apoio imediato à edificação aplicando os métodos de posicionamento GNSS Relativo Estático e da Poligonação com centragem forçada;
- Avaliar a combinação entre os métodos de posicionamento GNSS e da Poligonação 3D;
- Definir e determinar pontos-objeto em arestas da estrutura da edificação aplicando os métodos da Triangulação, Interseção a Vante 2D e 3D e Nivelamento Trigonométrico;
- Analisar a qualidade posicional dos pontos-objeto determinados pelos diferentes métodos de determinação de coordenadas 2D e 3D;
- Propor procedimento para determinar pontos altos e inaccessíveis situados em arestas de edificação predial;
- Aplicar o ajustamento de redes geodésicas 3D para a determinação tridimensional (indireta) de pontos-objeto. Apenas observações aos Pontos de Referência são consideradas para o ajustamento em rede 3D.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este documento é composto de 7 capítulos.

No primeiro capítulo se faz uma introdução e trata-se da formulação do problema, justificativas e dos objetivos da dissertação.

O segundo capítulo traz uma síntese da bibliografia fundamental relacionada aos conceitos essenciais e associados à integração entre levantamentos geodésicos e topográficos.

O capítulo 3 se refere às recentes inovações tecnológicas associadas aos equipamentos utilizados nos métodos de levantamentos geodésicos/ topográficos; e destina-se também à uma descrição, tanto dos Métodos Terrestres de Medição planialtimétrica com estação total (MTMs), quanto do método de posicionamento GNSS Relativo Estático.

No capítulo 4 são abordados os materiais e métodos utilizados para a definição de pontos de Referência. Similarmente ao capítulo 4, os materiais e metodologia para a definição de pontos-objeto é apresentada no capítulo 5.

No capítulo 6 é feita a apresentação dos resultados e respectivas análises, os quais são discutidos em forma de tabelas e gráficos.

Em seguida, finaliza-se a dissertação com a apresentação das conclusões, e recomendações para futuros trabalhos e pesquisas, capítulo 7.

Posteriormente, além das referências bibliográficas são apresentados os respectivos anexos e apêndices citados no texto da dissertação.

2 CONCEITOS ESSENCIAIS E ASSOCIADOS À INTEGRAÇÃO ENTRE LEVANTAMENTOS GEODÉSICOS E TOPOGRÁFICOS

Neste capítulo, faz-se uma síntese dos conceitos essenciais referentes à integração entre Levantamentos Geodésicos e Topográficos. Neste contexto, são abordadas normas técnicas; problema de mínimos quadrados; datas geodésicas verticais e altitudes com significado físico; sistemas de referência e respectivas transformações entre estes; sistemas de projeção derivados da Projeção Transversa de Mercator.

2.1 NORMAS TÉCNICAS

A seguir são abordadas as Normas técnicas ABNT NBR 14645, ABNT NBR 13133 e ABNT NBR 14166.

2.1.1 ABNT NBR 14645

A ABNT NBR 14645, em sua parte 1 (ABNT NBR 14645-1, 2001), parte 2 (ABNT NBR 14645-2, 2005) e parte 3 (ABNT NBR 14645-3, 2011) é a norma brasileira que abrange a atividade de “as built” no Brasil. A parte 3 trata do levantamento planialtimétrico para locação topográfica e controle dimensional da obra. Esta norma também fornece diretrizes e orientações para projetos de retificação cadastral (em conjunto com a ABNT NBR 13133 (2021)(1994) – Execução de Levantamentos Topográficos e ABNT NBR 14166 (1998) – Rede de Referência Cadastral Municipal).

Conforme Xavier (2017), além de determinar procedimentos e requisitos para a elaboração dos levantamentos “as built”, a ABNT NBR 14645, em suas três partes, (2001), (2005) e (2011) também fornece amplo subsídio para as atividades relacionadas à atualização cadastral. A mesma contém sistemáticas detalhadas de trabalho para as atividades:

- (1) apuração de remanescente: visa apurar o restante de um imóvel que passou por várias vendas registradas ou desapropriações, com origem em um único registro;
- (2) unificação de imóveis: caracterização da área resultante da fusão de dois registros;
- (3) averbação de abertura de rua: consignação de confinância de imóvel com logradouro público omitido pelo registro imobiliário, ou abertura de via ou logradouro público oficial, indicando a área do imóvel desfalcada;

- (4) levantamento cadastral de cursos d'água;
- (5) desapropriações.

Além disso, a ABNT NBR 14645-2, (2005) também fornece um modelo de laudo técnico detalhado para a execução destas atividades. As sistemáticas de trabalho fornecidas pelo conjunto da ABNT NBR 14645 podem ser de grande valia para pequenas prefeituras, que ainda não possuem uma regulamentação definida para o Cadastro.

Assim, no que diz respeito a elaboração dos levantamentos “as built” a determinação de pontos altos e inacessíveis localizados em arestas de edificações prediais, tema em discussão, vem beneficiar o levantamento de edificações utilizando a combinação de técnicas de medição 3D e a definição de pontos de controle nas estruturas das edificações.

Ressalta-se, que de acordo com a ABNT NBR 14645-1 (2001), a descrição geométrica de um imóvel deve compreender um levantamento planialtimétrico e cadastral da área do imóvel, representando planialtimetricamente todos os detalhes naturais e artificiais presentes, na qual deve abranger o imóvel propriamente dito, as vias adjacentes e alinhamentos prediais opostos e os imóveis lindeiros em uma faixa de 3 metros dos limites do imóvel, podendo ser ampliada em casos especiais. O levantamento planialtimétrico deve ser realizado com equipamento de medição angular e linear classe 2 da ABNT NBR 13133 (2021)(1994), e “amarrado” a uma Rede de Referência Cadastral Municipal em conformidade com a ABNT NBR 14166 (1998), podendo ser “amarrado” a um Sistema de Coordenadas planorretangulares locais, caso tal rede não exista próximo à área. O levantamento pode ser complementado à trena, que estejam apoiadas em pontos levantados por irradiação polar (ABNT NBR 14645-1, 2001).

2.1.2 ABNT NBR 13133

A norma ABNT NBR 13133 (1994) atualizada em (2021), fornece os procedimentos e padrões adotados no Brasil para trabalhos de levantamento topográfico. Define os métodos a serem empregados em campo (Poligonação e Nivelamento Trigonométrico, Taqueométrico e Geométrico), a classificação dos instrumentos utilizados segundo sua precisão, o cálculo para processamento e ajustamento dos dados obtidos e os tipos de documentos topográficos gerados após os

levantamentos, além de modelos para cadernetas de campo e monografias de marcos implantados.

2.1.3 ABNT NBR 14166

A norma ABNT NBR 14166 (1998) estabelece definições dos elementos do Sistema Topográfico Local (STL), além dos procedimentos geodésicos e topográficos para sistematização dos levantamentos executados no âmbito municipal, e condições necessárias para a implantação de um Sistema Topográfico Local. Garnés (1998) e Garnés, Siqueira e Cacho (2005) se referem à esta normativa.

2.2 PROBLEMA DE MÍNIMOS QUADRADOS

O problema de mínimos quadrados pode ser enunciado como (equação (1)):

$$\text{Minimizar } f(x) = \|V(x)\|_2^2 \quad (1)$$

na qual:

$V: R^n \rightarrow R^m$ é a função residual;

$\|\cdot\|_2^2$ é a norma euclidiana ao quadrado.

2.2.1 Problema de Mínimos Quadrados Não-Linear

Este é solucionado iterativamente e em cada iteração deve ser resolvido um problema de mínimos quadrados linear.

O problema de mínimos quadrados, equação (1) generalizado através da ponderação pode ser definido como (equação (2)) (GARNÉS, 1996):

$$\min_{x \in R} f(x) = \|V(x)\|_W^2 \quad (2)$$

na qual:

$f: R^n \rightarrow R$, função objetivo;

$V: R^n \rightarrow R^m$, não-linear em x ;

$\|\cdot\|_W^2$: é a norma como definida abaixo:

$$\|V\|_W = \sqrt{\langle v, v \rangle_W}$$

Sendo que a norma obedece a três condições:

- i) $\|x\|_W > 0, \forall x \neq 0$;
- ii) $\|\alpha x\|_W = |\alpha| \|x\|_W$;
- iii) $\|x + y\|_W \leq \|x\|_W + \|y\|_W$.

Uma forma equivalente em definir o problema é dada pela equação (3):

$$\min \phi = V^T P V \quad (3)$$

na qual:

P: matriz dos pesos;

V: função de x (fica implícito).

Para a solução da equação (2) utiliza-se o método de Gauss-Newton, que advém da programação não-linear. Garnés (1996) descreve o respectivo método e realiza comparações quanto a convergência e número de iterações para alcançar a solução dentro de determinada precisão, aplicados à problema da Geodésia.

Nesta dissertação, o ajustamento em Rede 3D ou Rede Geodésica 3D se utiliza do Método de Gauss-Newton.

2.2.1.1 Método de Gauss-Newton

O método de Gauss-Newton, conforme Garnés (1996), utiliza um modelo afim de V em um ponto aproximado, x_0 . Permite que $V(x_0)$ represente a equação residual avaliada no ponto aproximado x_0 . O modelo afim de $V(x)$ é então definido pela equação (4):

$$V_c(x) = V(x_0) + J(x_0)(x - x_0) \quad (4)$$

na qual:

$V_c(x)$: é a aproximação linear para $V(x)$ no ponto (x_0) ;

$J(x_0)$: é a matriz jacobiano calculada no ponto x_0 .

$(x - x_0) = \Delta x$: vetor das correções aos parâmetros aproximados.

O problema de mínimos quadrados não-linear tornou-se agora um problema de mínimos quadrados linear, pois a equação (4) representa um sistema de equações lineares inconsistente e o caminho agora é resolvê-lo usando o critério de mínimos quadrados (equação (5)).

$$\min \|V_c\|_W^2 = V_c^T P V_c \quad (5)$$

A solução para a equação (5) pode ser obtida por qualquer dos métodos que se utilizam das equações normais, para essas a solução para o problema torna-se a equação (6):

$$\Delta x = -[J(x_0)^T P J(x_0)]^{-1} J(x_0)^T P V(x_0) \quad (6)$$

desde que $[J(x_0)^T P J(x_0)]$ tenha inversa ordinária, x é então calculado como a equação (7):

$$x = x_0 + \Delta x \quad (7)$$

O parâmetro x só será ponto de mínimo de $f(x)$ se $V(x)$ for linear, caso contrário x corresponde apenas a um valor melhorado de x_0 , numa direção de decrescimento $f(x)$ (desde que $J(x_0)$ tenha posto completo).

Quando se busca a solução para que a condição de otimalidade de $f(x)$ no ponto de mínimo seja satisfeito, ou seja, $\nabla f(x^*) = 0$, é necessário um processo iterativo.

Para realizar esse processo iterativo, considere x_i como sendo o valor de x numa iteração i e x_{i+1} , o valor de x na iteração consequente.

Esse passo é calculado pela equação (8):

$$x_{i+1} = x_i - [J(x_i)^T P J(x_i)]^{-1} J(x_i)^T P V(x_i) \quad (8)$$

para quando $P = I$, a equação (8) torna-se a equação (9):

$$x_{i+1} = x_i - [J(x_i)^T J(x_i)]^{-1} J(x_i)^T V(x_i) \quad (9)$$

Mais detalhes, consultar Garnés (1996).

2.3 DATAS GEODÉSICOS VERTICAIS E ALTITUDES COM SIGNIFICADO FÍSICO

O estabelecimento de um sistema de referência vertical preciso relacionado ao campo gravitacional global ainda é um problema não resolvido (SÁNCHEZ, 2012). O *datum* vertical global corresponderá à uma superfície de nível do campo de gravidade da Terra com um determinado valor potencial ($W_0 = \text{const}$) (KUTTERER et al., 2012). Nos últimos anos, diferentes estimativas W_0 foram realizadas aplicando-se uma grande variedade de estratégias e modelos. Embora estas estimativas sejam muito semelhantes, as discrepâncias entre os valores finais W_0 são maiores do que a acurácia esperada de realização, isto é, >10 cm (ou $1 \text{ m}^2/\text{s}^2$), segundo Sánchez (2012).

A introdução de um valor W_0 como nível de referência é útil para indicar qual das superfícies equipotenciais infinitas do campo de gravidade da Terra é selecionada como superfície de altitude zero (SÁNCHEZ, 2012). Em geral, a superfície equipotencial preferida é o geóide, cf. Heck (2004) *apud* (SÁNCHEZ, 2012): “Equipotential surface coinciding with the mean sea level registered at an arbitrarily

selected tide". Superfície equipotencial coincidindo com o nível médio do mar registrado em um sistema de maré arbitrariamente selecionado.

A partir da origem, nominalmente vinculada ao nível médio do mar, cf. Featherstone e Kuhn (2006) se conduz a operação de nivelamento geométrico para se estabelecer uma rede de referência altimétrica (BLITZKOW, 2004).

O nível do mar fica então sendo o plano de referência para todos os trabalhos de altimetria; este é conduzido para o interior dos continentes, sendo então colocadas marcas de referência de nível, em pontos previamente planejados, para que outros trabalhos se baseiem neles (BORGES, 2010).

Uma vez que o sistema de altitude foi selecionado, e as "correções" apropriadas feitas às observações de nivelamento geométrico, é necessário realizar um ajuste de mínimos quadrados das diferenças de altitudes corrigidas, de modo a minimizar o impacto dos erros aleatórios Featherstone e Kuhn (2006). Idealmente, o ajuste deve ser realizado sobre os números geopotenciais ou sistemas de altitude os quais têm um erro de fechamento teórico nulo, conforme Sansò e Vanícek (2005).

Os resultados do ajuste de mínimos quadrados definem os valores de altitude "definitivos" de todas as Referências de Nível monumentadas no terreno. São estas as coordenadas altimétricas ajustadas e Referências de Nível que definem o *datum* vertical (FEATHERSTONE e KUHN, 2006). Este ajuste resulta em um *datum* geodésico vertical, no qual as altitudes dos pontos de referência são adotadas numa época especial de adaptação, para um *datum* geodésico horizontal, segundo Featherstone (1996) *apud* (FEATHERSTONE e KUHN, 2006). Lembrando-se que aqui se negligencia mudanças temporais no nível do mar, altitude e gravidade.

Ainda conforme Featherstone e Kuhn (2006), associado com a seleção do sistema de altitude é a seleção da superfície de referência compatível no qual a altitude é igual a zero. Obviamente, o *datum* vertical será diferente dependendo da seleção deste sistema de altitude. Estes autores ainda descrevem as várias superfícies de *data* verticais (ou nível zero) para estes sistemas de altitudes e sua realização prática pontual.

No Brasil, a Rede Altimétrica Fundamental do Brasil (RAFB) dispõe de aproximadamente 69000 altitudes ajustadas da sua realização inicial (IBGE, 2011), mas o número de Referências de Nível (RRNN) que **ainda se encontram materializadas para uso é bem inferior**; conforme se observa nos relatórios destas, disponíveis no *site* do IBGE.

Ainda com relação ao Brasil, são utilizadas as altitudes “normais-ortométricas”, a Rede Altimétrica está conectada à Estação Maregráfica de Imbituba (*Datum* Imbituba) em Santa Catarina. Uma pequena porção da Rede Altimétrica existente no estado do Amapá está conectada ao *Datum* Santana, para isto, seguiu-se à utilização do nível médio do mar no Porto de Santana entre 1957 e 1958.

No caso das Referências de Nível (RRNN) do SGB, até 30 de julho de 2018 eram disponibilizadas para os usuários as altitudes ortométricas do tipo normal, mas, a partir da divulgação dos resultados do reajustamento altimétrico (IBGE, 2019), o Banco de Dados Geodésicos - BDG vem disponibilizando altitudes normais, seguindo as recomendações do Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas - SIRGAS (TALLER DEL SIRGAS-GTI, 2008, p. 13).

Em resumo, a diferença conceitual entre as altitudes ortométrica, normal e normal-ortométrica reside no tipo de gravidade (real ou teórica) utilizado em duas etapas distintas (IBGE, 2019): no cálculo das diferenças de geopotencial (gravidade na superfície física) e na conversão do número geopotencial final em altitude física (valor médio da gravidade ao longo da vertical). Para a altitude ortométrica rigorosa, utiliza-se a gravidade real nas duas etapas, enquanto para a altitude ortométrica-normal, emprega-se a gravidade normal em ambas as etapas. No caso das altitudes normais, aplica-se a gravidade real para o cálculo das diferenças de geopotencial, e a gravidade normal para a obtenção da altitude (IBGE, 2019).

Uma altitude com significado físico, isto é, uma altitude científica, está associada com a Terra real. Por exemplo, a altitude ortométrica, a altitude dinâmica ou a altitude normal constituem opções para um sistema de altitudes científicas. Isto é possível quando o nivelamento geométrico é associado à gravimetria. Esta associação leva a determinação do número geopotencial e, em seguida, à obtenção de uma das altitudes mencionadas. Como exemplo ao parágrafo de introdução do primeiro capítulo (uso e aplicação na Engenharia Civil), as observações GNSS realizadas poderão ser utilizadas para finalidades referentes à futuras leituras gravimétricas e às atividades de nivelamentos geométricos de altíssima precisão (GNSS sobre RN).

Possibilitando, portanto, além de cálculos de números geopotenciais, parte de dados essenciais à estimação da superfície geoidal por diferentes métodos; visto que as coordenadas dos pontos são parte importante desta estimativa.

Na seção 2.4 é definida a Altitude Normal.

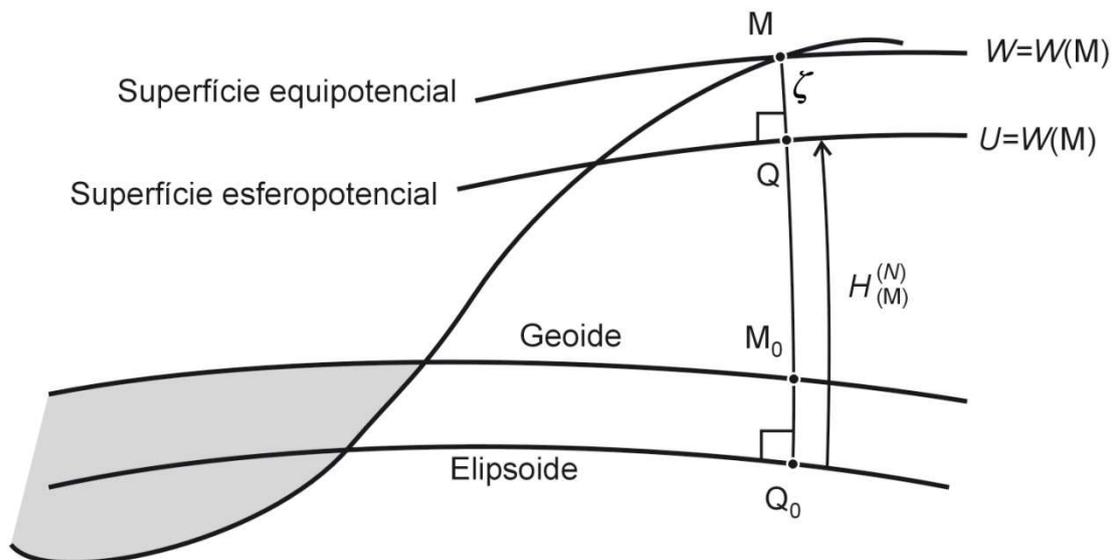
2.4 ALTITUDE NORMAL

Denomina-se superfície esferopotencial de um ponto M a superfície equipotencial do campo normal, cujo potencial normal é igual ao potencial real de M. O ponto Q é a interseção da esferopotencial e da linha de força. A altitude normal de M, Figura 1, é a altitude Q_0Q da superfície esferopotencial acima do elipsoide, tomada ao longo da linha de força do campo normal. O arco de linha de força compreendido entre Q e M é anomalia de altura ζ , $\tilde{\gamma}$ é a aceleração normal média no arco de linha de força do campo normal Q_0Q^1 (BOUVELOUP, 2002):

$$\tilde{\gamma} = \frac{1}{H_{(M)}^{(N)}} \int_{Q_0Q} \gamma(h) \cdot ds = \frac{U(Q_0) - U(Q)}{H_{(M)}^{(N)}} = \frac{W(A) - W(M)}{H_{(M)}^{(N)}} \quad (10)$$

em que ds é a diferencial da abscissa curvilínea da linha de força do campo normal.

Figura 1 – Altitude normal.



Fonte: (BOUVELOUP, 2002).

Tem-se então:

$$H_{(M)}^{(N)} = \frac{W(A) - W(M)}{\tilde{\gamma}} \quad (11)$$

Para o cálculo da altitude normal, é necessário obter o valor médio da gravidade normal ($\tilde{\gamma}$ ou γ_{vert}), isto é, a gravidade teórica dada pelo chamado modelo Terra normal (TALLER DEL SIRGAS-GTI, 2008, p. 13):

¹ i.e., entre o elipsoide de referência e o teluroide (HEISKANEN e MORITZ, 1967).

$$H^N = C/\gamma_{\text{vert}}$$

$$\gamma_{\text{vert}} = \gamma_0 \cdot \left(1 - \left(\frac{H^N}{a} \right) \cdot (1 + \alpha + m - (2 \cdot \alpha \cdot \text{sen}^2 \varphi)) + \left(\frac{H^N}{a} \right)^2 \right) \quad (12)$$

$$\gamma_0 = \gamma_a \cdot \left(\frac{(1+k \cdot \text{sen}^2 \varphi)}{(1-e^2 \cdot \text{sen}^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}} \right), k = \left(\frac{b \cdot \gamma_b}{a \cdot \gamma_a} \right) - 1$$

sendo a , b , m , α , γ_a e γ_b parâmetros associados ao sistema geodésico de referência (LUZ, 2008, p. 30) *apud* (IBGE, 2019).

Ainda com relação à formulação apresentada, a e b são o semieixo maior e o semieixo menor do elipsoide; m representa a relação entre a força centrífuga no equador e a gravidade normal equatorial, representado pela equação (BOUTELOUP, 2002): $m = (\omega^2 a^2 b) / GM$ em que, ω é a velocidade angular de rotação da Terra, a e b , os semieixos do elipsoide e GM é a constante gravitacional Geocêntrica; α é o achatamento do elipsoide de referência, $\alpha = (a - b) / a$; γ_a e γ_b , conforme formulação acima, ou ainda, γ_e e γ_p , respectivamente, são as gravidades normais equatorial e polar no elipsoide (em $m \cdot s^{-2}$), φ é a latitude geodésica. Para o elipsoide do Sistema Geodésico de Referência 1980 (GRS1980), $\gamma_e = 9,7803267715 \text{ m} \cdot s^{-2}$ e $\gamma_p = 9,8321863685 \text{ m} \cdot s^{-2}$. Ainda com relação ao GRS 1980, m é igual $m = 0,00344978600308$ (GARNÉS, 2022); a Primeira Excentricidade Quadrática (e^2), dada por $(e^2) = 2f - f^2$, é igual (SILVEIRA, 2011) $e^2 = 0,0066943800229$; o achatamento f ou α , $\alpha = 1/298,257222101$, ou ainda, $\alpha = 0,0033528106812$.

Contrariamente às altitudes ortométricas, as altitudes normais são derivadas de uma fórmula de gravidade normal, por conseguinte, em certa medida, da escolha de um elipsoide de referência. Em contrapartida, ela independe da divisão das massas na crosta terrestre (BOUTELOUP, 2002)². Observa-se, no entanto que a superfície quase geoidal, diferentemente da geoidal, não materializa uma superfície equipotencial.

A superfície que se vincula ao elipsoide através da anomalia de altitude (ζ) é o quase geoide. Ou ainda, se a anomalia de altitude for plotada a partir da superfície física, obtêm-se o teluroide. Contrariamente ao geoide, o quase geoide e o teluroide não são superfícies equipotenciais (BLITZKOW, CAMPOS e FREITAS, 2004).

² isto é, tornando-se o sistema de altitudes normal dispensa-se qualquer hipótese sobre distribuição de densidade de massas ou correções no terreno (SEVERO et al., 2013).

Conforme citado no item 2.3, o IBGE, a partir de 2019, por meio do Banco de Dados Geodésicos - BDG vem disponibilizando altitudes normais; neste caso, se fez necessário uma revisão bibliográfica sobre altitudes científicas, incluindo-se as altitudes normais. No entanto, para a área de trabalho desta dissertação, não há RRNN com medidas gravimétricas que possibilitem o cálculo de números geopotenciais. Conforme já citado no item 2.3, décimo primeiro parágrafo, IBGE (2019), a diferença conceitual entre as altitudes ortométrica, normal e normal-ortométrica reside no tipo de gravidade (real ou teórica) utilizado em duas etapas distintas: no cálculo das diferenças de geopotencial (gravidade na superfície física) e na conversão do número geopotencial final em altitude física (valor médio da gravidade ao longo da vertical). No caso das altitudes normais, aplica-se a gravidade real para o cálculo das diferenças de geopotencial, e a gravidade normal para a obtenção da altitude.

A seção 2.5 a seguir refere-se aos Sistemas de referência.

2.5 SISTEMAS DE REFERÊNCIA: FUNDAMENTOS

Os tópicos descritos a seguir, subitem 2.5.1. ao item 2.6 são relacionados a conceitos essenciais; relacionam-se, principalmente, a sistemas de referência (2.5.1. a 2.5.8.) e item 2.6 aos sistemas de projeção. Os subitens 2.5.1 a 2.5.4 se referem ao sistema cartesiano geocêntrico fixo na Terra. O sistema de coordenadas geodésicas cartesianas locais e o sistema de coord. topográficas locais são, topocêntricos, isto é, possuem (origem na superfície física). Estes últimos são descritos nos subitens 2.5.5 a 2.5.8.

A revisão bibliográfica dos sistemas de referência é útil tanto para a compreensão de suas realizações como para a combinação de forma acurada de técnicas de medição 3D; dada pelo Posicionamento Geodésico por Satélites e os Métodos Terrestres de Medição planialtimétrica com estação total (MTMs).

2.5.1 Introdução

Os sistemas de referência em astronomia e geodésia são, em princípio, quadridimensionais, contendo um conjunto de coordenadas geométricas tridimensionais e a coordenada de tempo (TORGE e MULLER, 2012). Ainda conforme estes autores, restringindo-se à geometria no espaço newtoniano, os sistemas são definidos pela origem e orientação dos planos ou eixos fundamentais de um sistema de coordenadas cartesiano. Por razões práticas, coordenadas esféricas (polares) também são introduzidas em ambos os sistemas.

Há a distinção entre o sistema de referência celeste fixo no espaço e o sistema de referência terrestre fixo no corpo da Terra. O plano equatorial (ou eixo de rotação da Terra, respectivamente) fornece uma orientação comum para ambos os sistemas, que diferem por sua orientação convencional naquele plano (TORGE e MULLER, 2012).

Nas seções a seguir, discute-se, principalmente, os fundamentos dos sistemas de referência terrestres, seguindo as definições clássicas da astronomia. Uma série de resoluções da União Astronômica Internacional (IAU) desde a década de 1990 modificou e refinou significativamente os conceitos e definições em astronomia fundamental para lidar com o aumento da acurácia das observações, conforme Torge e Muller (2012). Como consequência, os sistemas de referência adotados internacionalmente sofreram algumas mudanças importantes, enquanto a acurácia dos referenciais melhorou notavelmente.

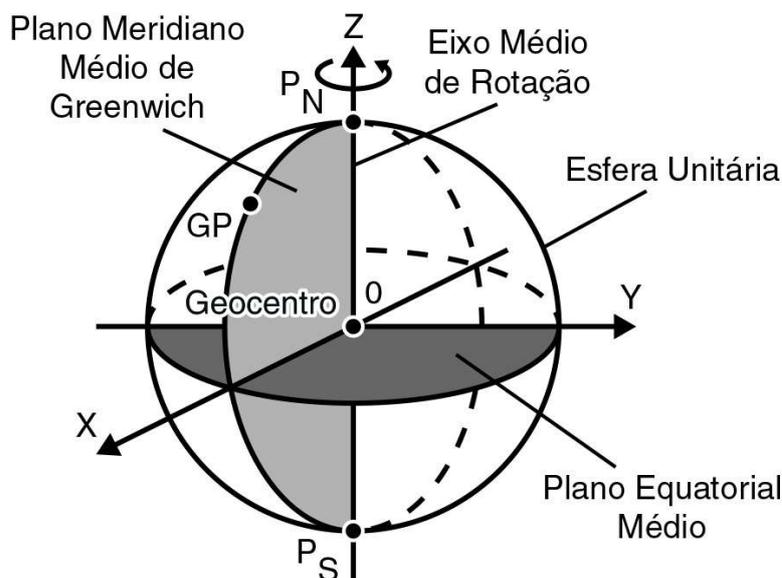
Os sistemas convencionais de referência celestes e terrestres são hoje definidos pela IAU e pela União Internacional de Geodésia e Geofísica (IUGG), sendo realizados por referenciais correspondentes. A realização e manutenção dos referenciais é tarefa do Serviço Internacional de Rotação da Terra e Sistemas de Referência (IERS). O IERS também é responsável pela determinação dos parâmetros de orientação terrestre (EOP), que relacionam os dois referenciais entre si e que são necessários para estudar as variações de orientação da Terra.

Por fim, o IERS também é responsável pelo anúncio de UT1 – UTC, diferença entre Tempo Universal1 e Tempo Universal Coordenado, e pela introdução dos *leap seconds*, saltos de segundos (ou segundos bissextos). Um *leap second* é o ajuste de um segundo feito em momentos específicos do ano para sincronizar a escala atômica de tempo do UTC com a variação da rotação da Terra.

2.5.2 Sistema de Referência Terrestre

Um sistema de referência fixo na Terra, rotacionando com a mesma, é introduzido para descrever as posições e movimentos de objetos na superfície da Terra e próximos dela, fornecendo assim a base para levantamentos nacionais e navegação. Ele também serve, bem como outras aplicações, como estrutura geométrica para modelar deformações do corpo da Terra e outras variações terrestres com o tempo (TORGE e MULLER, 2012). Apresenta-se, na Figura 2 um sistema de coordenadas cartesianas geocêntrico tridimensional, realizado através das coordenadas de um conjunto de estações fundamentais de uma rede geodésica global.

Figura 2 – Sistema cartesiano geocêntrico fixo na Terra.



Fonte: (TORGE e MULLER, 2012).

Torge e Muller (2012) descrevem o Sistema cartesiano geocêntrico. A origem deste sistema de coordenadas cartesianas espaciais X, Y, Z está localizada no centro de massa da Terra (geocentro), sendo definida para toda a Terra incluindo oceanos e atmosfera. O eixo Z é direcionado para um polo terrestre “médio” convencional (norte) e deve coincidir com um eixo de rotação “médio” correspondente. O plano equatorial “médio” é perpendicular a ele e contém os eixos X e Y. Um eixo de rotação “médio” e um plano equatorial devem ser introduzidos porque a rotação da Terra muda em relação ao corpo da Terra ao longo do tempo. O plano X, Z é gerado pelo plano meridiano “médio” convencional de Greenwich, que é medido pelo eixo médio de rotação e pelo meridiano zero de Greenwich, ao qual se refere o Tempo Universal. O eixo Y é direcionado de forma a obter um sistema destro. Para obter a definição do Sistema de Referência Internacional, consulte Torge e Muller (2012), seção (3.2.2).

Comparando as definições dos sistemas de referência celeste e terrestre, reconhece-se que o eixo instantâneo de rotação é o ponto de partida comum para definir o eixo Z de ambos os sistemas. As direções do eixo X dos sistemas diferem pelo ângulo do tempo sideral aparente de Greenwich GAST. Com o recente sistema IAU2000, o GAST foi substituído pelo Ângulo de Rotação da Terra, cf. Torge e Muller (2012), seção (3.2.2).

2.5.3 Definição do Sistema de Referência Terrestre Internacional (ITRS)

O Sistema de Referência Terrestre Internacional (ITRS) é um sistema geocêntrico de referência terrestre (GTRS) que rotaciona em conjunto com a Terra em seu movimento diurno no espaço, ou seja, com o eixo fixo à Terra sólida. A origem do ITRS é o centro de massa da Terra, incluindo oceanos e atmosfera. A unidade de comprimento é o metro (SI), que é consistente com o tempo coordenado TCG. A orientação do eixo é mantida em continuidade com os acordos internacionais anteriores (orientação *Bureau International de L'Heure* (BIH)). Consequentemente, o polo do ITRS (Polo de Referência IERS) concorda dentro da acurácia de realização com a antiga Origem Internacional Convencional, definida como a direção média do eixo de rotação da Terra entre 1900 e 1905. Isto também é válido para o Meridiano de Referência IERS, que aponta para a longitude zero no equador e coincide com o Greenwich Médio do antigo Observatório BIH. A evolução temporal da orientação ITRS é assegurada por uma condição de não rotação em relação aos movimentos horizontais na superfície da Terra, isto é, uma rotação residual global não é permitida.

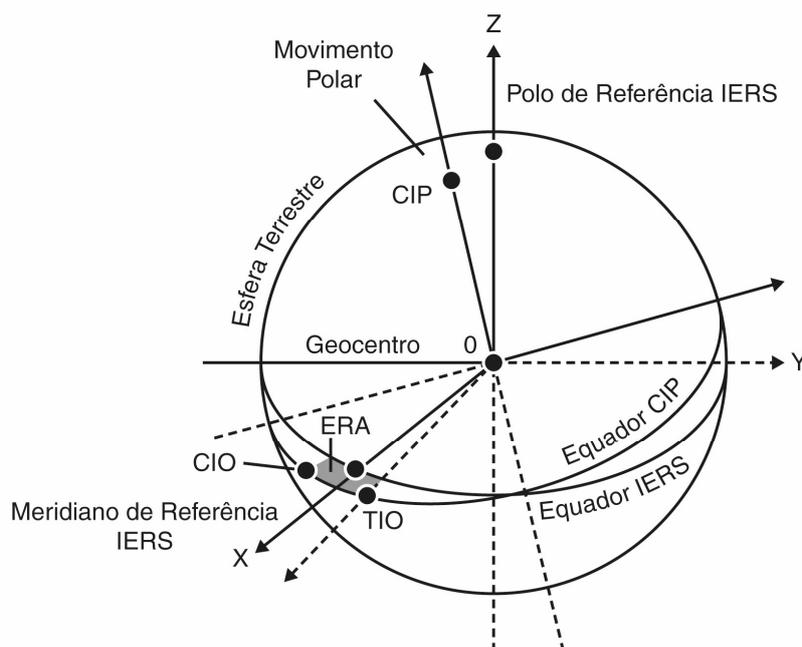
A conexão do ITRS ao Sistema de Referência Celeste Internacional (ICRS) é dada através do Sistema de Referência Intermediário Terrestre (TIRS), conforme definido pelo Polo Intermediário Celeste (CIP) respectivamente o equador intermediário e a Origem Intermediária Terrestre (TIO), Figura 3.

O TIRS está relacionado ao ITRS pelo movimento polar (ou seja, o movimento do CIP em relação ao ITRS). As coordenadas polares x_P , y_P são derivadas de observações. São publicados regularmente pelo IERS, juntamente com componentes adicionais devidos às marés oceânicas (variações diurnas e semi-diurnas) e à nutação (com períodos inferiores a 2 dias no espaço, que não estão incluídos no modelo de nutação).

A relação do ITRS com o Sistema de Referência Celeste Geocêntrico (GCRS) é dada pelo CIP (que é idêntico em ambos os sistemas), e por uma rotação em torno do eixo CIP que leva em consideração a rotação da Terra. O ângulo de rotação é chamado de ângulo de rotação da Terra (ERA), e sua derivada no tempo é a velocidade angular da Terra. O ERA é medido ao longo do equador intermediário do CIP entre a Origem Intermediária Celeste (CIO) e a Origem Intermediária Terrestre (TIO), positivamente na direção retrógrada. Ele substitui o Tempo Sideral Aparente de Greenwich (GAST) introduzido no sistema equador/ eclíptico clássico como ângulo de rotação entre o equinócio vernal verdadeiro e o Meridiano de Greenwich. O ERA está conectado com UT1 por uma relação linear simples, dada por Capitaine et al., (2000)

apud (TORGE e MULLER, 2012). Pode ser calculado a partir dos valores UT1 publicados pelo IERS, onde, similarmente ao movimento polar, pequenas marés subsidiárias do oceano e efeitos de nutação devem ser adicionados como correções. A TIO representa a origem da longitude no Sistema de Referência Intermediário Terrestre (TIRS), e permanece dentro de 0,1 mas do meridiano zero do ITRF.

Figura 3 – Sistema de Referência Terrestre Internacional (Sistema de Referência – IERS) e Sistema de Referência Intermediário Terrestre (sistema CIP/ TIO), com Ângulo de Rotação Terrestre (ERA) e movimento do CIP no ITRS (movimento polar).



Fonte: (TORGE e MULLER, 2012).

2.5.4 Acurácia das realizações do Sistema de Referência Terrestre Internacional (ITRS)

As realizações do ITRS são fornecidas pelo IERS, através do Frame de Referência Terrestre Internacional (ITRF) (atualizado regularmente).

A combinação das redes observadas com diferentes técnicas é realizada por medições de injeção local (acurácia milimétrica “mm”) nas estações, nas quais diferentes técnicas são empregadas. Esses sites de co-localização são de valor especial também para detectar diferenças sistemáticas entre os métodos.

As coordenadas ITRF são fornecidas para uma época de referência (t_0), e referem-se ao Polo de Referência IERS e ao Meridiano de Referência IERS, ver acima. O vetor de posição atual r (dado em coordenadas cartesianas tridimensionais para o

tempo t) de um ponto na superfície da Terra é derivado de sua posição na época de referência pela equação (13) (TORGE e MULLER, 2012)

$$r(t) = r_0 + r'_0(t - t_0) + \Delta r(t) \quad (13)$$

Aqui, r_0 e r'_0 são a posição e a velocidade respectivamente em t_0 , e $\Delta r(t)$ representa as variações periódicas e episódicas da estação de origem geofísica para as quais os modelos convencionais estão disponíveis.

Novas versões do ITRF são publicadas periodicamente pelo IERS, as soluções são obtidas nos Centros de Combinação ITRS IGN (*Institut Geographique National*) e DGFI (*Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut*). Os resultados referem-se à época J2000,0. Mas no futuro, as soluções semanais poderão proporcionar uma monitorização quase contínua dos movimentos das estações.

As acurácias das soluções ITRF dependem das técnicas de observação e da qualidade e intervalo de tempo dos dados. A acurácia das posições e velocidades das estações é agora da ordem de alguns mm e 0,1 a 0,5 mm/ano, respectivamente (TORGE e MULLER, 2012).

Conforme Torge e Muller (2012) o ITRF praticamente concorda com o World Geodetic System WGS84, mantido pela Agência Nacional de Informação Geoespacial (NGA) - *National Geospatial-Intelligence Agency*. A coincidência está dentro do nível de um metro para a realização anterior do WGS84-Doppler, e no nível de poucos cm ou melhor para as realizações do GPS do WGS84, os parâmetros de transformação entre os sistemas não são mais significativos.

Os produtos IERS baseiam-se em modelos, procedimentos e constantes que seguem os desenvolvimentos das pesquisas e as recomendações das uniões científicas internacionais. As convenções e padrões são atualizados periodicamente, mantendo a continuidade com as regras anteriores. Os resultados do IERS são regularmente divulgados por meio de boletins, relatórios anuais e notas técnicas (bulletins, annual reports, e technical notes).

2.5.5 Sistema geodésico topocêntrico

O sistema geodésico topocêntrico (GARNÉS, SIQUEIRA e CACHO, 2005), ou sistema de coordenadas geodésicas cartesianas locais, ou ainda sistema geodésico local (SGL) (ANDRADE, 2003; MONICO, 2008), consiste de um sistema cartesiano com orientação do eixo z coincidindo com a direção normal ao elipsoide

de referência no ponto origem (φ_0, λ_0) , sendo o sentido positivo o “zenital”; o eixo y tem orientação positiva para o norte e a direção coincidente com a direção da reta tangente ao meridiano elipsóidico na origem do sistema; o eixo x forma com os demais eixos um terno cartesiano ortogonal destrogiro (orientação positiva para leste) (GARNÉS, SIQUEIRA e CACHO, 2005).

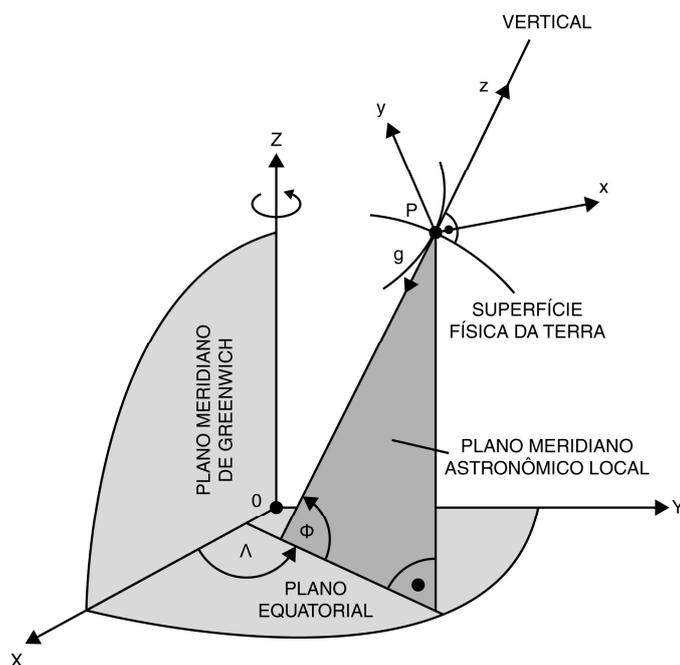
2.5.6 Sistema topográfico local

Garnés (1998) chama a atenção que o Sistema Topográfico Local seria idêntico ao Sistema Astronômico Local com os eixos definidos conforme utilizado nos trabalhos de Topografia no Brasil. Assim, conforme ilustrado na Figura 4, um ponto origem (P) na superfície terrestre tem seus eixos caracterizados neste Sistema Topográfico Local (SOUZA, W., 2012):

z: a orientação deste eixo coincide com a direção da vertical passante no ponto origem (P) com sentido positivo para o zênite; y: tem sentido positivo para o Norte e coincidente com a direção do meridiano Astronômico; x forma com os demais eixos um sistema cartesiano ortogonal, com orientação positiva para Leste.

A orientação do sistema topográfico local em relação ao sistema de referência geocêntrico global é dada por dois ângulos, definindo a direção do fio de prumo (Figura 4). A latitude astronômica (geográfica) Φ é o ângulo medido no plano do meridiano entre o plano equatorial e a vertical local através do ponto P. É considerado positivo do equador para o norte e negativo para o sul. O ângulo medido no plano equatorial entre o plano do meridiano de Greenwich e o plano do meridiano que passa por P é a longitude astronômica (geográfica) Λ ; é considerado positivo para o leste. O plano meridiano astronômico local é medido pela vertical local em P e uma linha paralela ao eixo de rotação.

Figura 4 – Latitude e longitude astronômicas e Sistema Astronômico Local com os eixos definidos conforme utilizado nos trabalhos de Topografia no Brasil, ou ainda, Sistema Topográfico Local.



Fonte: Autor (2020).

No sistema geodésico topocêntrico a cota z é definida segundo a direção da normal do ponto origem do sistema e no sistema topográfico local a cota z é definida segundo a direção da vertical no ponto origem (GARNÉS, 1998).

2.5.7 Transformações entre o referencial geodésico cartesiano geocêntrico para o referencial geodésico topocêntrico

A transformação de coordenadas no referencial geodésico cartesiano geocêntrico para o referencial geodésico topocêntrico, equação (14), é dada por (FAZAN, 2007; WOLF e DEWITT, 2000)

$$\begin{pmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{pmatrix} = R_1(90^\circ - \phi_0) \cdot R_3(90^\circ + \lambda_0) \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

na qual:

(X, Y, Z) são as coordenadas de um ponto P no referencial geodésico cartesiano, *(coordenadas geocêntricas do Ponto)*;

(X_L, Y_L, Z_L) são as coordenadas do ponto correspondente ao ponto P no referencial geodésico topocêntrico (sistema geodésico local);

(φ_0, λ_0) são as coordenadas geodésicas da origem do referencial geodésico topocêntrico (sistema geodésico local);

(X_0, Y_0, Z_0) são as coordenadas geodésicas cartesianas da origem do referencial cartesiano local, calculadas em função das coordenadas geodésicas $(\varphi_0, \lambda_0, h_0)$;

(*coordenadas geocêntricas do Ponto Origem*);

R_1 e R_3 são as matrizes de rotação em torno dos eixos X_G e Z_G , respectivamente, do sistema geodésico cartesiano geocêntrico, dadas pelas equações

$$R_1(90^\circ - \phi_0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(90^\circ - \phi_0) & \sin(90^\circ - \phi_0) \\ 0 & -\sin(90^\circ - \phi_0) & \cos(90^\circ - \phi_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(\phi_0) & \cos(\phi_0) \\ 0 & -\cos(\phi_0) & \sin(\phi_0) \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$\text{e } R_3(90^\circ + \lambda_0) = \begin{pmatrix} \cos(90^\circ + \lambda_0) & \sin(90^\circ + \lambda_0) & 0 \\ -\sin(90^\circ + \lambda_0) & \cos(90^\circ + \lambda_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin(\lambda_0) & \cos(\lambda_0) & 0 \\ -\cos(\lambda_0) & -\sin(\lambda_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

Portanto,

$$\begin{pmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(\phi_0) & \cos(\phi_0) \\ 0 & -\cos(\phi_0) & \sin(\phi_0) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -\sin(\lambda_0) & \cos(\lambda_0) & 0 \\ -\cos(\lambda_0) & -\sin(\lambda_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix}, \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin(\lambda_0) & \cos(\lambda_0) & 0 \\ -\sin(\phi_0) \cdot \cos(\lambda_0) & -\sin(\phi_0) \cdot \sin(\lambda_0) & \cos(\phi_0) \\ \cos(\phi_0) \cdot \cos(\lambda_0) & \cos(\phi_0) \cdot \sin(\lambda_0) & \sin(\phi_0) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix},$$

Para realizar a transformação de coordenadas inversa, isto é, do referencial cartesiano local para o referencial geodésico cartesiano, equação (18), aplica-se a equação (FAZAN, 2007; WOLF e DEWITT, 2000)

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R_3^T(90^\circ + \lambda_0) \cdot R_1^T(90^\circ - \phi_0) \cdot \begin{pmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}, \quad (18)$$

A transformação inversa é obtida (FAZAN, 2007; ANDRADE, 2003):

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin(\lambda_0) & \cos(\lambda_0) & 0 \\ -\cos(\lambda_0) & -\sin(\lambda_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(\phi_0) & \cos(\phi_0) \\ 0 & -\cos(\phi_0) & \sin(\phi_0) \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin(\lambda_0) & -\cos(\lambda_0) & 0 \\ \cos(\lambda_0) & -\sin(\lambda_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(\phi_0) & -\cos(\phi_0) \\ 0 & \cos(\phi_0) & \sin(\phi_0) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}$$

Resultando na equação (19),

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\text{sen}(\lambda_0) & -\text{cos}(\lambda_0) \cdot \text{sen}(\phi_0) & \text{cos}(\lambda_0) \cdot \text{cos}(\phi_0) \\ \text{cos}(\lambda_0) & -\text{sen}(\lambda_0) \cdot \text{sen}(\phi_0) & \text{sen}(\lambda_0) \cdot \text{cos}(\phi_0) \\ 0 & \text{cos}(\phi_0) & \text{sen}(\phi_0) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

A integração das medições GNSS e das medições com estação total é realizada no SGL, e pelas transformações realizadas.

Admitindo duas variáveis aleatórias multidimensionais Y e X , pode-se considerar que elas são relacionadas por um modelo linear na forma da equação (20) (GHILANI e WOLF, 2006; GEMAEL, 1994):

$${}_m Y_1 = {}_m G_n \cdot {}_n X_1 + {}_m C_1 \quad (20)$$

na qual:

G é a matriz dos coeficientes; e C é a matriz dos termos independentes.

A lei de propagação das covariâncias está relacionada com o conhecimento da matriz variância-covariância da variável aleatória Y (Σ_Y), a partir do modelo funcional vinculado a variável aleatória X e sua matriz variância-covariância (Σ_X), definido em (21) (GEMAEL, 1994):

$$\Sigma_Y = G \Sigma_X G^T \quad (21)$$

Quando o modelo funcional não é linear, a lei de propagação é dada pela seguinte expressão (22):

$$\Sigma_Y = D \Sigma_X D^T \quad (22)$$

na qual:

D representa a matriz Jacobiana formada pelas derivadas parciais da função em relação à variável aleatória X , isto é (23):

$$D = \left. \frac{\partial F}{\partial X} \right|_{X^0} = \begin{pmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial y_2}{\partial x_1} & \frac{\partial y_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial y_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial y_m}{\partial x_1} & \frac{\partial y_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial y_m}{\partial x_n} \end{pmatrix}_{X^0} \quad (23)$$

Aplicando-se a lei de propagação das covariâncias, conforme modelo dado pela equação (24), tem-se a matriz variância-covariância ($\Sigma_{(XYZ)G}$) da

transformação de coordenadas geodésicas cartesianas geocêntricas em coordenadas geodésicas cartesianas locais ($\Sigma_{(XYZ)GL}$) (SOUZA, W., 2012):

$$\Sigma_{(XYZ)GL} = D\Sigma_{(XYZ)G}D^T \quad (24)$$

na qual:

$$D = \begin{pmatrix} \frac{\partial X_{GL}}{\partial X_G} & \frac{\partial X_{GL}}{\partial Y_G} & \frac{\partial X_{GL}}{\partial Z_G} \\ \frac{\partial Y_{GL}}{\partial X_G} & \frac{\partial Y_{GL}}{\partial Y_G} & \frac{\partial Y_{GL}}{\partial Z_G} \\ \frac{\partial Z_{GL}}{\partial X_G} & \frac{\partial Z_{GL}}{\partial Y_G} & \frac{\partial Z_{GL}}{\partial Z_G} \end{pmatrix}_{X^o}$$

que resulta, eq. (25)

$$= \begin{pmatrix} -\text{sen}(\lambda) & \cos(\lambda) & 0 \\ -\text{sen}(\phi) \cdot \cos(\lambda) & -\text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\lambda) & \cos(\phi) \\ \cos(\phi) \cdot \cos(\lambda) & \cos(\phi) \cdot \text{sen}(\lambda) & \text{sen}(\phi) \end{pmatrix} \quad (25)$$

2.5.8 Transformações entre o referencial geodésico cartesiano geocêntrico para o referencial topográfico local

A relação do sistema geodésico cartesiano geocêntrico com o Sistema Topográfico Local na mesma escala é definida em (GARNÉS, 1998) (equação (26)):

$$\begin{pmatrix} X_{TL} \\ Y_{TL} \\ Z_{TL} \end{pmatrix} = (R) \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix}, \quad (26)$$

$$\begin{pmatrix} X_{TL} \\ Y_{TL} \\ Z_{TL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\text{sen}(\Lambda_0) & \cos(\Lambda_0) & 0 \\ -\text{sen}(\Phi_0) \cdot \cos(\Lambda_0) & -\text{sen}(\Phi_0) \cdot \text{sen}(\Lambda_0) & \cos(\Phi_0) \\ \cos(\Phi_0) \cdot \cos(\Lambda_0) & \cos(\Phi_0) \cdot \text{sen}(\Lambda_0) & \text{sen}(\Phi_0) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix},$$

na qual:

(X, Y, Z) são as coordenadas de um ponto P no referencial geodésico cartesiano, *(coordenadas geocêntricas do Ponto)*;

(X_{TL}, Y_{TL}, Z_{TL}) são as coordenadas (topográficas planas locais) do ponto correspondente ao ponto P no referencial topográfico local (sistema topográfico local);

(Φ_0, Λ_0) são as coordenadas astronômicas da origem do referencial cartesiano local (sistema astronômico local ou sistema topográfico local);

(X_0, Y_0, Z_0) são as coordenadas geodésicas cartesianas da origem do referencial cartesiano local, calculadas em função das coordenadas geodésicas $(\varphi_0, \lambda_0, h_0)$; (coordenadas geocêntricas do Ponto Origem);

R é a matriz de rotação em torno dos eixos X_G e Z_G , respectivamente, do sistema geodésico cartesiano geocêntrico.

Nota: se a equação (26) for usada, o eixo y terá sentido positivo para norte e a direção é a do meridiano astronômico passante pela origem do sistema topográfico, o eixo x terá orientação positiva para leste.

A propagação de covariâncias é dada em (SOUZA, W., 2012), o procedimento é análogo à propagação das covariâncias na transformação de coordenadas geodésicas cartesianas geocêntricas em coordenadas geodésicas cartesianas locais, exceto pela substituição das coordenadas geodésicas elipsoidais por coordenadas astronômicas (Φ, Λ) .

Logo, a matriz variância-covariância $(\Sigma_{(XYZ)_G})$, da transformação de coordenadas geodésicas cartesianas geocêntricas em coordenadas topográficas planas locais $(\Sigma_{(XYZ)_{TL}})$, resulta em (27) (AGUIAR, CAMARGO e GALO, 2002):

$$\Sigma_{(XYZ)_{TL}} = D \Sigma_{(XYZ)_G} D^T \quad (27)$$

sendo:

$$D = \begin{pmatrix} \frac{\partial X_{TL}}{\partial X_G} & \frac{\partial X_{TL}}{\partial Y_G} & \frac{\partial X_{TL}}{\partial Z_G} \\ \frac{\partial Y_{TL}}{\partial X_G} & \frac{\partial Y_{TL}}{\partial Y_G} & \frac{\partial Y_{TL}}{\partial Z_G} \\ \frac{\partial Z_{TL}}{\partial X_G} & \frac{\partial Z_{TL}}{\partial Y_G} & \frac{\partial Z_{TL}}{\partial Z_G} \end{pmatrix}$$

resultando (na equação (28)):

$$= \begin{pmatrix} -\text{sen}(\Lambda) & \cos(\Lambda) & 0 \\ -\text{sen}(\Phi) \cdot \cos(\Lambda) & -\text{sen}(\Phi) \cdot \text{sen}(\Lambda) & \cos(\Phi) \\ \cos(\Phi) \cdot \cos(\Lambda) & \cos(\Phi) \cdot \text{sen}(\Lambda) & \text{sen}(\Phi) \end{pmatrix} \quad (28)$$

2.6 SISTEMAS DE PROJEÇÃO DERIVADOS DA PROJEÇÃO TRANSVERSA DE MERCATOR

Blachut et al., (1979) apresentam as equações para a transformação de coordenadas Geodésicas para TM (e vice-versa), podendo-se posteriormente converter

as coordenadas do sistema TM para qualquer outro sistema derivado do TM, como o UTM, Gauss-Tardi, Sistema Local Transverso de Mercator (LTM), Sistema Regional Transverso de Mercator (RTM), entre outros.

2.6.1 Os sistemas LTM e RTM

Os sistemas LTM (Local Transverse Mercator) e RTM (Regional Transverse Mercator) são sistemas modificados, baseados no sistema TM. Estes (sistemas LTM e RTM) são sistemas destinados à representação de regiões de modo que as distorções sejam minimizadas, sendo destinados principalmente para escalas cadastrais. Esta redução de distorções pode ser conseguida trabalhando-se com fusos de menor dimensão e com a modificação do fator de escala no meridiano central (GALO, 2006).

O sistema LTM (Local Transverse Mercator) é um sistema derivado da projeção Transversa de Mercator, com as seguintes características básicas (GALO, 2006):

- Fator de escala no meridiano central: $m_0 = 0,999995$;
- Fusos de 1° nas longitudes de meio grau ($30'$);

Pode-se observar que o fator de escala escolhido para o meridiano central corresponde a um erro relativo de $1/200.000$ ($m_0 = 0,999995 = 1 - 1/200.000$), ou seja, uma redução de 5 mm para 1 km.

No sistema RTM (Regional Transverse Mercator) o fator de escala é o mesmo do sistema LTM sendo considerados fusos de 2° com meridianos centrais nas longitudes de grau ímpar.

Como mencionado acima, uma diminuição na amplitude $\Delta\lambda$ do fuso faz com que a distorção seja reduzida nos extremos do fuso (influência conjunta da dimensão do fuso e do fator de escala no meridiano central nas distorções provocadas).

3 INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E MÉTODOS DE LEVANTAMENTOS GEODÉSICOS/ TOPOGRÁFICOS

Nesta dissertação pretende-se empregar os Métodos Terrestres de Medição planialtimétrica com estação total (MTMs) e o método de posicionamento GNSS Relativo Estático, que utiliza para o posicionamento Receptores GNSS de dupla frequência. Também são consideradas neste capítulo as recentes inovações tecnológicas associadas.

3.1 RECEPTORES GNSS: INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS

Os últimos lançamentos incluem receptores de Posicionamento Cinemático em Tempo Real (RTK) que possuem compensação de inclinação baseada em Unidade de Medição Inercial (IMU), esta tecnologia permite que os pontos sejam medidos enquanto a haste de levantamento é inclinada, permitindo que os agrimensores concluem o trabalho mais rapidamente e com maior precisão (Figura 5).

Figura 5 – Receptor de Posicionamento Cinemático em Tempo Real com compensação de inclinação baseada em Unidade de Medição Inercial (IMU).



Fonte: TRIMBLE (2020).

Conforme TRIMBLE (2020), compensar a inclinação do bastão com sistema baseado em IMU permite que o operador diminua sua atenção quanto à calibração. A tecnologia permite aos usuários marcar e medir com precisão pontos em áreas anteriormente inacessíveis para rovers (receptores remotos) GNSS, como cantos de edifícios ou em situações perigosas (GEO WEEK NEWS, 2020b). Os receptores possuem monitoramento automático de integridade do Sistema de Navegação Inercial (INS) em tempo real. Este sistema permite que os usuários detectem e corrijam vieses

IMU introduzidos pelo uso ao longo do tempo, temperatura ou choques físicos, ajudando a garantir a integridade da medição por toda a vida do receptor.

Ainda com relação a esta nova tecnologia para receptores de Posicionamento Cinemático em Tempo Real (RTK), a Compensação de inclinação é baseada em unidade de medição inercial (TRIMBLE, 2020), a mesma é livre de calibração com imunidade a interferência magnética; apresenta fácil obtenção de medições precisas em pontos obstruídos, como cantos de edifícios e propriedades; permite captura de pontos com segurança em locais perigosos, como a borda de uma escavação a céu aberto ou em estradas; permite também o monitoramento de integridade automático integrado, que possibilita total confiança no sistema com detecção de anomalias IMU em tempo real e alertas; não há a necessidade de ajustar repetidamente a posição da ponta do bastão e re-nivelar o receptor ao medir pontos.

Além disso, há a possibilidade de utilizar todas e quaisquer Constelações e sinais GNSS disponíveis, além de tecnologia que permite obter exatidão mesmo em condições adversas de rastreamento de satélites, como densa cobertura vegetal (TRIMBLE, 2020); permanência do receptor RTK com precisão, por até 5 minutos após perda das correções da Base ou da rede NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol)³, permitindo realizar levantamentos com precisão de até 2 cm na horizontal sem a necessidade de bases; e soluções de software que permitem importar/confeccionar projetos em campo, deixando-os prontos ou bem adiantados para término em escritório (HEGER, 2021a).

3.2 POSICIONAMENTO GNSS RELATIVO ESTÁTICO

O posicionamento GNSS (com uso dos Sistemas de Navegação Global por Satélite) conforme Monico (2008); Alves e Prol, (2013) basicamente, pode ter as coordenadas do ponto de interesse determinadas em tempo real ou pós-processadas, além de poder ser realizado na forma absoluta (por ponto), DGPS (*Differential GPS*), relativa e em rede. O GNSS engloba, dentre vários, o GPS (*Global Positioning System*), desenvolvido pelo departamento de defesa americano. Jerez (2017) aborda vários aspectos dos sistemas de posicionamento por satélite GPS e GLONASS (*GLObal NAtigation Satellite System*), este autor também detalha aspectos da integração destes dois sistemas sob efeito de cintilação ionosférica Jerez e Alves (2020), Jerez et al., (2020), Jerez et al., (2019), Jerez e Alves (2019), Jerez e Alves

³ tecnologia para transporte de dados GNSS que utiliza protocolo TCP-IP para enviar, aos receptores GNSS, dados para operar em modo RTK, (tempo real).

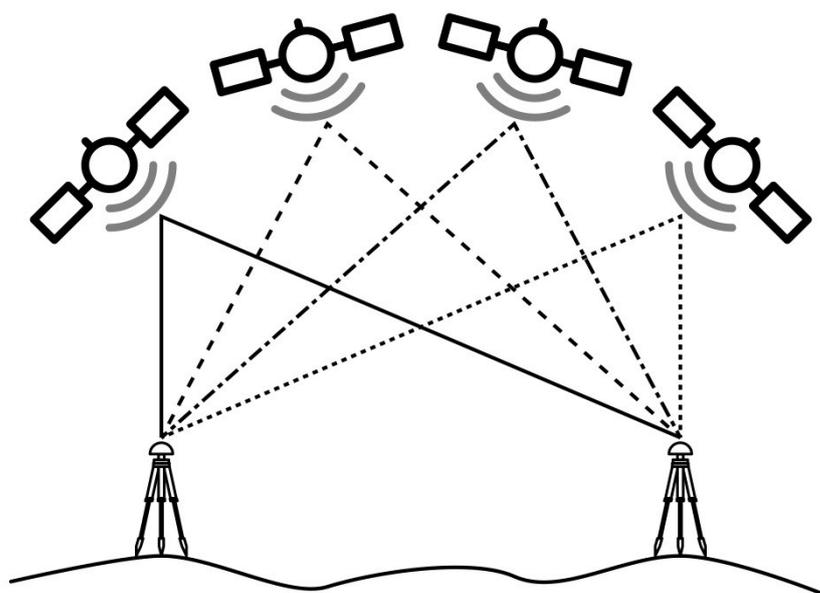
(2015), mais pesquisas sobre a integração GPS e GLONASS consultar Pinto et al., (2013) e Vaz et al., (2013).

Conforme Herring et al., (2020) e Dong et al., (1998) embora os satélites GPS forneçam uma realização/ referência dinâmica natural para a geodésia terrestre, as observações de dupla diferença da fase (ou equivalentemente, a fase indiferenciada com relógios calculados e previstos) não “fixam”/ injuncionam uma estação terrestre à constelação orbital ao nível milimétrico que se exige para estudos científicos. Em vez disto, define-se e realiza-se um sistema de referência preciso por meio da aplicação de injunções à uma ou mais estações da rede.

O posicionamento Relativo pode ser obtido pelo método Estático. O método Estático, geralmente, utiliza a dupla diferença de fase (DD) como observável. Dois ou mais receptores coletam dados simultâneos dos satélites por no mínimo vinte (20) minutos até algumas horas. **Possibilita uma precisão em torno de 1,0 a 0,1 ppm ou melhor que isso.** Para linhas de base extensas (maiores que 15 km) empregam-se receptores com dupla frequência (MONICO, 2008).

O posicionamento GNSS Relativo, emprega dois receptores de GNSS rastreando simultaneamente os mesmos satélites para determinar suas coordenadas relativas (Figura 6). Dos dois receptores, um é selecionado como uma referência, que permanece estacionária em um local com coordenadas conhecidas. O outro receptor, conhecido como receptor remoto, tem suas coordenadas desconhecidas. O receptor remoto pode ou não ser estacionário, dependendo do tipo de operação conforme El-Rabbany (2002). No caso desta pesquisa, considera-se o método estático.

Figura 6 – Representação do Posicionamento Relativo.



Fonte: Autor (2020).

É necessário um mínimo de quatro satélites comuns para o posicionamento relativo. No entanto, rastreando mais de quatro satélites comuns simultaneamente melhora-se a precisão da solução de posição GNSS (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008). Medições de fase de portadora e/ ou pseudo-distância podem ser usadas no posicionamento relativo. Uma variedade de técnicas de posicionamento são usadas para fornecer um pós-processamento (postmission) ou solução em tempo real.

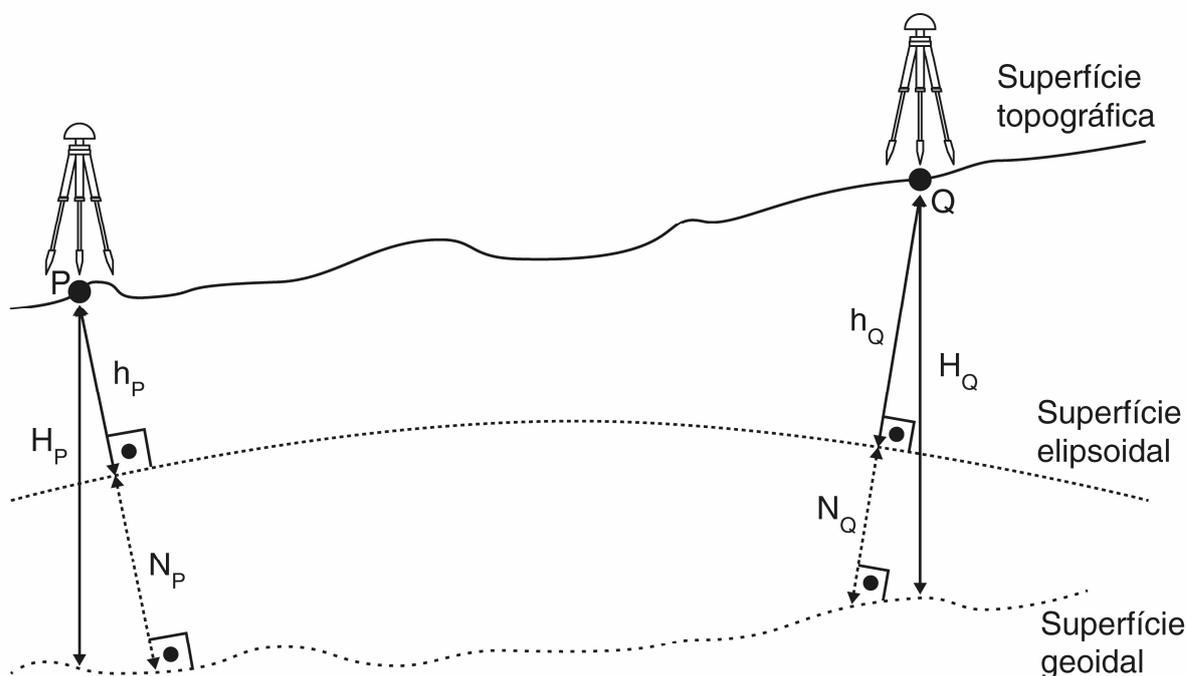
Conforme Langley (1993) as medições de dois (ou mais) receptores rastreando simultaneamente um determinado satélite contêm mais ou menos os mesmos erros e vieses. Quanto menor a distância entre os dois receptores, mais semelhantes são os erros. Portanto, se é obtida a diferença entre as medidas dos dois receptores os erros semelhantes serão removidos ou reduzidos EL-RABBANY (2002).

3.3 NIVELAMENTO COM A TECNOLOGIA GNSS

Silva e Segantine, (2015) considerando também a variação da ondulação geoidal entre dois pontos próximos ser muito pequena; descrevem também o nivelamento com a tecnologia GNSS. Método de cálculo da altitude ortométrica a ser utilizado, seção 4.4.7. Este método permite o cálculo da altitude de um ponto por meio de uma RRNN próxima; sem necessariamente, se ter o conhecimento da ondulação geoidal de qualquer um dos dois pontos. Como visto na figura 7, para este caso acima (áreas onde a variação da ondulação geoidal é pequena, pode-se afirmar que $(N_P \approx$

N_Q)), com isto, é escrita a relação $H_Q - H_P \approx h_Q - h_P$, na qual Q é uma RRNN.

Figura 7 – Nivelamento com a tecnologia GNSS.



Fonte: (SILVA e SEGANTINE, 2015).

Portanto, conforme figura 7 com o conhecimento das altitudes ortométrica e geodésica da RN, p.ex., H_Q e h_Q , é possível relacionar as altitudes ortométricas dos demais pontos da área a serem medidos, H_P ; para isto, é necessário apenas a altitude geodésica (h_P) de cada um destes pontos, $H_Q - H_P \approx h_Q - h_P$. E assim, $H_P \approx -h_Q + h_P + H_Q$. Outra possibilidade de cálculo considera além destes dados, as ondulações geoidais N_P e N_Q para os pontos (P) e (Q) e a relação $H_P \approx [-h_Q + h_P + N_Q - N_P] + H_Q$, o que pode ser obtido via modelo geoidal local (em conjunto com altitudes geodésicas GNSS dos pontos de referência (h)). Para o nivelamento GNSS utiliza-se de modelo (de ondulação geoidal) local⁴.

O sistema de interpolação de ondulação geoidal (SIRGAS2000), MAPGEO2015⁵ em conjunto com altitudes geodésicas GNSS foi utilizado como parâmetro de referência aos pontos determinados pela técnica de Nivelamento Trigonométrico. Este modelo (MAPGEO2015) porém, não apresenta a acurácia

⁴ Para detalhes sobre modelos geoidais locais consultar Lima (2017), Arana (2000), Featherstone, Dentith e Kirby (1998) e Collier e Croft (1997).

⁵ O sistema de interpolação de ondulação geoidal (SIRGAS2000), MAPGEO2015, se utiliza do modelo geopotencial EIGEN-6C4; que é formado por um conjunto de dados oriundos de cinco missões espaciais modernas. Entre estas, o GOCE, primeiro satélite a incorporar o gradiômetro, equipamento que permite a observação do tensor do campo gravitacional através de três pares de acelerômetros em eixos perpendiculares entre si.

necessária para os levantamentos; o que foi obtido via modelo local (Modelo Geoidal Local– Recife (PE)), desenvolvido por Garnés (2017), e dados de Lima (2017) em conjunto com as altitudes geodésicas advindas de GNSS.

Uma aplicação do nivelamento GNSS é dada por Souza e Silveira (2008). Detalhes sobre essa técnica também podem ser consultados nas referências (SÁ et al., 2002; CASTRO, 2002; MONICO e CASTRO, 2000).

3.4 MÉTODOS TERRESTRES DE MEDIÇÃO PLANIALTIMÉTRICA COM ESTAÇÃO TOTAL (MTMS)

Os métodos terrestres de medição planialtimétrica com Estação Total a serem vistos se referem aos métodos da Triangulação; Poligonação; método da Interseção a Vante 2D (por meio da interseção de duas retas e por meio de ângulos azimutais) e método tridimensional, conhecido como Interseção Espacial Analítica; e Nivelamento Trigonométrico com visadas curtas e longas, neste último caso são consideradas visadas longas a partir de 250 m, conforme descrito em Kahmen e Faig (1988). Nas seções a seguir são vistas inovações associadas principalmente às Estações Totais.

3.4.1 Estações Totais Robóticas: Inovações tecnológicas

Estações Totais Robóticas são equipamentos com alta tecnologia capazes de realizar as medições topográficas com alta velocidade e precisão, medindo ângulos verticais, horizontais e distâncias lineares.

As Estações Totais Convencionais necessitam de um operador junto ao equipamento e não permitem a automatização ou programação de medições, este fato pode ser determinante na conclusão de obras que exigem prazos curtos para serem cumpridos (SC GEOTECNOLOGIAS, 2021). Conforme esta referência, comparativamente, Estações Totais Robóticas podem chegar a $\pm 0,5''$ de precisão angular e precisão linear inferiores a $\pm(1\text{mm} + 1\text{ppm}\times D)$ (valor indicado pelo fabricante) para exemplo de cálculo de precisão de distâncias, permitindo realizar o levantamento e monitoramento de projetos com o que há de mais moderno. As mesmas possuem outros recursos, como alta velocidade de escaneamento, ou capacidade de rotacionar automaticamente a Estação para um ponto que se queira local.

Uma Estação Total Robótica permite a realização de algumas tarefas de forma automática, como, por exemplo: procurar/encontrar um prisma, realizar movimentos precisos de centralização da Estação, realizar a leitura e acompanhar o

movimento do prisma, por exemplo, sobre um bastão enquanto o operador de campo se move (SC GEOTECNOLOGIAS, 2021). É possível também realizar uma programação de prismas a serem medidos e a Estação realizar essas leituras de forma automática. Além disso, o operador tem acesso a dados e medidas em tempo real com o suporte e apoio de *softwares* de alta tecnologia; é possível também realizar a medição de um terreno natural, configurando o tempo e/ ou distância para que um ponto seja levantado sem que o operador tenha que ter contato com a Estação.

Uma Estação Total Robótica permite em várias aplicações, que todo trabalho seja realizado por um único operador, ou em alguns casos, de forma totalmente sozinha, com o operador apenas configurando-a, como, por exemplo, em monitoramento de estruturas. Esta permite a independência do operador, a qual permite operar o equipamento remotamente, além disso, maior produtividade com altíssima precisão, conseguindo-se um aumento substancial na produtividade.

Com o uso de uma Estação Total Robótica, conforme SC Geotecnologias (2021), é possível também a realização de locações e verificações em tempo real das mesmas. Outra vantagem com relação à uma Estação Total Convencional é que com o uso de uma Estação Robótica é possível obter imagens com propriedades métricas, com a mesma precisão, se estivesse em campo.

As Estações Totais Robóticas combinam o levantamento, obtenção de imagens e escaneamento 3D de alta velocidade permitindo a flexibilidade de aplicação no monitoramento de barragens, monitoramento de estruturas, mineradoras, inspeção de barragens, entre outros (HEGER, 2021b).

3.4.1.1 Estações Totais Robóticas de Monitoramento de Autoaprendizagem

Estações Totais Robóticas de Monitoramento de Autoaprendizagem permitem automação avançada e melhor desempenho de medição (até 3.000 m), sem a necessidade de fazer ajustes às condições ambientais, as mesmas também aprendem a ignorar alvos falsos com a ajuda de Inteligência Artificial (AI) (GEO WEEK NEWS, 2020a). A medição automática de altura da estação total, travamento automático no alvo, reconhecimento automático de alvos mesmo em condições ambientais difíceis e melhores desempenhos de medição de automação, conforme Geo Week News (2020a) são algumas das inovações e anúncios mais recentes. Há ainda funcionalidades como rastreamento para fins de prevenção de roubo. São Estações para uso contínuo.

3.4.2 Triangulação

Na triangulação, a consistência geométrica se dá pela medição de uma base e das direções dos lados de cada triângulo. Com base nos valores dos ângulos calculados e da base medida, obtêm-se os valores das coordenadas de cada vértice (SILVA e SEGANTINE, 2015).

Este método foi empregado para definição de Campo de Pontos-Objeto. Para a redundância de observações, nesta pesquisa os Pontos-Objeto foram levantados duplamente e triplamente.

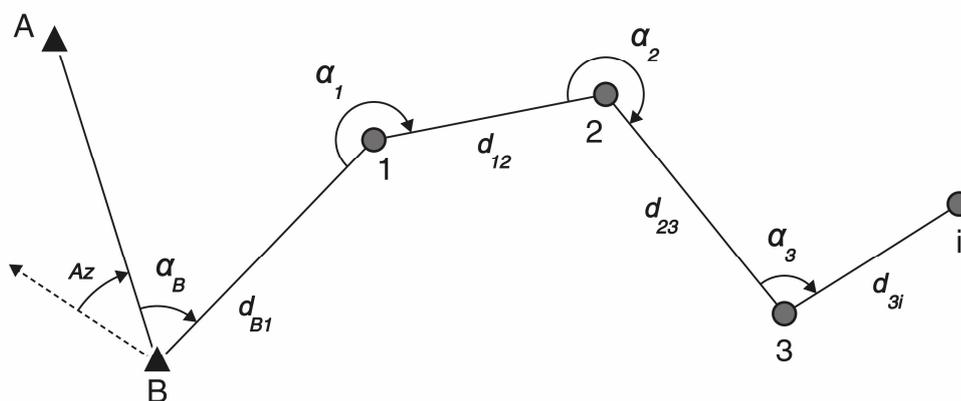
3.4.3 Poligonação

A poligonação, conforme Silva e Segantine, (2015) é o procedimento de campo que consiste em partir de pontos da rede geodésica oficial ou determinados por medições com a tecnologia GNSS e realizar um caminhamento sobre o terreno, realizando um transporte de coordenadas. A partir do encadeamento de medições angulares e lineares são calculadas as coordenadas dos novos pontos de apoio.

Ainda conforme estes autores, os ângulos α_i são calculados em função das diferenças de direções a vante e a ré e as distâncias (d_{PiPj}) podem ser planas ou horizontais dependendo do plano (ou sistema) de projeção considerado (plano UTM ou plano topográfico); este último, cf. ABNT NBR 13133 (2021) página 9, é denominado Sistema de Projeção Topográfica, ou Sistema Topográfico Local, ou ainda, Sistema de Projeção Plano Horizontal. Neste trabalho, as distâncias utilizadas nas formulações matemáticas (Interseção Espacial Analítica) são distâncias horizontais topográficas.

Uma poligonal é considerada geometricamente aberta quando ela parte de um ponto conhecido e chega a outro ponto distinto (SILVA, SEGANTINE, 2015), conforme indicado na Figura 8 a seguir

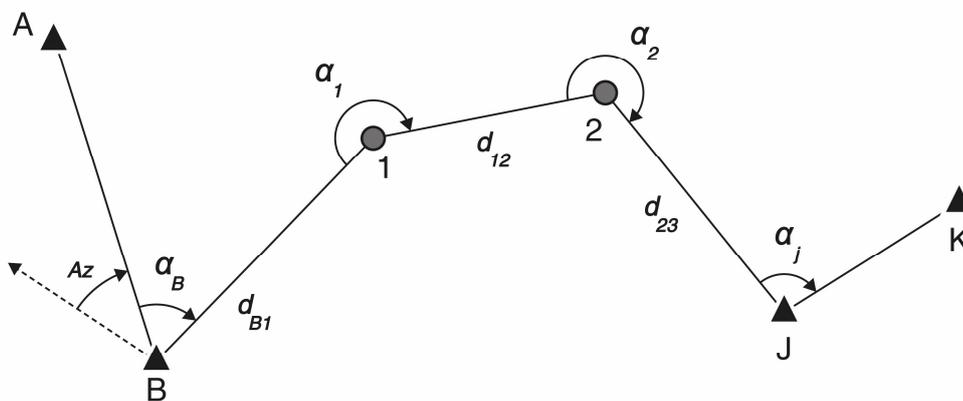
Figura 8 – Relações geométricas da poligonal geometricamente aberta.



Fonte: (SILVA, SEGANTINE, 2015).

Se a poligonal partir de dois pontos de coordenadas conhecidas (base topográfica) georreferenciados ou adotados e fechar sobre outra base topográfica do mesmo tipo, diz-se que ela é topograficamente apoiada (ou enquadrada), conforme indicado na Figura 9. Neste tipo de poligonal os erros sistemáticos de medição de distâncias e de orientação são claramente revelados pelo vetor de erro (SILVA, SEGANTINE, 2015).

Figura 9 – Relações geométricas da poligonal topograficamente apoiada.



Fonte: (SILVA, SEGANTINE, 2015).

Uma poligonal é considerada geometricamente fechada quando ela inicia em ponto de coordenadas conhecidas ou adotadas e termina sobre o mesmo ponto. Se o projeto exigir que os pontos de apoio a serem determinados estejam baseados na rede geodésica nacional ou em uma outra rede de pontos de apoio topográfico previamente estabelecida, o ponto inicial deve ser um ponto de coordenadas

conhecidas com orientação determinada, ou seja, deve haver dois pontos disponíveis para o início do levantamento (SILVA, SEGANTINE, 2015).

Calado et al., (2016) abordam o cálculo de uma poligonal enquadrada considerando o método dos Mínimos Quadrados, uma discussão detalhada é trazida pelos autores; são realizadas considerações com uso do modelo paramétrico e do modelo das equações de condição.

3.4.4 Método da Interseção a Vante 2D e Interseção Espacial Analítica

Um dos MTM aqui citados é a Interseção a Vante, que consiste, em visar o ponto a determinar a partir de pelo menos dois pontos de coordenadas conhecidas observando-se apenas direções⁶. Tem-se ainda o método de Interseção Espacial Analítica, que conforme Silva e Segantine (2015), assim como o anterior, é baseado na medição de direções horizontais, com a diferença de que este método também se utiliza de ângulos verticais entre duas estações de referência e o ponto medido.

a) Interseção a Vante por meio dos ângulos horizontais:

Silva e Segantine (2015) trazem para o cálculo da Interseção a Vante uma solução que é dada analiticamente pela interseção de duas retas. Esta forma de cálculo também é vista em Kahmen e Faig (1988). Desta forma, as coordenadas do ponto P são calculadas pelas equações (29) e (30) ou (31) e (32), indicadas a seguir:

Se, $|\text{tgAzBP}| < |\text{tgAzAP}|$

$$Y_P = Y_A + (1/(\text{tgAzAP} - \text{tgAzBP})) * ((X_B - X_A) - (Y_B - Y_A) * \text{tgAzBP}) \quad (29)$$

$$X_P = X_B + (Y_P - Y_B) * \text{tgAzBP} \quad (30)$$

Se, $|\text{tgAzAP}| < |\text{tgAzBP}|$

$$Y_P = Y_B + (1/(\text{tgAzBP} - \text{tgAzAP})) * ((X_A - X_B) - (Y_A - Y_B) * \text{tgAzAP}) \quad (31)$$

$$X_P = X_A + (Y_P - Y_A) * \text{tgAzAP} \quad (32)$$

b) Interseção a Vante por meio dos ângulos azimutais:

Este método é descrito em detalhes em Häbler e Wachsmuth (1984) e Gruber e Joeckel (2011). Neste caso, é necessário que existam vértices conhecidos no entorno da área, os mesmos são necessários para que possam ser determinados os ângulos de orientação (ângulos azimutais) (GRUBER e JOECKEL 2011).

Os ângulos azimutais são calculados através das coordenadas dos vértices e

⁶ podendo, ser expandido para mais vértices.

medidas das direções.

As coordenadas aproximadas x_n e y_n do ponto N são calculadas conforme a formulação matemática (HÄBLER e WACHSMUTH, 1984) dadas pelas equações (33) e (34):

$$x_n = \frac{x_2 \cdot \tan \alpha_2 + x_1 \cdot \tan \alpha_1 + \Delta y \cdot \tan \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2}{\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2} \quad e \quad (33)$$

$$y_n = \frac{y_2 \cdot \tan \alpha_2 + y_1 \cdot \tan \alpha_1 - \Delta x \cdot \tan \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2}{\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2} \quad (34)$$

na qual,

x_n e y_n são as coordenadas aproximadas do ponto N;

α (1 e 2) são os ângulos internos e;

Δx e Δy são as diferenças de coordenadas dos pontos de referência 1 e 2.

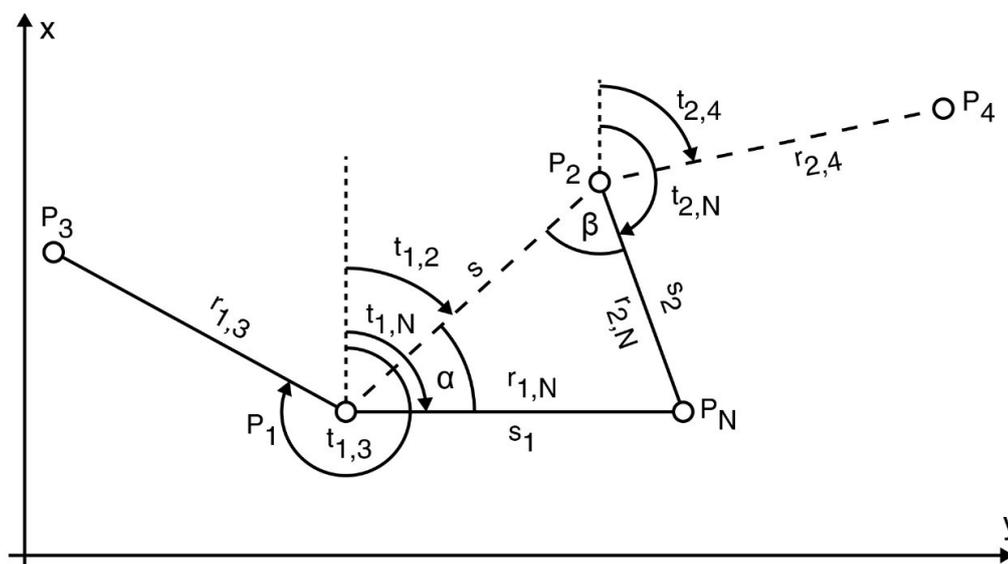
As coordenadas precisas do ponto N podem ser obtidas a partir de várias direções com base nos pontos fixos, com coordenadas determinadas a este ponto (N), aplicando o ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (KAHMEN e FAIG, 1988; SILVA e SEGANTINE, 2015; GHILANI, WOLF, 2006). Mais detalhes são vistos na seção 3.4.4.1.

No primeiro caso, letra (a), ângulos horizontais citado acima, a Interseção a Vante 2D ocorre por meio da medição de ângulos (horizontais) internos α e β (Figura 10) pertencentes ao triângulo formado entre os vértices de coordenadas conhecidas P1 e P2 e desconhecidas PN (GRUBER e JOECKEL, 2011). Neste caso os vértices de coordenadas conhecidas P1 e P2 são intervisíveis entre si. No segundo a Interseção a Vante ocorre por meio da medição de ângulos direcionais (Figura 9), neste caso os vértices de coordenadas conhecidas P1 e P2 não são intervisíveis entre si.

Ainda segundo Gruber e Joeckel (2011), no caso da Interseção a Vante por meio dos ângulos horizontais são dadas as coordenadas dos vértices $P_1(y_1, x_1)$ e $P_2(y_2, x_2)$ como ilustrado na Figura 10 e medidas as direções $r_{1,N}$, $r_{1,2}$, $r_{2,N}$, $r_{2,1}$.

Calcula-se o Azimute $t_{1,2}$ e distâncias a partir das coordenadas desses vértices. A partir das direções horizontais medidas com a Estação Total, obtêm-se os ângulos α e β

Figura 10 – Interseção a vante por meio dos ângulos direcionais



Fonte: GRUBER e JOECKEL (2011).

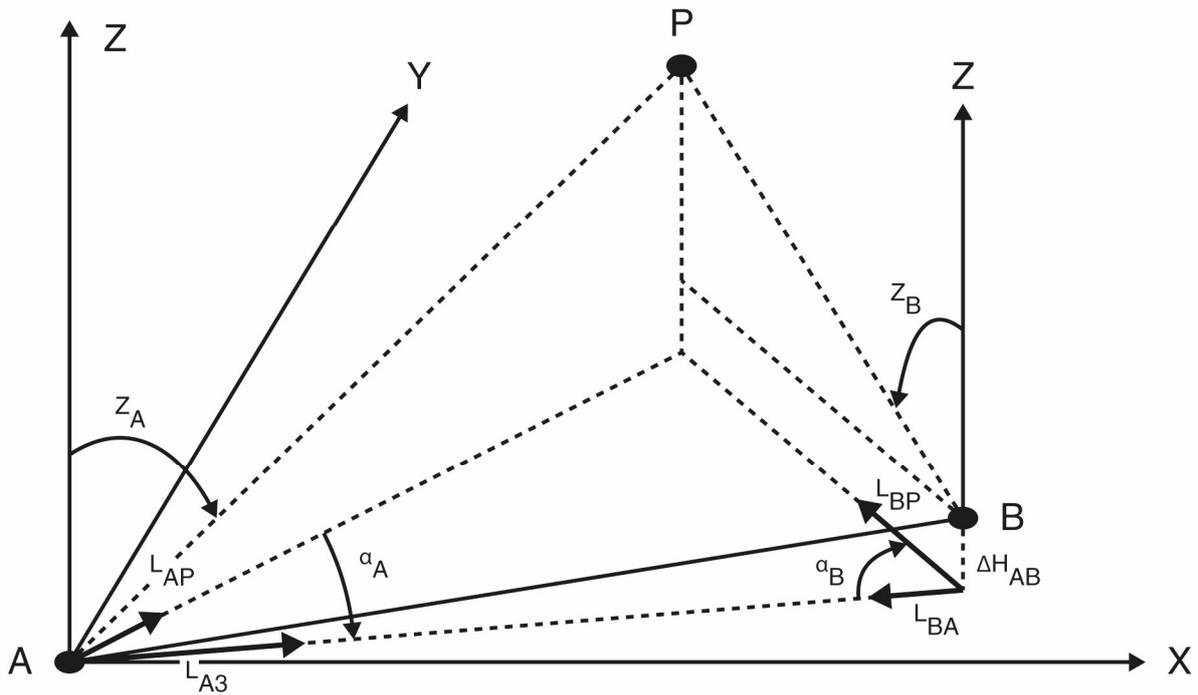
No caso da interseção a vante por meio de ângulos azimutais os vértices P1 e P2 não são intervisíveis entre si, sendo assim é necessário que existam vértices conhecidos no entorno dos vértices P1 e P2, na Figura 10 representados por P3 e P4, para que possam ser determinados os ângulos de orientação (ângulos azimutais) (GRUBER e JOECKEL, 2011).

c) Método da Interseção Espacial Analítica

Dá-se o nome de método de Interseção Espacial Analítica, ao método de determinação de coordenadas espaciais baseado na medição de direções horizontais e ângulos verticais entre duas estações de referência e o ponto a ser medido (SILVA e SEGANTINE, 2015). Neste método, as linhas de visadas são consideradas vetores espaciais que partem das estações de referência, em direção ao ponto a ser calculado. Nenhuma distância é medida (Figura 11).

Ainda segundo estes autores, o procedimento de campo consiste em utilizar duas estações totais, a partir das quais se medem as direções e os ângulos verticais. A determinação das coordenadas espaciais se faz por meio da solução de um sistema de equações estabelecidas em função dos cossenos diretores, determinados pelas linhas de visadas (Figura 12). Uma aplicação deste método é exemplificada em (GOMES, MENDONÇA, SEIXAS, 2021). Mais detalhes também podem ser vistos em Seixas et al., (2003).

Figura 11 – Relações geométricas do método de Interseção Espacial Analítica



Fonte: (SILVA, SEGANTINE, 2015).

Dados:

Ponto (A): $A:(x_A, y_A, H_A)$

Ponto (B): $B:(x_B, y_B, H_B)$

Medidos:

$L_{AP}, L_{AB}, L_{BA}, L_{BP}, \Delta H_{AB}, Z_A, Z_B$

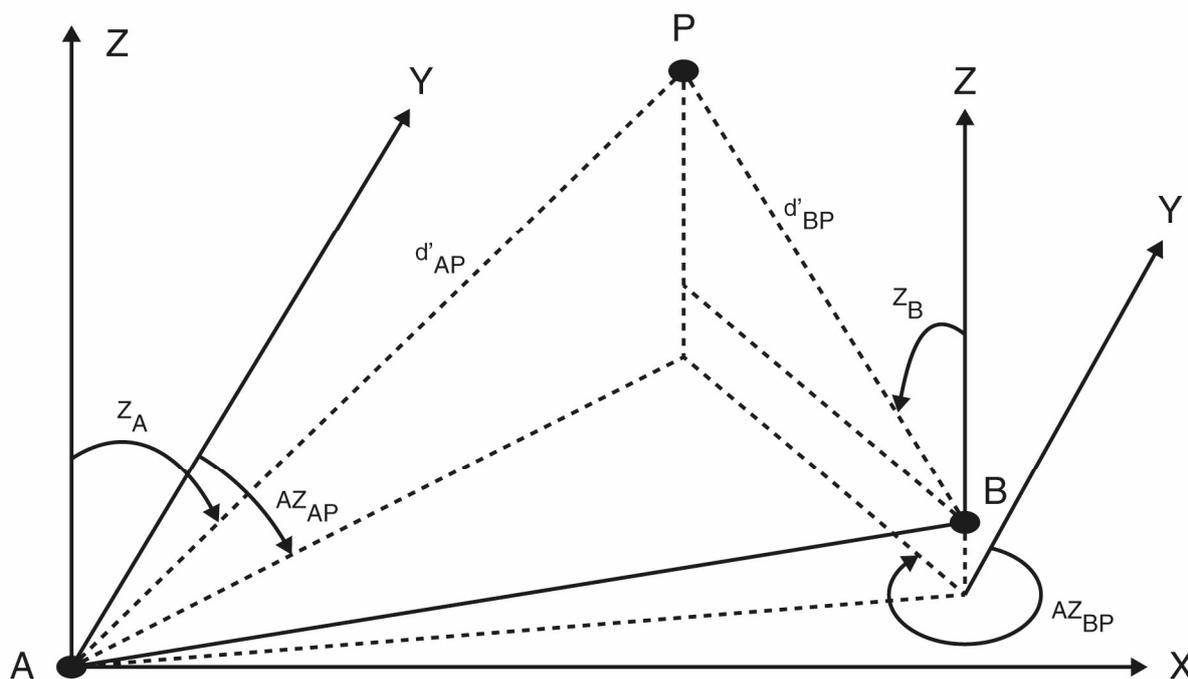
$\alpha_A = L_{AB} - L_{AP}$

$\alpha_B = L_{BP} - L_{BA}$

Calcular:

Coordenadas de (P): $P(x_P, y_P, H_P)$

Figura 12 – Coordenadas espaciais do alvo P em função dos ângulos diretores.



Fonte: (SILVA, SEGANTINE, 2015).

Sendo:

d'_{AP} e d'_{BP} : distâncias inclinadas entre as estações de referência (A) e (B) e o ponto (P), respectivamente;

AZ_{AP} e AZ_{BP} : azimute do alinhamento AP e azimute do alinhamento BP; entre os pontos A e P e B e P, respectivamente.

Para a solução do problema é necessário calcular as distâncias inclinadas d'_{AP} e d'_{BP} .

Para simplificação dos cálculos considera-se as equações (35) a (37) (SILVA e SEGANTINE, 2015):

$$k_i = \text{sen}(z_i) * \text{sen}(Az_{iP}) \quad (35)$$

$$m_i = \text{sen}(z_i) * \text{cos}(Az_{iP}) \quad (36)$$

$$n_i = \text{cos}(z_i) \quad (37)$$

Obtém-se assim as equações para o cálculo das coordenadas do ponto (P) a partir das estações de referência (A) e (B) (equações de 38 a 43).

$$x_{P(A)} = x_A + (k_A * d'_{AP}) \quad (38)$$

$$y_{P(A)} = y_A + (m_A * d'_{AP}) \quad (39)$$

$$H_{P(A)} = H_A + (n_A * d'_{AP}) \quad (40)$$

$$x_{P(B)} = x_B + (k_B * d'_{BP}) \quad (41)$$

$$y_{P(B)} = y_B + (m_B * d'_{BP}) \quad (42)$$

$$H_{P(B)} = H_B + (n_B * d'_{BP}) \quad (43)$$

x_{Pi} , y_{Pi} , H_{Pi} = coordenadas do ponto (P) calculadas a partir da estação de referências (i).

Igualando os termos (X, Y, H) das equações acima, tem-se três equações e duas incógnitas, que são as distâncias (d'_{AP}) e (d'_{BP}). A solução para o problema é obtida aplicando-se um método de ajustamento pelo MMQ. Assim, considerando que as distâncias entre os pares de coordenadas deve ser mínima, pode-se escrever o sistema de equações de erros indicados a seguir (equações 44 a 46):

$$v_1 = (d'_{AP} * k_A) - (d'_{BP} * k_B) - (x_B - x_A) \quad (44)$$

$$v_2 = (d'_{AP} * m_A) - (d'_{BP} * m_B) - (y_B - y_A) \quad (45)$$

$$v_3 = (d'_{AP} * n_A) - (d'_{BP} * n_B) - (H_B - H_A) \quad (46)$$

Sendo,

v_1, v_2, v_3 = erros residuais.

Em forma de matriz, tem-se (47):

$$V = Ax - l \quad (47)$$

Sendo:

$$V = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} k_A - k_B \\ m_A - m_B \\ n_A - n_B \end{pmatrix} \quad x = \begin{pmatrix} d'_{AP} \\ d'_{BP} \end{pmatrix} \quad l = \begin{pmatrix} x_B - x_A \\ y_B - y_A \\ H_B - H_A \end{pmatrix}$$

Aplicando-se o método de ajustamento paramétrico de observações, a solução do sistema de equações é obtida conforme indicado a seguir, (48) e (49):

$$A^T Ax - A^T l = 0 \quad (48)$$

$$x = (A^T A)^{-1} (A^T l) \quad (49)$$

De onde se obtém o vetor, ou seja, os valores das incógnitas (d'_{AP}) e (d'_{BP}), os quais podem ser substituídos nas equações (38) a (43) para calcular as coordenadas do ponto (P). Mais detalhes sobre este método de determinação de coordenadas tridimensionais, conhecido também como “método das distâncias mínimas”, podem ser vistos em Martins (2013).

3.4.4.1 Ajustamento e Controle de Qualidade do Método da Interseção a Vante 2D

Este item é referenciado em (SOUZA, 2012; GEMAEL, 1994; DALMOLIN, 2002; ROMÃO, 2009; KAHMEN e FAIG, 1988). Neste item, (3.4.4.1), serão abordados o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) com o uso do método paramétrico, bem como sua sequência de cálculo e acurácia.

a. Introdução

Modelo de ajustamento pelo Método Paramétrico

O ajustamento das observações é realizado pelo modelo paramétrico, também conhecido como modelo das equações de observação, quando os valores observados ajustados podem ser escritos como função explícita dos parâmetros ajustados, isto é, quando se verifica o modelo matemático, descrito na equação (50).

Equações de Observação

O modelo matemático do método paramétrico é dado por (GEMAEL, 1994) pelas equações descritas a seguir:

$$L_a = F(X_a) \quad (50)$$

O vetor dos valores observados ajustados L_a vem da soma do vetor dos valores observados L_b com o vetor dos resíduos V e é expresso da seguinte forma (51):

$$L_a = L_b + V \quad (51)$$

na qual:

L_b : Vetor dos valores observados;

V : Vetor dos resíduos;

L_a : Vetor dos valores observados ajustados.

O vetor correção é dado por (52):

$$X_a = X_0 + X \quad (52)$$

na qual,

X_0 : Vetor de parâmetros aproximados;

X: Vetor correção;

X_a : Vetor dos parâmetros ajustados.

A partir do valor estimado para o parâmetro X_0 obtêm-se, respectivamente, as estimativas das observações ajustadas L_a e resíduos V . O valor ajustado das observações é dado pela equação (51).

Seja $L_a = F(X_a)$, substituindo o primeiro membro pela equação (51) e linearizando o segundo com a fórmula de TAYLOR, obtêm-se (53):

$$L_b + V = F(X_0 + X) \approx F(X_0) + \left. \frac{\delta F}{\delta X_a} \right|_{X_a=X_0} (X) = 0 \quad (53)$$

Designando a função dos parâmetros aproximados por L_0 , equação (54):

$$L_0 = F(X_0), \quad (54)$$

e a matriz das derivadas parciais por A , eq. (55):

$$A = \left. \frac{\delta F}{\delta X_a} \right|_{X_0} \quad (55)$$

a equação $L_b + V = F(X_0 + X) \approx F(X_0) + \left. \frac{\delta F}{\delta X_a} \right|_{X_a=X_0} (X) = 0$ é escrita sucessivamente por:

$$L_b + V = L_0 + AX;$$

$$V = AX + L_0 - L_b$$

e, finalmente, fazendo:

$$L = L_0 - L_b \quad (56)$$

é obtido o modelo matemático linearizado dos métodos dos parâmetros (57):

$${}_n V_1 = {}_n A_u \cdot {}_u X_1 + {}_n L_1 \quad (57)$$

Os detalhes do desenvolvimento matemático do modelo paramétrico, desde a sua linearização até a forma quadrática minimizada podem ser encontradas na literatura específica, p.ex., Gemael (1994); Dalmolin (2002).

Os elementos da matriz A são formados pela derivada da equação de observação em relação aos parâmetros. Após a minimização na forma quadrática fundamental $V^T P V$ que caracteriza o Método dos Mínimos Quadrados e com algumas manipulações algébricas, obtêm-se a solução do sistema de equações normais

GEMAEL (1994). As equações normais evidenciam a importância da matriz dos pesos P no processo de ajustamento.

A relação entre parâmetros e observações deve existir de modo que os ângulos horizontais possam ser ajustados pelo modelo paramétrico do MMQ. Este modelo é utilizado para estimar valores que se encontram vinculados às observações (GEMAEL, 1994).

Matriz Variância-Covariância

Para Gemael (1994), antes do ajustamento se necessita estimar a precisão das medidas efetuadas para compor a matriz das covariâncias dos valores observados $\sum L_b$ e a partir da variância de unidade de peso a priori σ_0^2 (equação 58).

$$P = \sigma_0^2 (\sum L_b)^{-1} \quad (58)$$

Considerando-se que as observações são não correlacionadas para uma Interseção a Vante, a matriz P é uma matriz diagonal, sendo os elementos da diagonal principal calculado pelo inverso do quadrado da precisão dos alinhamentos formados. Apresenta-se a seguir a matriz dos pesos (equação 59).

$$P = \sigma_0^2 \begin{pmatrix} 1 / \sigma_1^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 / \sigma_n^2 \end{pmatrix} \quad (59)$$

A Matriz das covariâncias $\sum X_a$ do vetor dos parâmetros ajustados A se obtém multiplicando a variância a priori σ_0^2 pelo inverso da matriz N, dada por, $A^T P A$, quando esta admitir a inversa ordinária, e se escreve (60):

$$\sum X_a = \sigma_0^2 (A^T P A)^{-1} \quad (60)$$

A Variância da Observação de Peso Unitário a Posteriori é dada pela equação (61):

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{(V^T P V)}{n-u} \quad (61)$$

No método paramétrico de ajustamento das observações mede-se e estima-se (L, $\sum L$) e a partir destes estima-se (X, $\sum X$), que representam os parâmetros e sua variância.

Para obter medidas de qualidade dos resultados da estimativa de mínimos quadrados, uma descrição qualitativa dos dados de entrada deve fazer parte

do modelo. Tal descrição é de natureza probabilística, haja vista que as medidas, quando repetidas, sob circunstâncias similares podem ser descritas com boa aproximação, por uma variável aleatória (MONICO, 2008).

b. Sequência de Cálculos para o Ajustamento Paramétrico

Conhecidas as coordenadas de 2 (dois) vértices P1 e P2 e realizadas as medições angulares e lineares para a determinação por Interseção a Vante PN a partir do modelo paramétrico do Método dos Mínimos Quadrados. Deseja-se calcular as coordenadas ajustadas do vértice PN bem como a qualidade dessas coordenadas, das observações ajustadas e dos resíduos.

Considerando a precisão linear da Estação Total utilizada nesta dissertação $\pm(5\text{mm} + 5\text{ppm})$ e a precisão angular de $\pm 5''$ e as observações realizadas em campo, emprega-se a seguinte sequência de cálculo para o ajustamento:

1. Cálculo dos parâmetros aproximados e definição das equações de observação

As coordenadas aproximadas do vértice PN são calculadas a partir das equações descritas no item Interseção a Vante 2D por meio dos ângulos horizontais, conforme Silva e Segantine, (2015); Kahmen e Faig, (1988). As equações de observação são dadas por (62):

$$\begin{aligned} D_1^0 &= ((X_{N0} - X_1)^2 + (Y_{N0} - Y_1)^2)^{1/2} \\ D_2^0 &= ((X_{N0} - X_2)^2 + (Y_{N0} - Y_2)^2)^{1/2} \\ \alpha &= \arctg\left(\frac{Y_{N0} - Y_1}{X_{N0} - X_1}\right) - \arctg\left(\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}\right) \\ \beta &= \arctg\left(\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}\right) - \arctg\left(\frac{Y_{N0} - Y_2}{X_{N0} - X_2}\right) \end{aligned} \quad (62)$$

2. Linearização das Equações de Observação, dada pela equação (57)

$$AX + L = V \quad (57)$$

a) Cálculo da Matriz L, dada pela equação (56)

$$L = L_0 - L_b \quad (56)$$

L_b : Vetor das observações;

L_0 : Vetor das observações calculadas a partir de valores aproximados dos parâmetros.

b) Cálculo da Matriz A (coeficiente das incógnitas), equação (55)

$$a_{11} = \frac{X_2 - X_{N0}}{D_2^0} \quad (55)$$

$$a_{12} = \frac{Y_2 - Y_{N0}}{D_2^0}$$

$$a_{21} = \frac{X_1 - X_{N0}}{D_1^0}$$

$$a_{22} = \frac{Y_1 - Y_{N0}}{D_1^0}$$

$$a_{31} = \frac{Y_{N0} - Y_2}{(D_2^0)^2} \cdot 180/\pi$$

$$a_{32} = \frac{X_{N0} - X_2}{(D_2^0)^2} \cdot 180/\pi$$

$$a_{41} = \frac{Y_{N0} - Y_1}{(D_1^0)^2} \cdot 180/\pi$$

$$a_{42} = \frac{X_{N0} - X_1}{(D_1^0)^2} \cdot 180/\pi$$

Da matriz A calcula-se sua matriz transposta A^T .

3. Aplicação do MMQ e formação das equações normais

a) Cálculo da matriz de peso, equação (59)

$$P = Q^{-1} = \sigma_0^2 (\sum L_b^{-1}) \quad (59)$$

na qual $\sigma_0^2 = 1$ e representa a variância a priori

Considerando que as observações são não correlacionadas a matriz P é uma matriz diagonal, sendo os elementos da diagonal principal calculados pelo inverso do quadrado da precisão dos alinhamentos formados.

b) Cálculo de N^{-1} , equação (63) abaixo

$$N^{-1} = (A^T P A)^{-1} \quad (63)$$

c) Cálculo de $A^T P L$, (64)

$$A^T P L$$

(64)

d) Cálculo das equações normais, equação (65) abaixo

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (65)$$

4. Estimação do vetor dos parâmetros corrigidos (X_a), equação (52)

$$X_a = X_0 + X \quad (52)$$

Unidade em metros (m).

Assim, determina-se as coordenadas ajustadas do vértice PN.

5. Cálculo dos resíduos (V), equação (57)

$$V = AX + L \quad (57)$$

Unidade em metros (m).

6. Cálculo das observações ajustadas (L_a), equação (51)

$$L_a = L_b + V \quad (51)$$

Unidade em metros (m).

7. Cálculo da variância da observação de peso unitário (a posteriori), equação (61)

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{(V^T P V)}{n-u} \quad (61)$$

n: número de observações;

u: número de incógnitas.

8. Teste de qualidade do ajustamento

Utilizando-se a distribuição Qui-Quadrado (χ^2) com n-u graus de liberdade e nível de confiança de 95% compara-se o valor da tabela da distribuição Qui-Quadrado com o valor calculado, que é dado por (66):

$$\chi = \hat{\sigma}_0^2(n - u) / \sigma_0^2 \quad (66)$$

Se o valor calculado χ for menor que o valor extraído da tabela da distribuição Qui-Quadrado o teste é aceito.

9. Cálculo da matriz Variância-Covariância dos parâmetros ajustados (60)

$$\Sigma X_a = \Sigma X = \hat{\sigma}_0^2 \cdot N^{-1}$$

Unidade em metros quadrados (m²).

10. Cálculo da matriz Variância-Covariância das observações ajustadas, equação (67)

$$\Sigma L_a = A \Sigma X A^T \quad (67)$$

Unidade em metros quadrados (m²).

11. Cálculo da matriz Variância-Covariância dos resíduos

a) Matriz Variância – Covariância das observações, equação (68)

$$\Sigma L_b = \hat{\sigma}_0^2 \cdot P^{-1} \quad (68)$$

b) Matriz Variância – Covariância dos resíduos, equação (69)

$$\Sigma V = \Sigma L_b - \Sigma L_a \quad (69)$$

Unidade em metros quadrados (m²).

3.4.4.2 Acurácia da Interseção

Esta seção expressa uma outra forma de análise para o cálculo do desvio-padrão de uma interseção, descrita em Kahmen e Faig (1988).

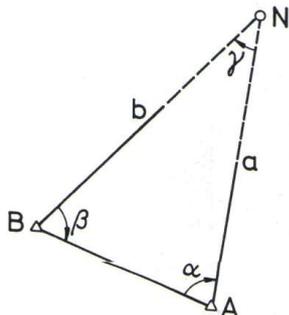
Acurácia refere-se ao grau de aproximação de uma estimativa do seu valor considerado verdadeiro, e está relacionada com os efeitos aleatórios e sistemáticos. Precisão expressa o grau de aproximação da observação com sua média, e está associada apenas com efeitos aleatórios. Normalmente os parâmetros utilizados para estimar a acurácia e a precisão são, respectivamente, o Erro Médio Quadrático (EMQ) e o Desvio-Padrão (DP).

Supondo que as observações estejam eivadas somente de erros aleatórios, o EMQ deverá ser igual ao DP (MONICO et al., 2009). Desde que o valor verdadeiro é uma grandeza que nunca pode ser determinada, teoricamente a acurácia é inacessível. No entanto, **em Geodésia, normalmente, adota-se um valor de referência como sendo verdadeiro (TEUNISSEN, 2000).**

A acurácia é dependente do ângulo de interseção γ Figura 13.

O desvio-padrão da posição do ponto é utilizado para expressar a qualidade de sua determinação.

Figura 13 – Interseção a Vante por meio dos ângulos horizontais α e β .



Fonte: (KAHMEN e FAIG, 1988).

O desvio-padrão de um ponto N pode ser calculado pela equação 70 (KAHMEN e FAIG, 1988):

$$s_N = \frac{1}{\text{sen}\gamma} \cdot \sqrt{a^2 + b^2} \cdot s_{r_0} \quad (70)$$

na qual,

a e b são os lados do triângulo;

γ é o ângulo formado dos pontos A e B para o ponto N;

s_{r_0} é igual ao desvio-padrão dos ângulos α e β .

O melhor valor para γ é aproximadamente 109° (ocorre quando existe um ordenamento de medição simétrico). Neste caso, para $\gamma = 109^\circ$ σ_N assume um valor mínimo. Para $\gamma = 0^\circ$ ou 180° o problema é indeterminado (KAHMEN e FAIG, 1988).

É assumido neste caso que o desvio-padrão é o mesmo dos ângulos internos, e que as coordenadas dos pontos fixos estão livres de erro.

3.4.5 Nivelamento Trigonométrico

Esta seção é relacionada à seção 2.3.

O cálculo de altitude ortométrica é realizado através do transporte de coordenadas, método de nivelamento geométrico de altíssima precisão; ou ainda, com as medidas GNSS efetuadas sobre RRNN (Referências de Nível). No entanto, nesta dissertação realiza-se o cálculo das altitudes com o transporte de coordenadas através do nivelamento trigonométrico. Neste caso, as altitudes ortométricas a serem determinadas não se referem à RRNN da Rede Altimétrica Fundamental do Brasil (RAFB) e, portanto, as medidas GNSS não são sobre pontos desta rede.

O nivelamento trigonométrico é um método de determinação da diferença de altitudes entre pontos a partir da medição da distância inclinada ou horizontal (ou determinação destas) e do ângulo vertical zenital ou vertical de altura entre eles (SILVA

e SEGANTINE, 2015). O qual se utiliza da tecnologia da estação total para a determinação de altitudes em pontos situados em locais altos e inacessíveis nas estruturas arquitetônicas, como por exemplo, alvos em estrutura de edificação e para a realização de uma estrutura geodésica.

Detalhes sobre Nivelamento Trigonométrico podem ser vistos em Ghilani e Wolf (2013), Kahmen e Faig (1988).

A diferença na elevação (ou diferença de nível) entre dois pontos pode ser determinada ao se medir (1) a distância inclinada ou horizontal entre eles e (2) o ângulo vertical zenital ou ângulo vertical de altura de um ponto até outro. (O primeiro tem o zênite como referência inicial e o segundo tem o plano horizontal como referência podendo medir para cima ou para baixo deste plano).

Kahmen (2005), Kahmen e Faig, (1988) definem linhas curtas para o nivelamento trigonométrico (linhas de até cerca de 250 m de comprimento). Os efeitos da não consideração da curvatura da Terra e refração atmosférica, apesar de serem considerados desprezíveis em grande parte de atividades práticas do dia a dia; não podem ser completamente ignorados. Enfatiza-se, desse modo, a precisão de instrumental utilizado e tolerâncias altimétricas a serem alcançadas.

Ainda com relação a este tema, os efeitos combinados da curvatura e da refração não compensados podem resultar em determinações errôneas na elevação (GHILANI e WOLF, 2013). Assim, conforme Ghilani e Wolf (2013), exceto pela soma da correção pela curvatura e pela refração, visadas longas e curtas podem ser tratadas da mesma forma nos cálculos de nivelamento trigonométrico. É claro que, quando as linhas se tornam extremamente longas, essa suposição não é mantida. Porém, para comprimentos dentro de um alcance prático, os erros causados por essa suposição são insignificantes.

Nesse procedimento, que é especialmente conveniente se for usada uma estação total, o instrumento é colocado em um local em que fica aproximadamente equidistante entre um ponto com elevação conhecida (referência de nível) e aquele cuja elevação deve ser determinada. A distância de desnível e o ângulo vertical zenital (ou vertical de altura) são medidos em cada ponto (GHILANI e WOLF, 2013).

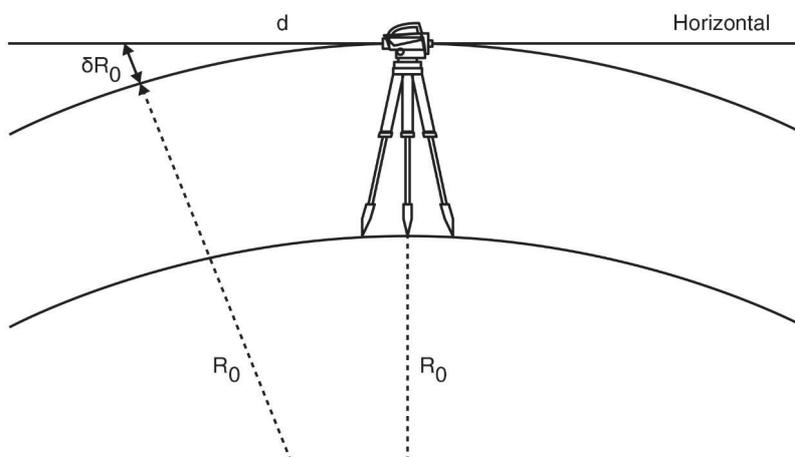
3.4.5.1 Erro Devido à Influência da Curvatura Terrestre

Silva e Segantine (2015) demonstram as formulações necessárias às correções devido aos efeitos da curvatura terrestre e erro devido à influência da

refração no raio de visada; estas demonstrações são importantes para as formulações utilizadas nos nivelamentos unilaterais, visto nas seções a seguir.

Considerando que, devido à curvatura da Terra, as superfícies de nível são esferas concêntricas, haverá um erro (δR_0) nas leituras das visadas (SILVA e SEGANTINE, 2015), conforme indicado na Figura 14. Esse erro precisa ser corrigido para que o resultado do nivelamento esteja correto, (neste caso, os autores na Figura citada se referiram ao nivelamento geométrico, mas a correção também é necessária ao nivelamento trigonométrico).

Figura 14 – Influência da curvatura da Terra em um nivelamento.



Fonte: (SILVA e SEGANTINE, 2015).

De acordo com a figura 14,

R_0 = raio médio local da Terra

d = comprimento da visada

δR_0 = correção devido à curvatura terrestre

Notar que,

$$R_0^2 + d^2 = (R_0 + \delta R_0)^2 = R_0^2 + 2R_0\delta R_0 + \delta R_0^2 \quad (71)$$

De onde,

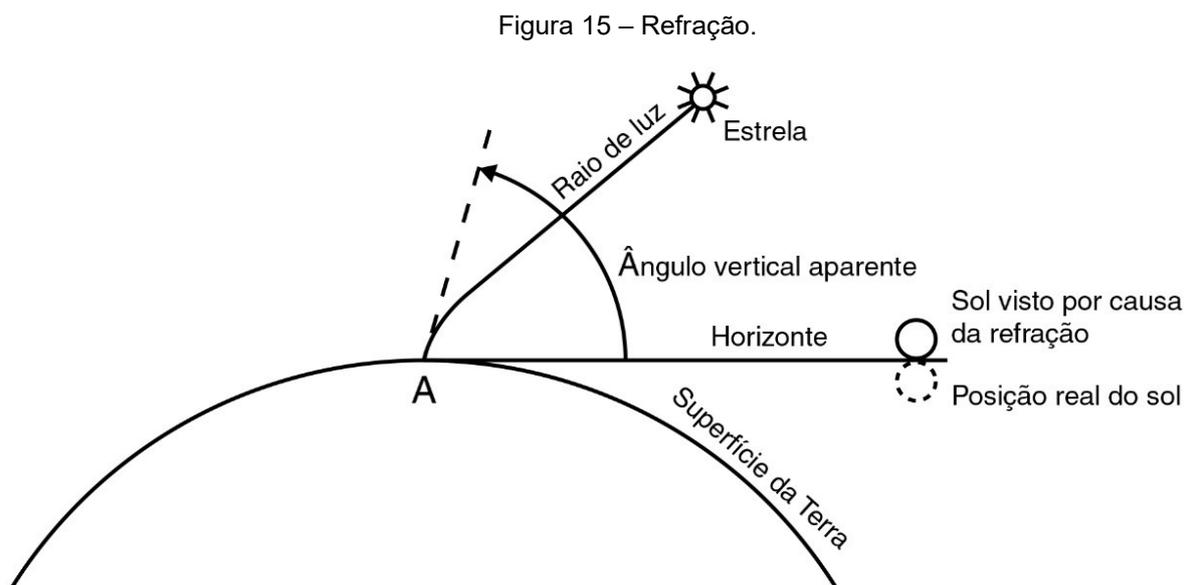
$$\delta R_0 = \frac{d^2}{2R_0} - \frac{\delta R_0^2}{2R_0} \quad (72)$$

Como o segundo termo da equação (72) é muito pequeno comparado ao primeiro, pode-se calcular o valor de δR_0 , de acordo com a equação (73) (SILVA e SEGANTINE, 2015)

$$\delta R_0 = \frac{d^2}{2R_0} \quad (73)$$

3.4.5.2 Erro Devido à Influência da Refração no Raio de Visada

A refração é consequência da diminuição do ar com o aumento da altura (KAHMEN e FAIG, 1988). Os raios de luz passando pela atmosfera da Terra são encurvados ou refratados em direção à superfície da Terra, como mostra a Figura 15. Assim, uma linha de visada teoricamente horizontal, é encurvada (GHILANI E WOLF, 2013).



Fonte: (GHILANI e WOLF, 2013).

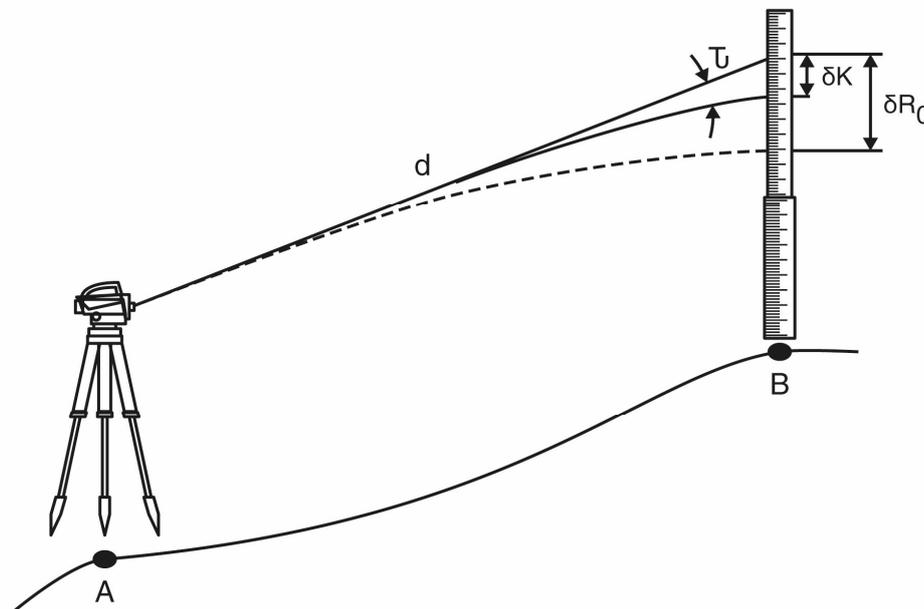
Os efeitos da refração fazem com que os objetos pareçam ser mais altos do que realmente são (GHILANI E WOLF, 2013). Estes autores exemplificam observando o que acontece quando o Sol está no horizonte, como na Figura 15. No momento em que o Sol tiver passado abaixo do horizonte, ele será visto imediatamente acima do horizonte. Segundo estes autores, o diâmetro do Sol de aproximadamente 32 minutos é relativamente o mesmo que a refração média em uma visada horizontal. Como o comprimento de onda vermelho da luz se encurva mais, não é raro ver um Sol vermelho no céu claro ao nascer ou ao pôr do Sol.

O deslocamento resultante da refração é variável. Ele depende das condições atmosféricas, do comprimento da linha e do ângulo que uma linha de visada faz com a vertical (GHILANI e WOLF, 2013). Para o caso de distâncias longas e inclinadas medidas com medidores eletrônicos, devido à refração atmosférica, o raio luminoso realiza uma curva quando se propaga na atmosfera e segundo Silva e Segantine (2015) e Ghilani e Wolf (2013), isto faz com que as leituras nas miras sejam

inferiores às leituras esperadas (Figura 16).

Silva e Segantine (2015) ilustram o efeito da refração no nivelamento, conforme indicado na Figura 16⁷.

Figura 16 – Efeito da refração no nivelamento.



Fonte: (SILVA e SEGANTINE, 2015).

De acordo com a Figura 16,

d = distância entre o instrumento e a mira

τ = ângulo de refração atmosférica

δk = correção devido à refração atmosférica

δR_0 = correção devido à curvatura terrestre

Devido à refração atmosférica, a altitude do ponto (B) precisa ser corrigida por um valor igual a (δk), o qual, por ser um valor pequeno, permite considerar que,

$$\tau = \frac{\delta k}{d} \quad (74)$$

para o caso de distâncias longas e inclinadas medidas com medidores eletrônicos, deve-se também considerar a equação (75) (SILVA e SEGANTINE, 2015)

$$\tau = k * \frac{\gamma}{2} = k * \frac{d}{2R_0} \quad (75)$$

Desta forma, sendo (k), o coeficiente de refração, cujo valor, na maioria dos casos, é igual a 0,13, substituindo a fórmula (75) em (74), obtém-se:

$$\frac{\delta k}{d} = k * \frac{d}{2R_0} \Rightarrow \delta k = k * \frac{d^2}{2R_0} = 0,13\delta R_0 \quad (76)$$

³*neste caso, os autores se referiram ao nivelamento geométrico (figura exemplifica se utilizando de um nível digital), mas a correção devido à refração atmosférica também é necessária ao nivelamento trigonométrico.

Esta correção é muito pequena, principalmente para visadas curtas. Além disso, ela é eliminada se as leituras forem realizadas a uma mesma distância do instrumento. De toda forma, combinando o erro (δR_0), devido à curvatura terrestre, com o erro (δk), devido à refração atmosférica, obtém-se a equação (77). Notar que a correção devido à refração atmosférica é sempre negativa e a correção devido à curvatura é sempre positiva.

$$\Delta H_{(\text{real})} = \Delta H_{(\text{observado})} + \delta R_0 - \delta k = \Delta H_{(\text{observado})} + \delta R_0(1 - k) = \Delta H_{(\text{observado})} + \frac{d^2}{2R_0}(1 - k) \quad (77)$$

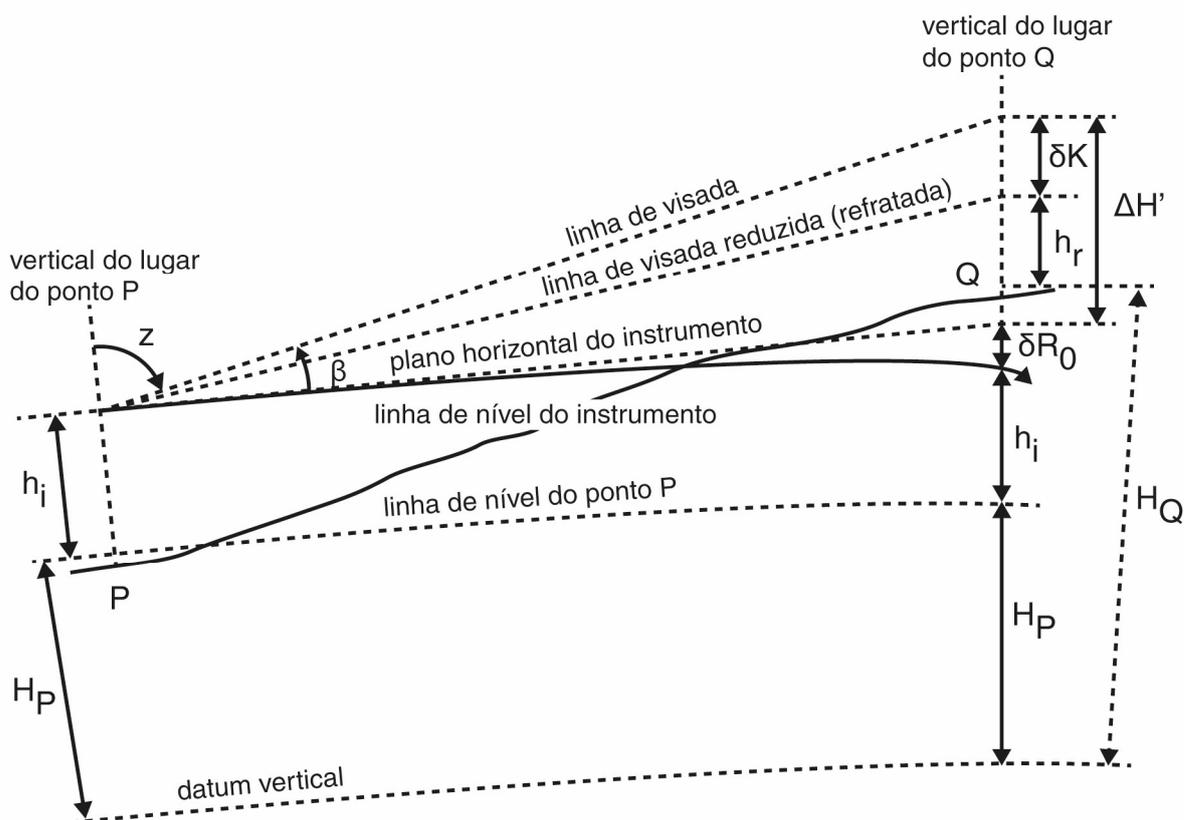
Pode-se considerar conforme Silva e Segantine (2015) para a região do trabalho, o Raio Médio de Curvatura Terrestre para o Local. Portanto, para o ponto RECF, origem do SGL(φ_0, λ_0), $h = 4,217$ m (MENDONÇA *et al.* 2010) $R_0 = 6.357.000$ m e $k = 0,13$. As coordenadas geodésicas do ponto RECF são $\varphi_0 = -8,050963806^\circ$ e $\lambda_0 = -34,951516420^\circ$ no Sistema Geodésico SIRGAS2000, portanto, elipsoide GRS1980, resultando assim no valor de R_0 utilizado neste trabalho.

O Raio Médio de Curvatura Terrestre para o Local pode ser entendido como o raio de uma esfera que tangencia o elipsoide de referência no ponto de interesse. Ele é usado em todos os cálculos geodésicos e topográficos que exigem o conhecimento do raio da Terra. Ele varia em função da latitude e pode ser calculado pela média geométrica do Raio da Seção Meridiana e o Raio da Seção Normal, $R_0 = \sqrt{M * N}$.

3.4.5.3 Consideração da Curvatura Terrestre e Refração Atmosférica nos Nivelamentos Unilaterais

Seja então o caso de um nivelamento trigonométrico realizado com uma estação total estacionada sobre o ponto (P), visando o ponto (Q), conforme indicado na Figura 17 (SILVA e SEGANTINE, 2015):

Figura 17 – Efeito da refração e da curvatura da Terra em um nivelamento trigonométrico.



Fonte: (SILVA e SEGANTINE, 2015). Adaptada de Uren e Price, (2010).

UREN, J.; PRICE, W. F. (2006). *Surveying for engineering*. 4th. Edition. Polgrave Macmillan, London.

De acordo com a Figura 17,

$$H_Q = H_P + h_i + \delta R_0 + \Delta H' - \delta k - h_r \quad (78)$$

$$H_Q = H_P + \Delta H' + (h_i - h_r) + (\delta R_0 - \delta k) \quad (79)$$

Sendo,

$$\Delta H' = d_P * \operatorname{tg}\beta = d' * \operatorname{sen}\beta = d' * \operatorname{cos}z$$

d_P = distância horizontal ao nível de (P)

d' = distância inclinada entre (P) e (Q)

β = ângulo vertical de altura medido

z = ângulo vertical zenital medido

H_Q = altitude do ponto (Q)

H_P = altitude do ponto (P)

h_i = altura do instrumento

h_r = altura do refletor

δR_0 = correção devido à curvatura terrestre

δk = correção devido à refração atmosférica

De acordo com as equações (73) e (76), reescritas abaixo, tem-se:

$$\delta R_0 = \frac{d_P^2}{2R_0} \quad (73)$$

$$\delta k = k \frac{d_P^2}{2R_0} \quad (76)$$

O que permite obter a equação (80) (SILVA e SEGANTINE, 2015)

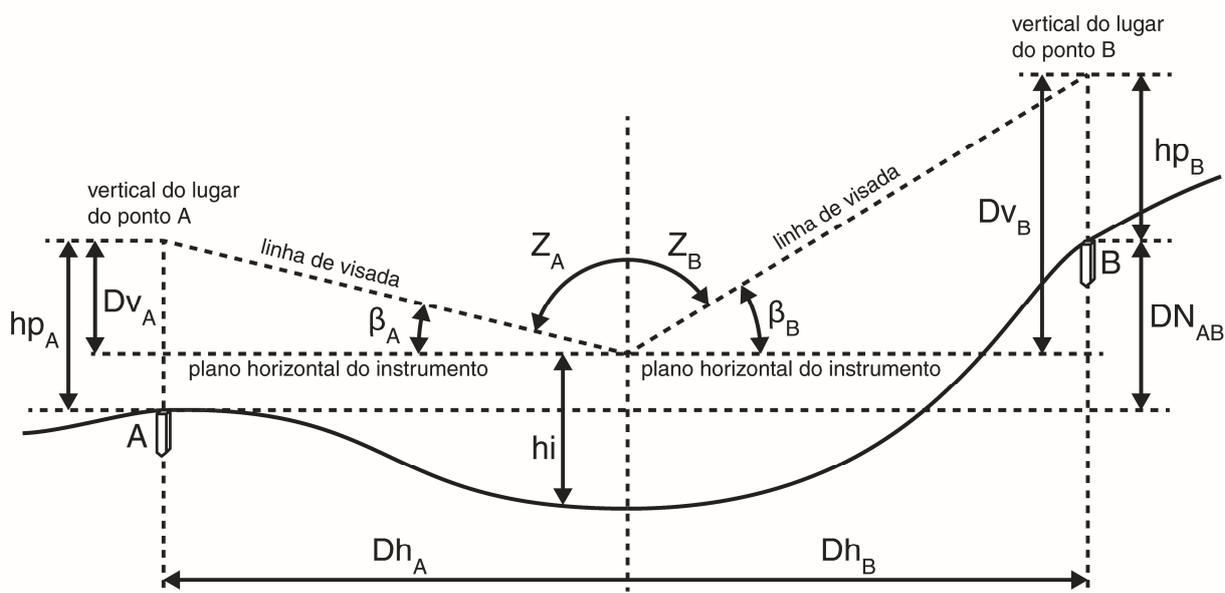
$$(\delta R_0 - \delta k) = \frac{d_P^2}{2R_0} - \left(k \frac{d_P^2}{2R_0} \right) = (1 - k) \frac{d_P^2}{2R_0} = (1 - k) \frac{(d' * \text{co})^2}{2R_0} \quad (80)$$

3.4.5.4 Técnica Leap Frog

O *Leap Frog* é uma metodologia utilizada para minimizar o efeito da curvatura terrestre e atenuar os efeitos da refração no ângulo vertical, uma vez que estes são proporcionais às distâncias (MOREIRA, 2003; GOMES et al., 2007).

Essa técnica consiste em instalar a estação total entre os dois pontos dos quais se deseja obter o desnível, ao invés de colocá-la sobre um deles. Sobre esses pontos são instalados dois bastões com prismas refletores, que serão visados para obtenção das distâncias inclinadas e dos ângulos zenitais de ré e de vante. Esse procedimento faz com que a medida da altura do instrumento não seja necessária (KAHMEN e FAIG, 1988). A dedução da equação para o cálculo do desnível que utiliza esta metodologia baseia-se na figura 18.

Figura 18 – Representação dos elementos no nivelamento trigonométrico técnica *Leap Frog*.



Fonte: Adaptada de GOMES; VEIGA; DOS SANTOS e FAGGION (2007). Autor (2020).

Na qual:

D_{VA} : distância vertical em A;

D_{VB} : distância vertical em B;

h_p : altura do centro do prisma à Referência de Nível (iguais, como preconiza o método);

$D_{hA} = D_{hB} = D$: distância horizontal: estação – prisma;

ΔD_{AB} : diferença entre as distâncias verticais: $D_{VB} - D_{VA}$;

ΔH_{AB} : desnível da Referência de Nível A para a Referência de Nível B;

Para cada linha de visada há uma distância inclinada correspondente do ponto interseção entre os eixos da estação total (centro da figura) para os centros dos prismas em A e B;

Z_A e Z_B : ângulo zenital para os centros dos prismas em A e B;

os itens não representados, porém, implícitos na figura, H_A e H_B : altitudes da Referência de Nível A e Referência de Nível B e H_{PA} e H_{PB} : altitudes dos centros dos prismas em A e B.

O desnível da Referência de Nível A para a Referência de Nível B (ΔH_{AB}) é dado por:

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A \quad (81)$$

Assim como o desnível da Referência de Nível B para a Referência de Nível A (ΔH_{BA}) é dado por:

$$\Delta H_{BA} = H_A - H_B \quad (82)$$

Portanto:

$$\Delta H_{AB} = -\Delta H_{BA} \quad (83)$$

A equação (83) mostra que o sinal do desnível depende do sentido do caminhamento do nivelamento.

Da figura 18, verifica-se que a diferença entre as distâncias verticais (ΔD_{AB}) é dada por:

$$\Delta D_{AB} = D_{VB} - D_{VA} = H_{PB} - H_{PA} \quad (84)$$

Da figura 18, obtém-se também:

$$H_{PA} = H_A + h_p \quad (85)$$

$$H_{PB} = H_B + h_p \quad (86)$$

Substituindo-se as equações (85) e (86) na equação (84), vem:

$$\begin{aligned} \Delta D_{AB} &= D_{VB} - D_{VA} = H_B + h_p - (H_A + h_p) \\ \Delta D_{AB} &= D_{VB} - D_{VA} = H_B - H_A \end{aligned} \quad (87)$$

Substituindo-se a equação (81) na equação (87), obtém-se finalmente:

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = D_{VB} - D_{VA} \quad (88)$$

Na qual, as distâncias verticais são obtidas da figura 18:

$$D_{VA} = D'_A \cdot \cos Z_A \quad (89)$$

$$D_{VB} = D'_B \cdot \cos Z_B \quad (90)$$

Nas condições propostas, verifica-se nas equações (89) e (90), que as únicas observações necessárias para a determinação do desnível da Referência de Nível A para a Referência de Nível B são as distâncias inclinadas D'_A e D'_B e os ângulos zenitais Z_A e Z_B .

Este método foi utilizado para a poligonal implantada no entorno da edificação estudada; sua aplicação ocorreu durante o procedimento da poligonização com centragem forçada.

3.4.6 Posicionamento por Métodos Clássicos em 3D

As operações topográficas clássicas (poligonais, irradiações, interseções, ou por ordenadas sobre uma linha-base) podem conduzir, simultaneamente, à obtenção da planimetria e da altimetria, ou então, separadamente, se condições especiais do terreno ou exigências do levantamento obrigarem à separação (ABNT NBR 13133, 1994).

O levantamento topográfico pode ser georreferenciado ou de pontos arbitrários; porém, para fins de regularização de propriedade o levantamento topográfico é executado com o uso do Sistema de Coordenadas Geocêntrico (SCG) ou no Sistema Geodésico Local (SGL). No entanto, este último, apenas pode ser efetuado se caso o Município já tenha implantado uma rede geodésica no SGL para fins de levantamentos topográficos (FREITAS, 2019; GARNÉS, SIQUEIRA e CACHO, 2005).

As metodologias empregadas para obtenção das posições dos vértices que delimitam uma propriedade rural, com uso dos métodos clássicos são Trilateração, Triangulação, Triangulateração e Poligonização (INCRA, 2013); conforme Freitas (2019), o mesmo manual também inseriu os métodos de aquisição de dados (ângulos e distâncias) com estação total, teodolitos e/ou distanciômetros da Topografia (Irradiação e as Interseções a Ré e Vante) como fazendo parte dos métodos clássicos.

Nesta dissertação se utiliza os módulos Planialtimetria. Versão © 2022 (GARNÉS, 2022a) e Ajustamento de Redes Geodésicas 3D. Versão © 2022 (GARNÉS, 2022b) do software AstGeoTop para processamentos e ajustamentos dos dados em Rede Geodésica 3D. O módulo Desvio da Vertical (mód. Cálculo do Desvio da Vertical)

Versão © 2012.05.11 (GARNÉS, 2012) também proporciona possibilidade de cálculo das coordenadas topográficas planas locais.

4 MATERIAIS E MÉTODOS PARA A DEFINIÇÃO DE PONTOS DE REFERÊNCIA

Este capítulo trata especificamente do objeto e área de estudo; dados topográficos/ geodésicos iniciais à dissertação; um fluxograma com a síntese metodológica executada para a definição de Pontos de Referência e Pontos-Objeto; métodos de levantamentos geodésicos e topográficos realizados para a definição dos Pontos de Referência (igualmente aos materiais utilizados e respectivas precisões); a medição e processamento de dados dos Pontos (ou vértices) de Referência e por último, o procedimento para a determinação das coordenadas altimétricas destes vértices.

4.1 OBJETO DE ESTUDO E LOCALIZAÇÃO

O edifício que abrigou a SUDENE de janeiro de 1974 até julho de 2017 é um expoente da arquitetura moderna no Brasil. O prédio é caracterizado por princípios de adequação climática, que o tornam ventilado sem a necessidade de ventilação mecânica, e pelos jardins projetados pelo paisagista Roberto Burle Marx, com plantas do semiárido nordestino (POR AQUI.COM, 2017). O local tem uma área construída de 72.704,81 m², e o edifício é distribuído em diversos blocos, sendo um prédio principal, com 13 andares, e quatro anexos.

Parte da fachada lateral do edifício é vista na Figura 19.

Figura 19 – Edifício SUDENE. Recife (PE).



Fonte: autores (2020). Data da foto: outubro de 2019.

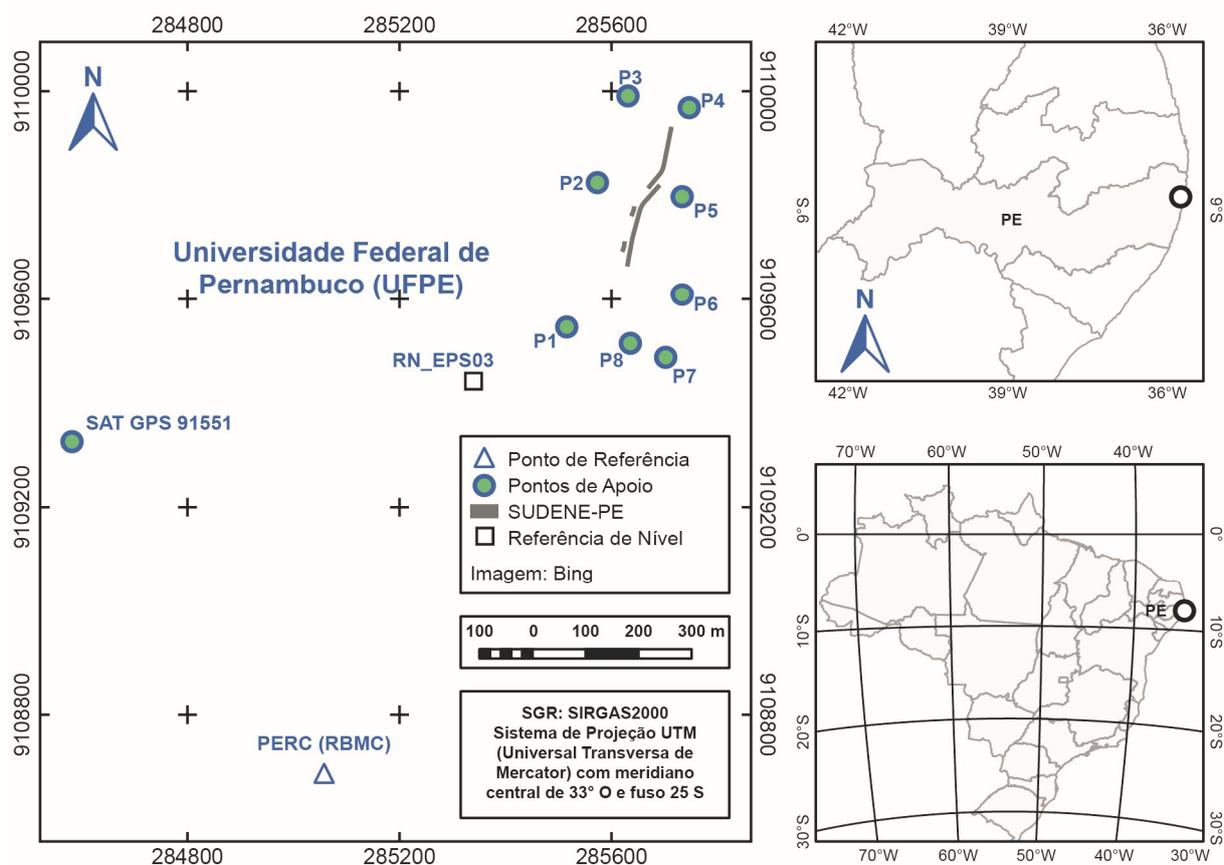
O Edifício SUDENE é representativo da arquitetura do País. O Jornal Diário de Pernambuco (1974), *apud* (SÁ CARNEIRO *et al.* 2018), descrevia assim a arquitetura e seu custo “... projeto de características globais nordestinas: todas as fachadas são em concreto aparente (ausência quase total de alvenaria) (...) o custo médio da obra, incluindo mobiliário, vias de acesso e jardins é da ordem de Cr\$ 1.400 por metro quadrado”.

O prédio em estudo (Edifício SUDENE), está situado no Campus Recife da UFPE e foi construído em 1974. É uma edificação com grande extensão em comprimento. A mesma é próxima à uma RN, Referência de Nível. Este quadro viabiliza atividades relacionadas à determinação planialtimétrica na edificação e seu entorno.

A área de estudo foi definida preliminarmente, sendo que a área do levantamento geodésico/topográfico abrange o bairro do Engenho do Meio, no município do Recife-PE. A área se localiza na Zona UTM Sul 25: 36° O a 30° O.

A representação da área de levantamentos é vista na Figura 20.

Figura 20 – Representação da área de levantamentos geodésicos/topográficos definida pelas coordenadas plano-retangulares UTM (metros) em SIRGAS2000.



Fonte: Autor (2022).

A Figura 20 representa as localizações da estação PERC, da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC); estação Passiva SAT GPS 91551; da Referência de Nível RN_EPS03 determinada por Silva e Seixas (2017); Pontos de Apoio Imediato à Edificação (P1 a P8) e o Edifício SUDENE.

4.2 ORIGEM (SISTEMA GEODÉSICO DE REFERÊNCIA): DADOS TOPOGRÁFICOS/ GEODÉSICOS CONHECIDOS – MARCOS TOPOGRÁFICOS/ GEODÉSICOS PRÉ-EXISTENTES

- a) origem do SGL da Rede de Referência Cadastral do Campus Recife da UFPE (MENDONÇA *et al.* 2010);

Para esta dissertação, utilizou-se como origem do sistema a posição horizontal da estação RECF e a posição vertical a média das altitudes geodésicas EPS1, EPS2,...,EPS7 para a rede cadastral do campus Recife Joaquim Amazonas da UFPE (VILA FLOR, 2010), (MENDONÇA *et al.*, 2010). A origem do sistema pelas definições das normas ABNT NBR 13133 (2021)(1994) e ABNT NBR 14166 (1998) se dá em um ponto central da área em uma altitude média da região. A Figura An.3.1,

dada no Anexo B, traz a localização dos Marcos Geodésicos da RRC -UFPE.

- b) altitude ajustada e o respectivo desvio-padrão da RN (Referência de Nível) EPS03 (SILVA, SEIXAS, 2017);

Silva e Seixas (2017) disponibilizam a altitude ortométrica da RN_EPS03 (Tabela 1).

Tabela 1 – Altitude Ajustada e o respectivo desvio-padrão da estrutura da Rede Altimétrica do Campus Recife da UFPE em relação aos pinos de superfícies semi-esféricas.

Referência de Nível	H ^o (m)	σ (m)
RN_EPS03	9,42082	$\pm 0,00011$

Fonte: (SILVA, SEIXAS, 2017).

- c) no Banco de Dados do IBGE, RBMC, (IBGE, 2020) são obtidas as coordenadas e dados do vértice PERC (estação PERC, RBMC), instalado no prédio do IFPE (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco)(Tabela 2).

Tabela 2 – Coordenadas Geodésicas (φ, λ, h) em SIRGAS2000 do ponto PERC; dadas em graus, minutos e segundos e altitude geodésica em metros.

Estação	Latitude geodésica (gg ^o mm`ss,ss")	Longitude geodésica (gg ^o mm`ss,ss")	Altitude geodésica(h) (m)
PERC	-08 03 31,68320	-34 57 01,38486	12,2120

Fonte: (IBGE, 2020).

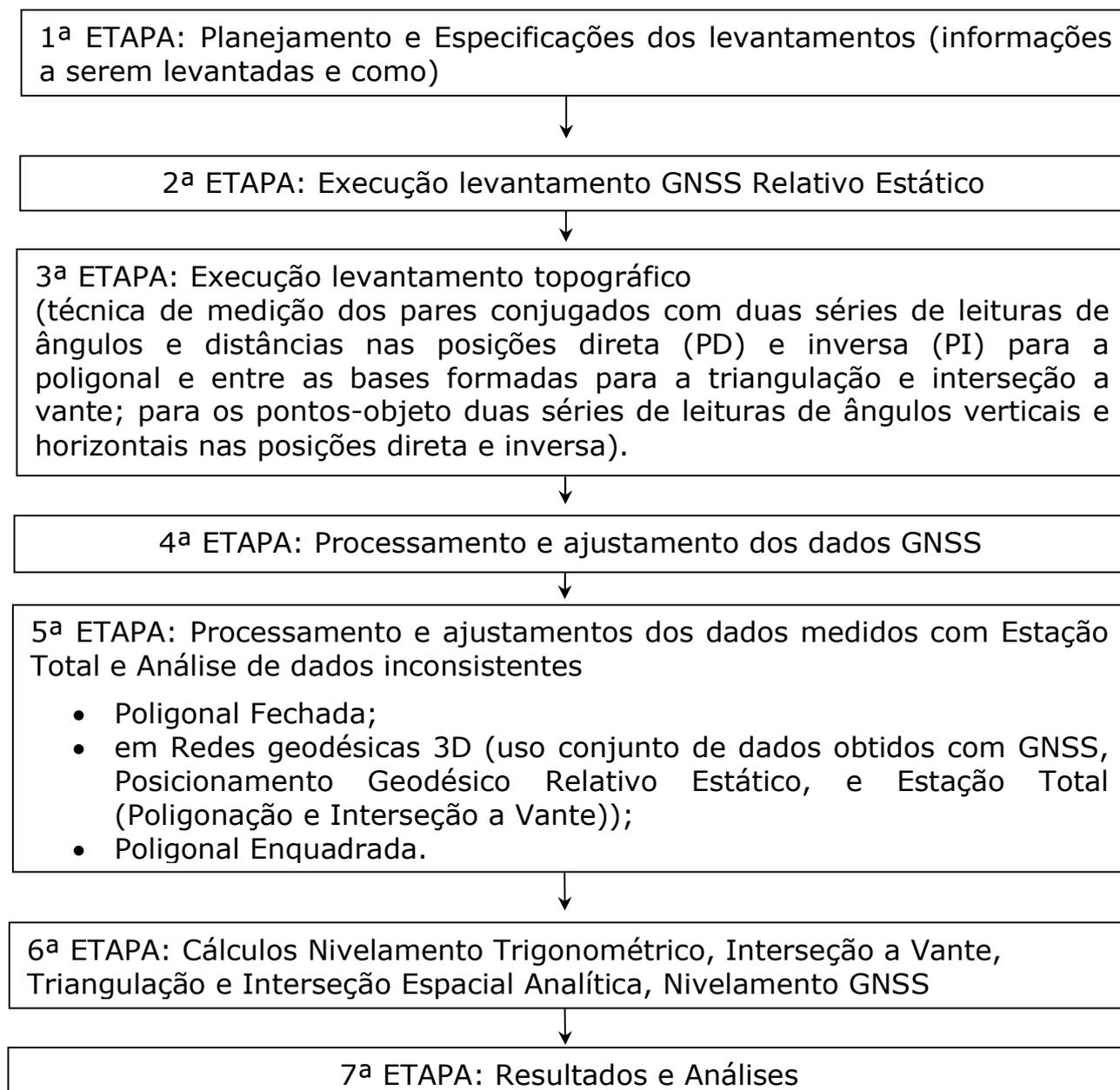
Posteriormente, em uma segunda etapa, também são utilizadas coordenadas topográficas planas locais (STL) (Sistema Topográfico Local); neste sentido, as componentes do desvio da vertical também são consideradas.

- d) para a origem RECF, as componentes do desvio da vertical são, $\xi = -4,4761''$ (componente meridiana), e $\eta = 4,2664''$ (componente da primeira vertical) (GARNÉS, 2012), (SOUZA, W., 2012).

4.3 SÍNTESE METODOLÓGICA

Nesta seção é dado um fluxograma, o qual resume a organização e execução da metodologia desta dissertação (Figura 21).

Figura 21 – Procedimentos metodológicos.



Fonte: Autor (2021).

4.4 MÉTODOS DE LEVANTAMENTOS GEODÉSICOS

Os métodos de levantamentos geodésicos/ topográficos planialtimétricos foram empregados com o objetivo de definir um sistema de referência que caracteriza pontos de apoio do Edifício SUDENE. Para isso foram empregados receptores GNSS de dupla frequência com o uso do método de posicionamento GNSS Relativo Estático e o método topográfico da Poligonação 3D, com uso de Estação Total utilizando a técnica dos pares conjugados, com leituras na posição direta e inversa, empregando-se dispositivo de centragem forçada.

4.4.1 Materiais utilizados e respectivas precisões

Os materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho são equipamentos GNSS e topográficos, receptores GNSS de dupla frequência (L1/L2) da marca TOPCON (Topcon Hiper V e Hiper Lite+ e *software* Topcon Tools) e Estação Total (GPT 3200 N/W e respectivos acessórios) com $\pm 5''$ de precisão angular e $\pm(5\text{mm} + 5\text{ppm})$ de precisão linear (TOPCON, 2012). Além destes, base nivelante com adaptador, bastão de fibra de carbono de 2m, e tripé de madeira.

Sobre as respectivas precisões, para receptores geodésicos de dupla frequência (L1/L2) da marca TOPCON (modelo HIPER LITE+ EPP): precisão horizontal de $\pm(3\text{mm} + 0,5 \text{ ppm} \times D)$ e vertical de $\pm(5\text{mm} + 0,5\text{ppm} \times D)$ para levantamentos estáticos e rápidos-estáticos e horizontal de $\pm(10 \text{ mm} + 1,0\text{ppm} \times D)$ e vertical de $\pm(15\text{mm} + 1,0\text{ppm} \times D)$ para levantamentos cinemáticos e RTK (TOPCON, 2004).

Os *softwares*: de processamento de dados GNSS *Topcon Tools/ TopSurv 7.5.1*; quanto ao ajustamento de observações: Scilab, ADJUST (GHILANI, WOLF, 2006) e AstGeoTop (GARNÉS, 2022); Excel Microsoft 365; *Software* MAPGEO 2015 (MATOS *et al.* 2012, ELLMANN 2005).

- O *software* ADJUST foi desenvolvido pelo professor Paul R. Wolf da **Universidade de Wisconsin – Madison** e pelo professor Charles D. Ghilani da **Universidade Estadual da Pensilvânia**, baseado no livro texto *ADJUSTMENT COMPUTATIONS – Statistics and Least Squares in Surveying and GIS* (1996), **para atender basicamente os cursos de computação e ajustamento da Universidade da Califórnia – Berkeley e da Universidade de Wisconsin – Madison**. É um pacote de programas elaborados nas linguagens computacionais BASIC, C, FORTRAN e PASCAL, direcionado ao ensino e pesquisa. Este *software* é constituído por três módulos: STATS, ADJUST e MATRIX.
- O *software* AstGeoTop foi desenvolvido pelo professor Sílvio J. A. Garnés da **Universidade Federal de Pernambuco, Recife; para atender à diversas finalidades**. O *software* é constituído por muitos Módulos, para esta dissertação foram utilizados, Módulo Cálculo do Desvio da Vertical. Versão © 2012.05.11 (GARNÉS, 2012); Modelo Geoidal Local - RECIFE/PE. Versão © 2017.12.08 (GARNÉS, 2017); Planialtimetria. Versão © 2022 (GARNÉS, 2022a) e Ajustamento de Redes Geodésicas 3D. Versão © 2022 (GARNÉS, 2022b). Cada

Módulo foi elaborado com subprogramas e sub-rotinas; os cálculos e testes podem ser realizados particularmente e interativamente, o que possibilita a análise e discussão de cada resultado ou produto de cálculo intermediário.

4.4.2 Medição e processamento dos Pontos de Referência medidos com o método de posicionamento GNSS Relativo Estático

Em uma primeira etapa são calculadas coordenadas no Sistema Geodésico Local e desenvolvida sequência de cálculos; posteriormente, com o uso do desvio da vertical, são realizadas as mesmas etapas e designadas coordenadas topográficas planas locais.

Com o objetivo de determinar as coordenadas geodésicas locais (SGL) de um conjunto de nove pontos de referência, denominados SAT GPS 91551, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 e P8 (Figura 22), foi realizado o levantamento GNSS com o método de posicionamento GNSS Relativo Estático.

O Sistema Geodésico de Referência (SGR) adotado para os levantamentos foi o SIRGAS2000, Sistema Geodésico de Referência oficial do Brasil (IBGE 2005).

As medidas de campo foram efetuadas seguindo-se o uso dos mesmos equipamentos, pelos mesmos responsáveis técnicos e dias de execução. Estas medidas foram adquiridas, inicialmente, para propósitos de aulas práticas de levantamentos geodésicos.

Ainda com relação à precisão das coordenadas obtidas, nesta dissertação também foram imprescindíveis transformações entre sistemas. Como exemplo, de (sistema de projeção) em coordenadas planas na projeção UTM – Universal Transversa de Mercator, para coordenadas geodésicas e vice-versa em radianos e em graus decimais. Ainda, neste sentido, com uso do *software* Scilab foi adotado o padrão *format(25)*. Outra observação são as acurácias requeridas para a origem do levantamento geodésico/topográfico, neste caso, o ponto RECF, dada em (MENDONÇA et al. 2010); nesta referência são dadas as respectivas coordenadas e desvios-padrões no Sistema Geodésico Local (geodésicas locais), em coordenadas geodésicas e planas da projeção UTM.

4.4.2.1 Medição

A campanha GNSS de medição da estação SAT GPS 91551, ponto de referência, e dos pontos P1 a P8 foi realizada com os receptores GNSS HIPER V

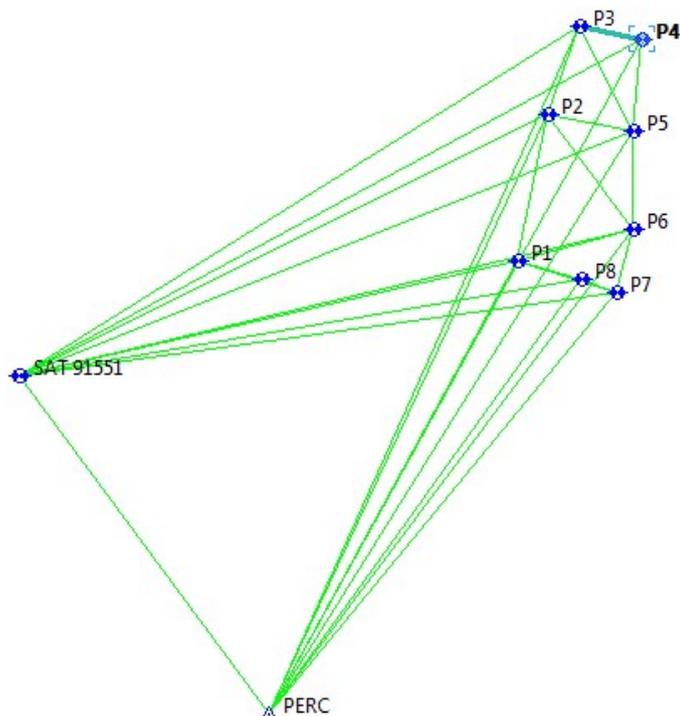
(estação SAT GPS 91551) e HIPER LITE de dupla frequência para os demais pontos. A simultaneidade das medições também foram realizadas com a estação PERC (RBMC). Os pontos de referência foram ocupados por um período mínimo de duração de 30 minutos e máximo de aproximadamente 1h50min, com rastreamento simultâneo de 4 receptores GNSS. A configuração da taxa de gravação dos dados foi de 5s e da máscara de elevação de 15°. No Apêndice B. Relatório GNSS: (Ocupações e Observações GNSS) está disponível um quadro com todos os tempos de observação para as sessões levantadas.

No tempo de ocupação dos pontos por receptores GNSS está incluído o tempo de caminhamento para as instalações dos receptores. Outra observação é com relação às linhas de bases duplamente medidas. A configuração com linhas de base duplamente medidas permite realizar o processamento dos dados levando-se em consideração três linhas de base com apenas dois receptores disponíveis; no entanto, como foram utilizados quatro receptores (um destes fixo na estação SAT GPS 91551) foi possível realizar redes com uma linha de base duplamente medida nos vértices (de Referência)⁸ no entorno do prédio. O ajustamento completo com todas as linhas de base medidas, e os três receptores restantes favoreceram o levantamento das linhas de base entre vértices não intervisíveis entre si.

O método de posicionamento Relativo Estático foi utilizado, formando os seguintes polígonos com rastreamento simultâneo dos pontos de referência: PERC, SAT GPS 91551, P1, P8 e P7; PERC, SAT GPS 91551, P1, P7 e P6; PERC, SAT GPS 91551, P1, P6 e P2; PERC, SAT GPS 91551, P2, P6 e P5; PERC, SAT GPS 91551, P2, P5 e P3; PERC, SAT GPS 91551, P3, P5 e P4.

⁸ Ou Apoio

Figura 22 – Posicionamento GNSS realizado.



Fonte: Autor (2022).

A Figura 23a mostra a estação de referência PERC e as Figuras 23b e 23c a ocupação por receptores GNSS em alguns dos pontos medidos, estação Passiva SAT GPS 91551 e ponto P5.

Figura 23a – Estação de referência PERC, instalada no prédio do IFPE.



(a)

Fonte: IBGE (2020).

Figuras 23b e 23c – (b) Ocupação GNSS da estação de referência SAT GPS 91551 e do ponto de apoio ponto P5 (c).

(b) (c)



Fonte: Autores (2020). Data das fotos: 14 set. 2019.

4.4.2.2 Processamento

As coordenadas geodésicas da estação de Referência PERC foram utilizadas como referência para determinar as coordenadas dos pontos P1 a P8. A estratégia de processamento adotada consistiu em considerar a estação PERC para o processamento da estação SAT GPS 91551 e demais pontos.

4.4.3 Transformação de Coordenadas Cartesianas Geocêntricas SIRGAS2000 em Coordenadas Cartesianas no Sistema Geodésico Local (SGL)

As coordenadas dos Pontos de Referência obtidas por rastreamento GNSS são transformadas para o Sistema Geodésico Local com uso de código em linguagem Scilab .sce; (coordenadas geodésicas em SIRGAS2000, pelo *software* Topcon Tools, para geodésicas locais). Esta metodologia foi realizada em conformidade com o que preconiza a Norma ABNT NBR 14166 (1998).

Com o uso das coordenadas geodésicas, latitude, longitude e altitude geodésica dos pontos de referência (Figura 22) foram obtidas as coordenadas cartesianas geocêntricas (LUGNANI, 1987), (WOLF e DEWITT, 2000), (FAZAN, 2007), (ANDRADE, 2003).

Posteriormente, para a transformação de coordenadas no referencial geodésico cartesiano para o referencial cartesiano local (SGL), utilizou-se um modelo baseado em rotações e translações, dado por (WOLF e DEWITT, 2000), com origem no ponto RECF, origem do SGL(φ_0 , λ_0), $h = 4,217$ m (MENDONÇA *et al.* 2010). As coordenadas geodésicas do ponto RECF são $\varphi_0 = -8,050963806^\circ$ e $\lambda_0 =$

-34,951516420° em graus decimais⁹ no Sistema Geodésico SIRGAS2000, elipsoide GRS1980.

A definição de Sistema Geodésico Local é dada na seção 2.5.4. Ainda com relação ao SGL, é importante que se ressalte que, conforme já citado por Garnés (1998) na seção 2.5.5., no sistema geodésico topocêntrico a cota z é definida segundo a direção da normal do ponto origem do sistema e no sistema topográfico local a cota z é definida segundo a direção da vertical no ponto origem.

A propagação de covariâncias descritas em Gemael (1994), Ghilani e Wolf (2006) foram calculadas pelas equações dadas em (SOUZA W., 2012), item 2.5.7.

4.4.4 Transformação de coordenadas cartesianas geocêntricas SIRGAS2000 em coordenadas topográficas planas locais (STL).

Os procedimentos efetuados nas seções anteriores, seções 4.4.2 a 4.4.2.2 são os mesmos; neste caso, agora são consideradas para a origem RECF, as componentes do desvio da vertical¹⁰, $\xi = -4,4761''$ (componente meridiana), e $\eta = 4,2664''$ (componente da primeira vertical).

As coordenadas topográficas planas locais dos Pontos de Referência, Tabela 32, também são utilizadas para cálculos das interseções a Vante (2D e Interseção Espacial Analítica).

4.4.5 Medição e processamento dos pontos de apoio pelo método da Poligonação com centragem forçada

Para uma rede de pontos de apoio determinados e implantados para um projeto particular, dá-se o nome de rede de apoio topográfico.

É preciso que se aplique conceitos para garantir a consistência entre as coordenadas da rede geodésica de referência e a rede de pontos de apoio topográfico a ser implantada (SILVA e SEGANTINE, 2015). O procedimento de campo consiste em partir de pontos da rede geodésica oficial ou determinados por medições com a tecnologia GNSS e definir novos pontos por intermédio do estabelecimento de uma poligonal com controle geométrico bem definido.

⁹ ou ainda, para o ponto RECF, latitude geodésica (gg°mm`ss,ss"): $\varphi_0 = -08^\circ 03' 03,46970''$; longitude geodésica (gg°mm`ss,ss"): $\lambda_0 = -34^\circ 57' 05,45910''$ (MENDONÇA *et al.* 2010); e conforme citado no item 4.2. letra a), a posição vertical, é definida pela média das altitudes geodésicas dos pontos EPS1, EPS2,...,EPS7 para a rede cadastral do campus Recife Joaquim Amazonas da UFPE; portanto, definida a altitude geodésica (h) (m) sendo 4,2170 m.

¹⁰ GARNÉS, S. J. A. AstGeoTop. **Software**. Cálculo do Desvio da Vertical. Versão © 2012.05.11. Departamento de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal de Pernambuco. Compilação. 2012.

Para as medições dos Pontos de Referência denominados P1, P2, P3, P4, P6, P7 e P8 (Figura 22), utilizou-se a Estação Total Topcon GPT 3200N/NW com $\pm 5''$ de precisão angular e precisão linear de $\pm(5\text{mm} + 5\text{ppm})$.

O método de medição utilizado para a determinação das coordenadas planimétricas desses pontos foram a Poligonal Fechada e a Poligonal Topograficamente Apoiada (ou Enquadrada) com centragem forçada, aplicando-se a técnica de medição dos pares conjugados com duas séries de leituras de ângulos e distâncias inclinadas nas posições direta (PD) e inversa (PI) e caminhamento horário a partir do vértice P1.

A compensação das observações foi realizada para o método clássico, e posteriormente, houve o ajustamento das observações em rede 3D (ou Rede Geodésica 3D); para este ajuste, utilizou-se o módulo ajustamento de rede 3D do software AstGeoTop (GARNÉS, 2022b). Também se utilizou o software ADJUST para ajuste da Poligonal Enquadrada (GHILANI, WOLF, 2006).

O procedimento executado para a poligonal calculada exemplifica a implantação de pontos com a técnica de Poligonização com centragem forçada; esta etapa permite mostrar o uso do método para aplicações como determinação de altitudes, (em arestas de edificações, p.ex.,) e aplicação direta de outros métodos topográficos, p.ex., Interseção a Vante e Nivelamento Trigonométrico. Nesta dissertação a implantação da poligonal ocorreu simultaneamente à medição aos pontos altos e inacessíveis das arestas da edificação, utilizando-se do mesmo procedimento de medição conjugada e duas séries de observação; isto é, os Pontos-Objeto foram levantados simultaneamente ao método da Poligonização.

A poligonal enquadrada anteriormente citada (nesta seção, quarto parágrafo) foi realizada como **outra forma de determinação/densificação de pontos de referência**; a vantagem do procedimento GNSS diz respeito ao tempo de execução de levantamento quando se dispõe de uma infraestrutura como havia para o levantamento, no caso, 4 receptores.

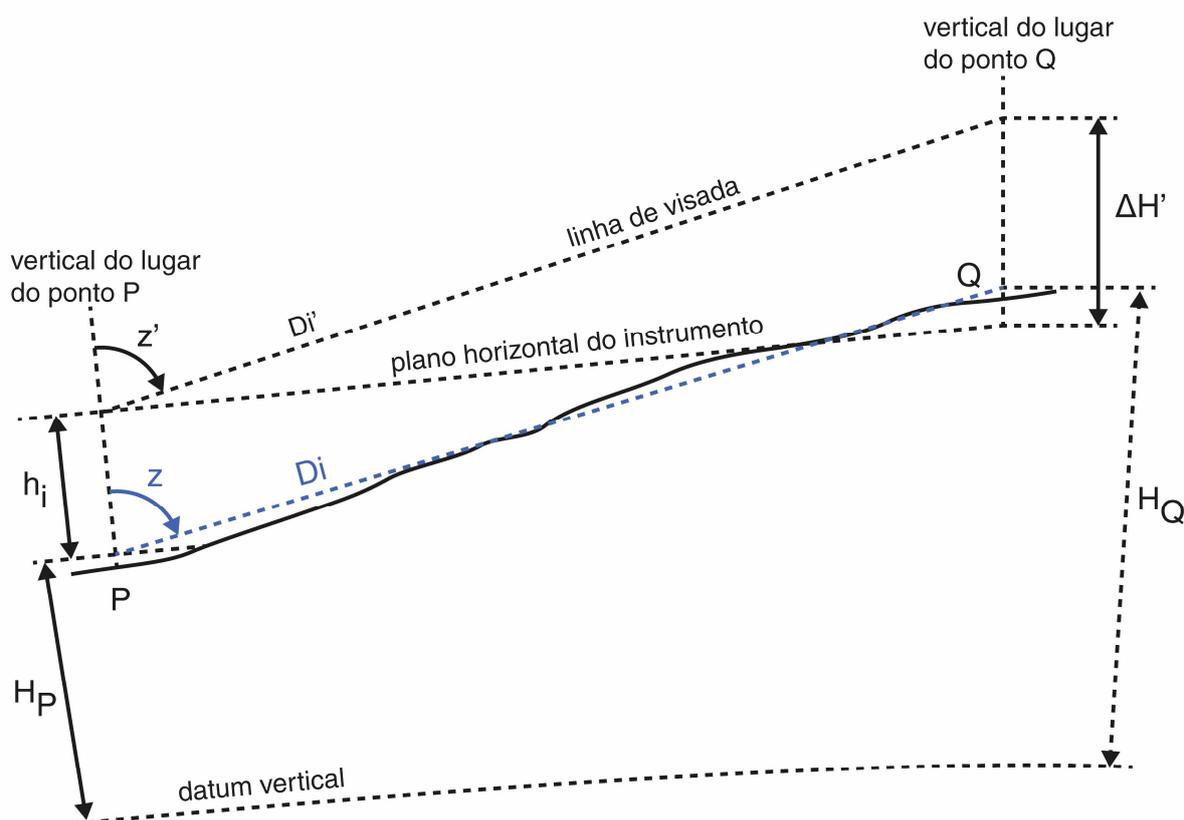
Nas proximidades à área de trabalho escolhida, há pontos das Redes GNSS Passiva (SAT GPS 91551) e Ativa do IBGE (PERC), ponto RN, isto é, Referência de Nível (RN_EPS03) e pontos destinados à finalidade cadastral (MENDONÇA *et al.* 2010). Nesta pesquisa a avaliação da precisão posicional planimétrica foi efetuada com uso de método de posicionamento GNSS; no caso foram utilizados os vértices de apoio obtidos com GNSS para o emprego da estação total. Portanto, os pontos-objeto, por sua vez, foram determinados a partir de vértices GNSS.

Utilizou-se, portanto, as coordenadas obtidas com GNSS para os pontos de referência (seções 4.4.2 a 4.4.4.; seção 6.2 (Tabela 11) e seção 6.4 (Tabela 32)). Nesta dissertação, portanto, são adotadas as coordenadas determinadas por medições com a tecnologia GNSS.

4.4.6 Ajustamento das observações em rede por medidas dos métodos clássicos topográficos e com uso das distâncias inclinadas GNSS

No módulo ajustamento de rede3D existe uma ferramenta para preparar a caderneta de campo reduzindo as distâncias inclinadas e os ângulos zenitais ao solo (Figura 24), isto é, como se a altura do instrumento (AI) fosse nula, $AI=0$, e a altura do prisma (AP) também, $AP=0$. A caderneta de campo utilizada para obter as distâncias e as direções é dada no Apêndice E.1.

Figura 24 – Observações dos ângulos zenitais e distâncias inclinadas ao solo.



Fonte: Autor (2022).

Na figura 24, D_i' são as distâncias inclinadas entre os pontos P e Q, e z' os ângulos verticais zenitais medidos com o instrumento (para o centro do prisma em Q); e os termos na cor azul, D_i e z , são, respectivamente, as distâncias inclinadas e os ângulos zenitais reduzidos ao solo; $\Delta H'$ é a distância vertical entre P e Q; H_Q e H_P são as altitudes da Referência de Nível Q e Referência de Nível P; h_i a altura do instrumento.

A Tabela 3 traz as distâncias inclinadas reduzidas ao solo, conforme figura 24, e as precisões estimadas a partir dos desvios-padrões das séries observadas da estação ao ponto visado.

Tabela 3 – distâncias inclinadas reduzidas ao solo.

Est	P.Visado	Nome Lado	Distâncias Inclinadas (m)	Precisão (m)
P1	P2	d1	282,939	0,001
P2	P3	d2	177,438	0,003
P3	P4	d3	120,257	0,003
P4	P5	d4	173,470	0,001
P5	P6	d5	186,997	0,001
P6	P7	d6	124,381	0,000
P7	P8	d7	71,512	0,001
P8	P1	d8	126,181	0,001

Fonte: módulo Ajustamento de Redes Geodésicas 3D do software AstGeoTop. (GARNÉS, 2022b).

A Tabela 4 traz os ângulos horizontais medidos no sentido horário a partir de cada estação poligonal, os mesmos são ângulos externos ao polígono implantado. A precisão de cada ângulo corresponde ao desvio-padrão a partir das séries medidas em cada estação.

Tabela 4 – Ângulos horizontais das estações poligonais.

P. Ré	Estação	P.Vante	Ângulos Horizontais (gg°mm`ss,ss")	Precisão (")
P8	P1	P2	266°06`44,0"	4,8
P1	P2	P3	187°02`01,3"	4,4
P2	P3	P4	262°32`07,8"	3,9
P3	P4	P5	263°14`57,3"	3,1
P4	P5	P6	175°39`49,0"	3,4
P5	P6	P7	193°34`16,7"	2,1
P6	P7	P8	276°52`28,7"	6,8
P7	P8	P1	174°56`18,3"	5,4

Fonte: módulo Planialtimetria do software AstGeoTop. (GARNÉS, 2022a).

A Tabela 5, conforme a Figura 24, contém os ângulos zenitais reduzidos ao solo; a precisão de cada ângulo, conforme citado nos casos anteriores (distâncias inclinadas e ângulos horizontais), corresponde também ao desvio-padrão a partir das séries medidas em cada estação.

Tabela 5 – Ângulos zenitais reduzidos ao solo das estações poligonais.

Estação	P.Vante	Direção	Ângulos Zenitais (gg°mm`ss,ss")	Precisão (")
P1	P2	Z1	90°03`24,9"	6,8
P2	P3	Z2	90°03`48,9"	7,3
P3	P4	Z3	89°59`50,7"	2,6
P4	P5	Z4	90°09`20,0"	4,5
P5	P6	Z5	89°49`06,1"	7,4
P6	P7	Z6	90°12`48,1"	7,6
P7	P8	Z7	89°15`22,3"	8,4
P8	P1	Z8	90°07`40,5"	5,4

Fonte: módulo Ajustamento de Redes Geodésicas 3D do software AstGeoTop. (GARNÉS, 2022b).

Algumas das distâncias inclinadas GNSS utilizadas no ajustamento são dadas na Tabela 6. Na cor laranja são representadas distâncias inclinadas GNSS entre os vértices que não são intervisíveis entre si.

Tabela 6 – Distâncias inclinadas GNSS.

Est	P.Visado	Nome Lado	Distância Inclinada GNSS (m)	Precisão (m)
P1	P6	d104	226,609	0,002
P1	P7	d105	197,500	0,002
P2	P5	d107	163,738	0,002
P3	P5	d111	222,375	0,001
P4	P5	d4	173,460	0,004
P5	P6	d5	186,995	0,003
P1	P2	d1	282,939	0,000
P2	P3	d2	177,438	0,003
P3	P4	d3	120,257	0,003
P4	P5	d4	173,470	0,001
P5	P6	d5	186,997	0,001
P6	P7	d6	124,381	0,000
P7	P8	d7	71,512	0,001
P8	P1	d8	126,181	0,001
P1	P3	d101	459,548	0,002
P1	P4	d102	481,354	0,002
P1	P5	d103	331,120	0,002
P2	P4	d106	226,906	0,002
P2	P7	d109	360,826	0,002
P2	P8	d110	317,527	0,002
P3	P6	d112	397,181	0,002
P3	P7	d113	509,625	0,002
P3	P8	d114	479,065	0,002
P4	P6	d115	360,196	0,002
P4	P7	d116	482,714	0,002
P4	P8	d117	468,790	0,002
P5	P7	d118	309,275	0,002
P5	P8	d119	298,816	0,002
P6	P8	d120	135,856	0,002

Fonte: TOPCON TOOLS 7.5.1. Adaptada pelo autor (2022).

As coordenadas cartesianas geocêntricas dos Pontos de Referência (ou Apoio) (P1 a P8); da estação PERC da RBMC (Rede Ativa); e do ponto SAT GPS 91551 (Rede Passiva); e seus respectivos desvios-padrões são dados na Figura 28 (Capítulo 6. Resultados e Análises).

4.4.7 Coordenadas altimétricas dos vértices de referência

O *datum* altimétrico está referenciado ao Nível Médio dos Mares (NMM) materializado pelo marégrafo de Imbituba – SC. O nivelamento trigonométrico foi utilizado para a determinação das coordenadas altimétricas dos vértices de Referência e foi realizado em duas etapas. A etapa (a) consiste na determinação da altitude do ponto de referência P1; e a etapa (b) trata-se da determinação das coordenadas altimétricas dos pontos de referência P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8.

Para a determinação dos desníveis de precisão da etapa (a) foram utilizados uma estação total, um bastão graduado e um tripé com base nivelante. Utilizou-se da metodologia de nivelamento trigonométrico denominada *Leap Frog*, (CHRZANOWSKI, 1989), citada também por Moreira (2003) e Gomes *et al.*, (2007).

Na realização do nivelamento *Leap Frog*, a Estação Total foi instalada aproximadamente equidistante aos dois refletores, posicionadas nos pontos P1 e EPS03 em ré e vante, respectivamente; conforme ilustra a Figura a seguir. Portanto, o transporte altimétrico da RN_EPS03 para EPS03 e P1 utilizou bastão apoiado na RN_EPS03 e bases nivelantes instaladas nos vértices EPS03 e P1. O EPS03 é materializado por um pilar com centragem fixa modelo IBGE; e P1 é materializado com haste metálica, e por isso, a centragem neste vértice P1 é realizada com instalação de um tripé e base nivelante. As medições dos ângulos verticais e as distâncias inclinadas foram realizadas com duas séries de leituras nas posições direta e inversa utilizando a técnica de medição dos pares conjugados. Os dados foram processados em planilhas de cálculos desenvolvidas no *software* Excel Microsoft 365.

Figura 25 – Localização da Referência de Nível RN_EPS03, do ponto P9 e do ponto de referência P1.



Fonte: Imagem Google Earth (2020). Autor (2020).

*na Figura 25 acima, o ponto RN_EPS03 é situado na parte inferior do pilar EPS03 (marco geodésico da RRCM do campus Recife UFPE). Mais detalhes consultar Anexo A.2. Imagem Ponto Referência de Nível RN_EPS03.

As altitudes dos pontos P8, P7, P6, P5, P4, P3 e P2 foram calculadas a partir da altitude determinada para o ponto P1, empregando-se as equações descritas no capítulo 3, seção 3.8.3 equações 79 e 80, as mesmas dadas em Silva e Segantine (2015)¹¹, com visadas unilaterais com duas séries de leituras nas posições direta e inversa, utilizando a técnica de medição dos pares conjugados. Portanto, a metodologia utilizada segue a Norma ABNT NBR 13133 (1994) (pág. 18, Tabela 9), a qual especifica o método utilizado; método das direções: duas séries de leituras conjugadas direta e inversa, horizontal e vertical para Teodolito classe 2 (classe 2 conforme Norma ABNT NBR 13133 (1994)), isto é, de média precisão. Por esta norma, ABNT NBR 13133 (1994), a tolerância é dada por $T = 20 \text{ mm}\sqrt{K}$, na qual, K é a distância nivelada em Km, na qual se utiliza do nivelamento geométrico, (pág. 18, Tabela 9 da referida norma); entretanto, neste caso especificamente, foi utilizado o nivelamento trigonométrico.

Os dados da dissertação foram adquiridos em disciplina isolada cursada em 2019.2. Por causa da situação pandêmica causada pelo vírus SARS-CoV-2 iniciada no final do ano de 2019, o tema da dissertação foi adaptado; utilizando-se os dados coletados.

¹¹ equações (6.31) e (6.32), páginas 156 e 157 (SILVA e SEGANTINE, 2015), seção 6.6.1. Fórmula rigorosa para o nivelamento trigonométrico.

Para a nova versão da norma adotada, ABNT NBR 13133 (2021), a Estação Total utilizada nesta dissertação não se enquadra em nenhuma das três classificações de estações totais definida na Tabela 2 (da Norma ABNT NBR 13133 (2021), página 11), uma vez que a Estação Total utilizada possui $\pm 5''$ de precisão angular e $\pm(5\text{mm} + 5\text{ppm})$ de precisão linear. Linearmente, a Estação Total utilizada está fora das classificações, conforme Tabela 2 (da Norma ABNT NBR 13133 (2021), página 11). E angularmente esta se enquadra na classificação 3.

O nivelamento com a tecnologia GNSS, que se utiliza de modelo geoidal local acurado e altitudes geodésicas para os Pontos de Referência, por GNSS, propicia um parâmetro (referência) para cada altitude ortométrica calculada; contudo, este método de cálculo não foi utilizado para distâncias maiores que 2 km. Considera-se, neste caso, que as ondulações geoidais entre os pontos são muito próximas. Isto é possível pois se tem o conhecimento que para a área de estudo a variação da ondulação geoidal é pequena.

Uma comparação entre a altitude determinada por (modelo geoidal local e altitudes geodésicas GNSS – nivelamento GNSS) e, por meio do nivelamento trigonométrico é realizada. Apesar da área não possuir para os pontos de Referência (P1 a P8) altitudes ortométricas estabelecidas por nivelamento geométrico (altíssima precisão), o cálculo de um modelo geoidal local acurado (GARNÉS, 2017; LIMA, 2017) e altitudes geodésicas GNSS possibilitam a análise altimétrica do prédio (referência altimétrica adotada). Também se faz uso do MAPGEO2015, com a mesma finalidade.

5 MATERIAIS E MÉTODOS PARA A DEFINIÇÃO DE PONTOS-OBJETO

A avaliação posicional é efetuada conforme (SILVA, MONICO e ALVES, 2016; ANDRADE e ALVES, 2016; MORAES, ALVES e MONICO, 2012).

A determinação de pontos altos e inacessíveis (arestas), contidos nas estruturas arquitetônicas de edificações, e situados nas extremidades das fachadas de um prédio, delimitam a dimensão planialtimétrica da estrutura edificada.

O mapeamento e controle dimensional tridimensionais são necessários, entre outros casos, em reconstruções, alterações de projetos e avaliações de originais. Nesse contexto, esta dissertação considera a determinação de altitudes de pontos em edificações prediais, fundamentais para o desenvolvimento destes trabalhos.

5.1 DADOS GEODÉSICOS E MATERIAIS UTILIZADOS

Estas informações são citadas nas seções 4.2., Origem (Sistema Geodésico de Referência): Dados topográficos/ geodésicos conhecidos – marcos topográficos/ geodésicos pré-existent e 4.4.1, Materiais utilizados e respectivas precisões.

5.2 MEDIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS PONTOS – OBJETO PELOS MÉTODOS DE INTERSEÇÃO A VANTE, TRIANGULAÇÃO E INTERSEÇÃO ESPACIAL ANALÍTICA

Para esta dissertação foram utilizados os métodos da Interseção a Vante 2D com o uso do modelo descrito em (HÄBLER e WACHSMUTH 1984) e do modelo descrito em (KAHMEN e FAIG 1988, SILVA e SEGANTINE 2015), itens 3.4.4 (a), 3.4.4 (b); e da Triangulação, item 3.4.2.

5.2.1 Método da Interseção a Vante com centragem forçada e com excesso de visadas

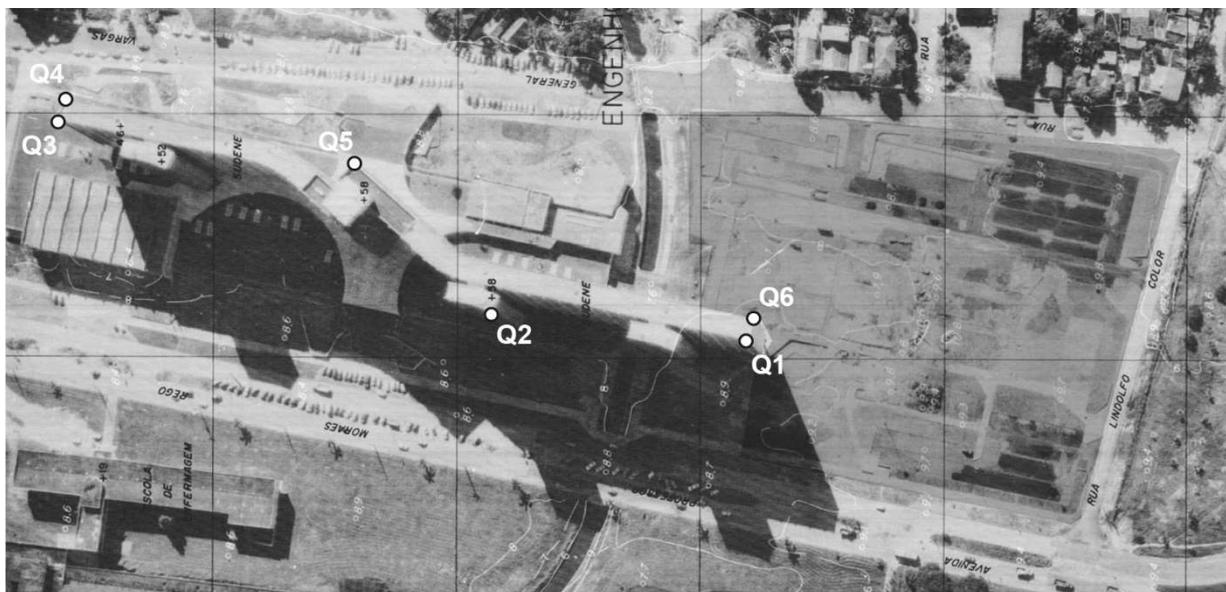
Com relação aos Pontos de Detalhes ou Pontos – Objeto, Q1, Q2, Q3, Q4, Q5 e Q6 (Figuras 26 e 27), utilizou-se a Estação Total Topcon GPT 3200N/NW com $\pm 5''$ de precisão angular e $\pm(5\text{mm} + 5\text{ppm}\cdot D)$ de precisão linear.

Estabelecidos os pontos de referência, iniciou-se a determinação dos Pontos – Objeto que representam as edificações Q1 a Q6 (arestas) situados nas extremidades das fachadas do prédio, os quais delimitam a dimensão planialtimétrica da estrutura edificada. Ainda com relação a estes pontos, com o propósito de verificar as dimensões do edifício foram escolhidos dois pontos situados na parte central da

edificação (Q2 e Q5) e os quatro pontos extremos das duas laterais (Q1, Q3, Q4 e Q6).

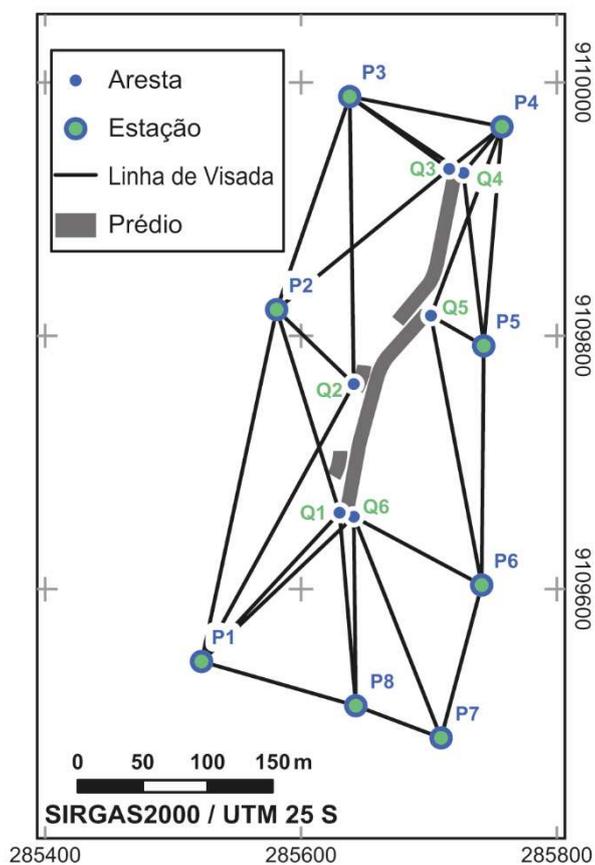
A localização destas arestas é vista nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 – Ortofotocarta da década de 70. Em destaque, o Edifício SUDENE com os Pontos de Detalhes medidos.



Fonte: Fidem, 1974. Editada pelo autor (2022).

Figura 27 – Geometria do método da Interseção a Vante com centragem forçada e excesso de visadas e, o objeto de estudo, o Edifício SUDENE com os Pontos de Detalhes medidos. Área definida pelas coordenadas plano-retangulares UTM (metros) em SIRGAS2000.



Fonte: Autor (2020).

As coordenadas dos pontos de Detalhes, arestas, foram determinadas pelo Método da Interseção a Vante com centragem forçada e com excesso de visadas, Figura 27, Tabelas 35 e 38; a Tabela 35 com o uso do modelo de interseção múltipla 2D descrito em (HÄBLER e WACHSMUTH 1984) e a Tabela 38 com o uso do modelo de interseção múltipla 2D descrito em (KAHMEN e FAIG 1988, SILVA e SEGANTINE 2015).

Para os pontos-objeto duas séries de leituras de ângulos verticais e horizontais nas posições direta e inversa foram realizadas.

Conforme citado na seção 4.4.5 (dois últimos parágrafos). Nesta dissertação são adotadas as coordenadas determinadas por medições com a tecnologia GNSS. Como referência para a determinação das coordenadas das interseções, as coordenadas no SGL e STL dos Pontos de Referência foram utilizadas. As interseções, por sua vez, são pontos altos e inacessíveis, arestas do Edifício SUDENE-PE. Para isso, a partir dos dados do levantamento, antes dos cálculos das interseções foram calculados os valores médios dos dados observados, ângulos horizontais e verticais.

Os Pontos de Detalhes, arestas, foram medidos a partir das visadas dos pontos de referência: o ponto de Detalhes 1, Q1, foi medido a partir dos pontos de referência P1, P2 e P8; o ponto Q2 foi medido a partir dos pontos de referência P1, P2, e P3; o ponto Q3 a partir de P2, P3 e P4; o ponto Q4 a partir de P3, P4 e P5; o ponto Q5 a partir de P4, P5 e P6 e o ponto Q6 a partir dos pontos P1, P6, P7 e P8.

Posteriormente a esta etapa inicial de determinação de interseções múltiplas 2D em coordenadas geodésicas locais são calculadas também as interseções com o uso das coordenadas topográficas planas locais; portanto, considerando-se o desvio da vertical do lugar para o ponto origem RECF. Neste sentido, se fez necessário primeiramente o cálculo das coordenadas astronômicas para todos os pontos (P1 a P8, PERC e SAT GPS 91551), dadas na Tabela 29 e por meio destas o cálculo das coordenadas topográficas planas locais, com origem no ponto RECF (Tabela 32).

5.2.2 Triangulação

Este método foi empregado para definição de Campo de pontos-objeto. Para a redundância de dados, nesta pesquisa os pontos-objeto foram levantados a partir de três vértices de observação para todos os pontos e, para o ponto Q6 a partir de quatro vértices. Ver seção 3.4.2. e último parágrafo da página 80.

As medições ocorreram aplicando-se o método de medição da Triangulação, utilizando a Estação Total Topcon GPT 3200N/NW (e respectivos acessórios, seção Materiais Utilizados e Respectivas Precisões). Os resultados obtidos são os mesmos para a Tabela 38.

5.2.3 Interseção Espacial Analítica

O cálculo de determinada aresta Q do Edifício SUDENE é realizado, por meio do método da distância mínima com a aplicação da Interseção Espacial Analítica para a determinação simultânea das coordenadas 3D. Primeiramente, por meio das altitudes ortométricas advindas do nivelamento trigonométrico (Tabela 33, seção 6.5) e em sequência, altitudes ortométricas por modelo geoidal local e altitudes geodésicas GNSS; no qual, este último possibilitou resultados mais consistentes com a realidade da edificação e portanto, altitudes adotadas como parâmetro de referência. São consideradas todas as visadas efetuadas para cada Ponto-Objeto.

As coordenadas altimétricas dos pontos Q1 a Q6, denominada etapa (c) citada no parágrafo anterior, na qual foram realizadas as medições em arestas do edifício para a definição de suas altitudes (seção 5.2.3); foram determinadas pelo Método da Interseção Espacial Analítica. Se referem, portanto, aos Pontos-Objeto; detalhes nas seções 6.7. à seção 6.8.1. Como resultado do método (Inters. Espacial Analítica (SILVA e SEGANTINE, 2015)), é dada a Tabela 40, a qual define as arestas da edificação por este método; permitindo assim também, simultaneamente, a determinação altimétrica do Edifício.

Outra análise aqui realizada é com o uso dos dados calculados pelo ajuste em Rede Geodésica 3D. Neste caso, apenas observações aos Pontos de Referência são consideradas para o ajustamento em rede 3D; (as observações aos pontos altos no ajustamento em rede 3D não são consideradas), este ajuste é descrito na seção 4.4.5., e este é utilizado para o cálculo das coordenadas tridimensionais de Pontos-Objeto com uso da Interseção Espacial Analítica.

As coordenadas dos Pontos de Referência obtidas com o ajuste em Rede Geodésica 3D, seções 4.4.5 e 6.3.2 (Tabela 17) também são utilizadas para cálculos da Interseção Espacial Analítica. Portanto, há neste caso, o uso da componente cartesiana Z (SGL) em substituição à altitude ortométrica para cálculo da altitude da edificação; a mesma é referenciada à origem do sistema, $SGL(\varphi_0, \lambda_0)$, $h = 4,217$ m (altitude geodésica) definida em MENDONÇA *et al.* (2010).

6 RESULTADOS E ANÁLISES PARA PONTOS DE REFERÊNCIA E PONTOS-OBJETO

Este capítulo aborda os resultados encontrados e discussão dos mesmos. As seções 6.1 a 6.5 se referem especificamente aos Pontos de Referência. As seções 6.6 a 6.9 se referem aos Pontos-Objeto.

6.1 RESULTADOS E ANÁLISES DOS PONTOS DE REFERÊNCIA MEDIDOS COM O MÉTODO DE POSICIONAMENTO GNSS RELATIVO ESTÁTICO

A Tabela 7 contém as coordenadas geodésicas e plano-retangulares UTM em SIRGAS2000 e respectivos desvios-padrões e desvios-padrões horizontais da estação SAT GPS 91551 e dos pontos P1 a P8 e PERC, adotando-se a estação PERC como referência. A área de trabalho se localiza na Zona UTM Sul 25: 36W a 30W.

Tabela 7 – Coordenadas geodésicas e plano-retangulares UTM em SIRGAS2000 e respectivos desvios-padrões e desvios-padrões horizontais adotando a estação de referência PERC.

PONTO	Coordenadas Geodésicas		Coordenadas plano-retangulares UTM		h (m)	σ_{ϕ} (m)	σ_{λ} (m)	Desv. PadrãoHz. (m)	σ_u (m)
	Latitude geodésica (gg°mm`ss,ss")	Longitude geodésica (gg°mm`ss,ss")	N (Norte) (m)	E (Este) (m)					
SAT GPS 91551	-08°03' 10,89697"	-34°57' 16,95361"	9.109.325,002	284.580,123	49,161	0,002	0,002	0,002	0,004
P1	-08°03' 03,89421"	-34°56' 46,16535"	9.109.544,667	285.521,961	2,932	0,002	0,002	0,002	0,004
P2	-8°02' 54,89109"	-34°56' 44,21868"	9.109.821,580	285.580,260	2,707	0,002	0,002	0,002	0,004
P3	-8°02' 49,43663"	-34°56' 42,31331"	9.109.989,451	285.637,814	2,567	0,002	0,002	0,002	0,004
P4	-8°02' 50,23224"	-34°56' 38,46834"	9.109.965,565	285.755,680	2,589	0,002	0,002	0,003	0,004
P5	-8°02' 55,85720"	-34°56' 38,95979"	9.109.792,661	285.741,451	2,174	0,002	0,002	0,002	0,004
P6	-8°03' 01,94366"	-34°56' 39,02794"	9.109.605,639	285.740,253	2,779	0,002	0,002	0,002	0,004
P7	-8°03' 05,86808"	-34°56' 40,02674"	9.109.484,912	285.710,239	2,324	0,002	0,002	0,003	0,005
P8	-8°03' 05,03021"	-34°56' 42,20537"	9.109.510,339	285.643,398	3,229	0,002	0,002	0,003	0,004
PERC	-8°03' 31,68320"	-34°57' 01,38486"	9.108.688,600	285.059,950	12,212	0,001	0,001	0,001	0,002

Fonte: TOPCON TOOLS 7.5.1. (2022).

À Rede GNSS considerando a estação PERC da RBMC como inunção horizontal e vertical, obteve-se como resultados as coordenadas (latitude, longitude e altitude geodésica) e respectivos desvios-padrões dos vértices de apoio; além destes, os erros de fechamento horizontais e verticais. Os erros para cada seção triangular entre a estação PERC, o vértice SAT GPS 91551 e cada vértice de apoio implantado separadamente e respectivos comprimentos dos vetores linhas de base são vistos na Tabela 8.

Tabela 8 – Erros de fechamento horizontais e verticais para cada seção triangular entre a estação PERC, o vértice SAT GPS 91551 e cada vértice de apoio implantado.

Seção	Erro Horizontal (m)	Erro Vertical (m)	Comprimento (m)
PERC – SAT GPS 91551;P1 – PERC;P1 – SAT GPS 91551	0,0014	0,0034	2738,4614
P2– SAT GPS 91551;P2 – PERC; PERC – SAT GPS 91551	0,0023	0,0031	3161,7164
P3– SAT GPS 91551;P3 – PERC; PERC – SAT GPS 91551	0,0045	0,0023	3470,7010
P4– SAT GPS 91551;P4 – PERC; PERC – SAT GPS 91551	0,0093	0,0066	3591,0623
PERC – SAT GPS 91551;P5 – PERC;P5 – SAT GPS 91551	0,0056	0,0000	3347,6478
P6 – SAT GPS 91551;P6 – PERC;PERC – SAT GPS 91551	0,0020	0,0034	3133,7073
PERC – SAT GPS 91551;P7 – PERC;P7 – SAT GPS 91551	0,0019	0,0063	2967,8619
P8 – SAT GPS 91551;P8 – PERC;PERC – SAT GPS 91551	0,0018	0,0049	2885,5147

Fonte: TOPCON TOOLS 7.5.1. (2022). Resultados apresentados como obtidos pelo software.

Nos Apêndices A e B são vistas, as Monografias da Rede Geodésica do Edifício SUDENE – Recife (PE) e um Relatório GNSS o qual disponibiliza o Sumário de Pontos, Ocupações e Observações GNSS e Ajustamento e Fechamento das Linhas de base, respectivamente.

Na Tabela 9 é vista uma parte das Observações GNSS; na qual, para as 30 linhas de bases GNSS formadas, são dadas Diferenças de Coordenadas, Desvios-padrões e Coeficientes de Correlação em coordenadas cartesianas geocêntricas. Mais detalhes sobre as linhas de bases GNSS formadas podem ser consultados no Apêndice B, Ocupações e Observações GNSS.

Tabela 9 – Diferenças de Coordenadas, Desvios-padrões e Coeficientes de Correlação em coordenadas cartesianas geocêntricas para as linhas de bases GNSS formadas.

Linha de base	Diferenças de Coordenadas entre os pontos da linha de base, Desvios-Padrões e coeficientes de correlação para as linhas de bases formadas (em Coordenadas cartesianas geocêntricas, Sistema Cartesiano Geocêntrico)								
	d X (m)	d Y (m)	d Z (m)	σ X (m)	σ Y (m)	σ Z (m)	CorrXY(m)	CorrXZ(m)	CorrYZ(m)
P1-P2	65,721	26,791	273,886	$\pm 0,003$	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	-0,6935	-0,03583	0,2732
P1-P8	65,688	102,019	-34,595	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	-0,6566	-0,6685	0,4182
P1-P6	131,932	174,423	59,354	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	-0,6943	-0,6400	0,5177
P1-SAT	-527,234	-781,655	-219,488	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	-0,6670	-0,4394	0,2644
P1-PERC	-357,470	-318,708	-846,586	$\pm 0,004$	$\pm 0,003$	$\pm 0,002$	-0,7102	-0,4066	0,2977
P1-P7	100,206	159,280	-59,957	$\pm 0,003$	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	-0,6423	-0,2406	0,0946
P2-P3	52,534	34,467	165,936	$\pm 0,003$	$\pm 0,002$	$\pm 0,002$	-0,6903	-0,7439	0,6416
P2-P6	66,228	147,613	-214,542	$\pm 0,003$	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	-0,5579	-0,4663	0,3447
P2-SAT	-592,943	-808,453	-493,379	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	-0,6264	-0,5278	0,4290
P2-PERC	-423,174	-345,511	-1120,478	$\pm 0,005$	$\pm 0,003$	$\pm 0,002$	-0,6462	-0,4175	0,2230
P2-P5	88,398	134,674	-29,315	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	-0,5650	-0,5486	0,4290
P3-P4	64,648	98,452	-24,205	$\pm 0,003$	$\pm 0,003$	$\pm 0,002$	-0,5332	-0,3713	0,6550
P3-SAT	-645,473	-842,920	-659,317	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	-0,6443	-0,4049	0,4539
P3-PERC	-475,707	-379,978	-1286,418	$\pm 0,005$	$\pm 0,004$	$\pm 0,002$	-0,6820	-0,3858	0,4009
P3-P5	35,859	100,212	-195,249	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	$\pm 0,000$	-0,5901	-0,4644	0,4053
P4-SAT	-710,120	-941,371	-635,111	$\pm 0,003$	$\pm 0,003$	$\pm 0,002$	-0,6066	-0,4546	0,6728
P4-PERC	-540,352	-478,434	-1262,218	$\pm 0,007$	$\pm 0,006$	$\pm 0,004$	-0,5755	-0,3459	0,6584
P4-P5	-28,794	1,756	-171,045	$\pm 0,003$	$\pm 0,003$	$\pm 0,002$	-0,2972	-0,3520	0,6606
P5-P6	-22,164	12,946	-185,225	$\pm 0,002$	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	-0,4473	-0,3805	0,3600
P5-SAT	-681,336	-943,130	-464,067	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	-0,5044	-0,5123	0,3771

Fonte: TOPCON TOOLS 7.5.1. (2022). Resultados apresentados como obtidos pelo software.

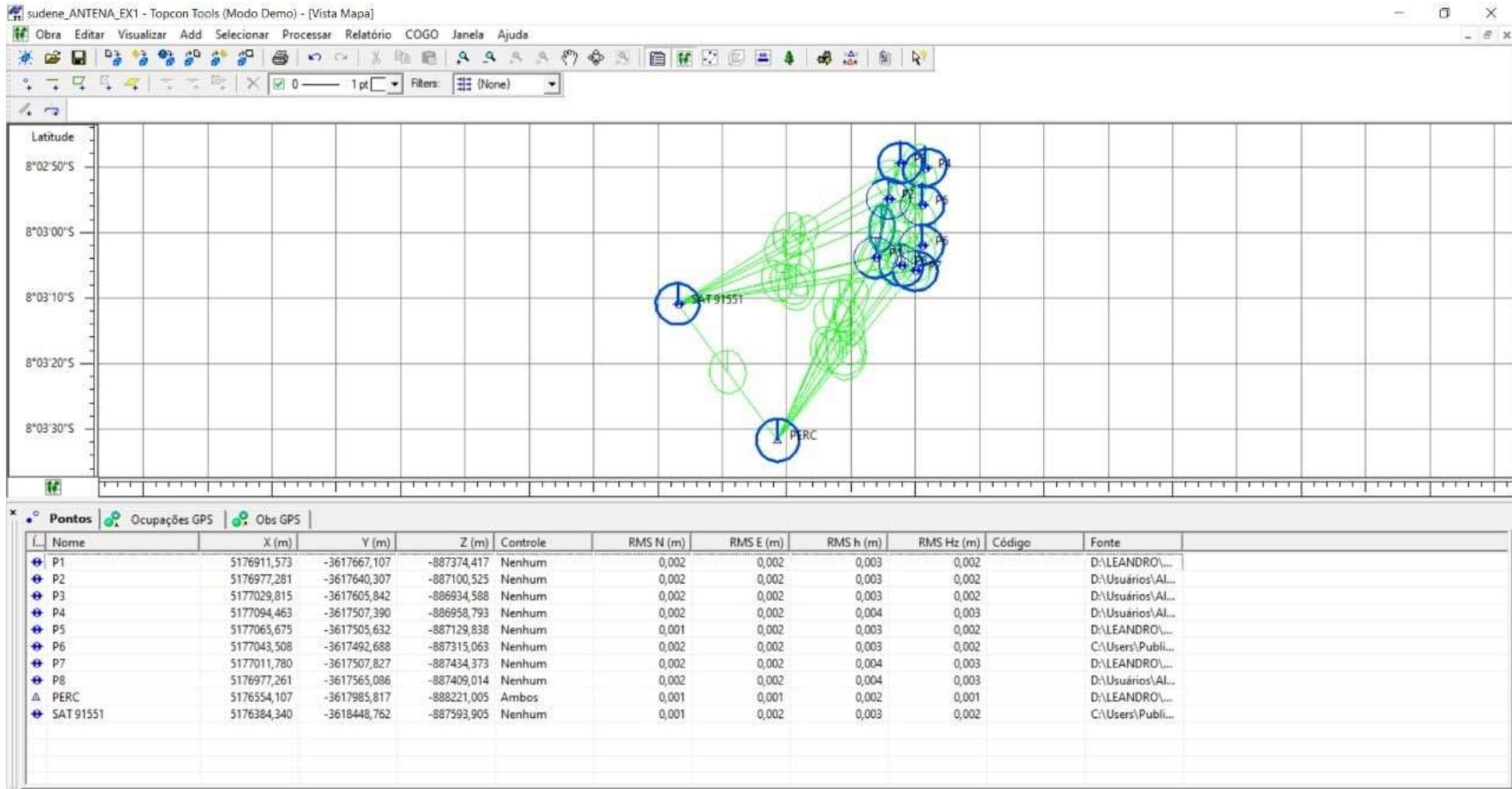
Tabela 9 – Diferenças de Coordenadas, Desvios-padrões e Coeficientes de Correlação em coordenadas cartesianas geocêntricas para as linhas de bases GNSS formadas - continuação.

Linha de base	Diferenças de Coordenadas entre os pontos da linha de base, Desvios-Padrões e coeficientes de correlação para as linhas de bases formadas (em Coordenadas cartesianas geocêntricas, Sistema Cartesiano Geocêntrico)								
	d X (m)	d Y (m)	d Z (m)	σ X (m)	σ Y (m)	σ Z (m)	CorrXY(m)	CorrXZ(m)	CorrYZ(m)
P5-PERC	-511,571	-480,188	-1091,168	$\pm 0,004$	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	-0,4819	-0,4611	0,2395
P6-SAT	-659,167	-956,072	-278,844	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	-0,6121	-0,4657	0,3782
P6-PERC	-489,398	-493,130	-905,943	$\pm 0,005$	$\pm 0,003$	$\pm 0,002$	-0,6041	-0,4799	0,3521
P6-P7	-31,742	-15,126	-119,307	$\pm 0,010$	$\pm 0,005$	$\pm 0,003$	-0,7111	-0,2217	0,2178
P7-P8	-34,521	-57,254	25,354	$\pm 0,008$	$\pm 0,004$	$\pm 0,004$	-0,6547	-0,3837	0,0724
P7-SAT	-627,445	-940,934	-159,530	$\pm 0,006$	$\pm 0,003$	$\pm 0,002$	-0,6750	-0,2549	0,1426
P7-PERC	-457,683	-477,984	-786,631	$\pm 0,010$	$\pm 0,006$	$\pm 0,004$	-0,6690	-0,2371	0,1640
P8-SAT	-592,920	-883,678	-184,888	$\pm 0,003$	$\pm 0,002$	$\pm 0,002$	-0,6524	-0,5672	0,3147
P8-PERC	-423,148	-420,733	-811,988	$\pm 0,012$	$\pm 0,008$	$\pm 0,006$	-0,7242	-0,6086	0,4367
PERC-SAT	-169,767	-462,946	627,100	$\pm 0,003$	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	-0,6935	-0,3583	0,2732

Fonte: TOPCON TOOLS 7.5.1. (2022). Resultados apresentados como obtidos pelo software.

A Figura 28 representa o levantamento com o método de posicionamento GNSS Relativo Estático e as coordenadas cartesianas geocêntricas em SIRGAS2000 dos pontos P1 a P8, PERC e SAT GPS 91551.

Figura 28 – Levantamento GNSS e Coordenadas Cartesianas Geocêntricas dos Pontos de Referência (ou Apoio) (P1 a P8), da estação da RBMC (Rede Ativa) PERC, e do ponto SAT GPS 91551 (Rede Passiva).



Fonte: TOPCON TOOLS 7.5.1. Adaptada pelo autor (2022).

6.1.1 Considerações e Análise dos Resultados

Os valores dos desvios-padrões para os pontos de referência, obtidos por meio do processamento e ajustamento dos dados GNSS, apresentam conforme a Tabela 7, são de 2 mm para a planimetria. Para a altimetria os desvios-padrões estão entre 4 mm e 5 mm. Dados coletados com receptores de dupla frequência (L1 e L2), adotando como referência as coordenadas da Estação de Referência PERC (RBMC) para ambos os controles (vertical e horizontal).

Uma observação a ser considerada do ponto de vista do processamento e ajustamento dos dados é o nível de acurácia das estações de referência. O ideal seria se ter no mínimo duas estações de referência de mesma ordem de acurácia e realizar o processamento para a área de interesse, isto não foi possível para a área de estudo devido às distâncias entre esta área e as estações de referência da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC). Para a situação da área de trabalho, o método adotado consistiu em realizar o processamento e ajustamento usando somente a estação de referência PERC, uma vez que as estações PBJP (João Pessoa) e PBCG (Campina Grande) estão muito distantes, e a distância entre a estação PERC em relação ao ponto P1 é menor que 1km (972,660m).

Considerando-se os valores dos desvios-padrões horizontal e vertical da Tabela 7; as coordenadas dos Pontos de Referência, determinadas pela estratégia de processamento adotada, foram usadas para determinar as coordenadas geodésicas locais (SGL) (ou ainda, coordenadas geodésicas cartesianas no referencial local) dos pontos de referência para a área de trabalho (pontos P1 a P8).

Determinadas as coordenadas geodésicas locais, com origem definida conforme seção 4.2. e 4.4.3.; posteriormente, para o levantamento topográfico utilizando o método da Poligonação, no cálculo e ajuste dos dados as coordenadas dos pontos de referência são empregadas, seções 6.3.1. e 6.3.4.

Os pontos P1 a P8 serviram para a determinação das coordenadas dos pontos de detalhes do Edifício SUDENE, um Campo de Pontos – Objeto do Edifício SUDENE. Os valores de desvios-padrões encontrados para os pontos P1 a P8 apresentam valores condizentes com a Lei n.º 9.310, de 15 de março de 2018 (BRASIL, 2018); a qual, trata entre outros temas, de instituir as normas gerais e os procedimentos aplicáveis à Regularização Fundiária Urbana. Esta considera uma tolerância posicional em torno de 0,05 m (50 mm) para os pontos de referência. E para

os pontos de limite de imóvel a tolerância posicional é de 0,08 m (80 mm) (BRASIL, 2018).

Com relação aos erros de fechamento horizontais e verticais determinados, Tabela 8, os maiores resultados nesta pesquisa são 9,3 mm para o erro de fechamento horizontal correspondendo a seção P4– SAT GPS 91551; P4 – PERC; PERC – SAT GPS 91551 e para o erro vertical, também correspondente à mesma seção, com o erro de 6,6 mm.

6.2 TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS CARTESIANAS GEOCÊNTRICAS SIRGAS2000 EM COORDENADAS CARTESIANAS NO SISTEMA GEODÉSICO LOCAL (SGL)

Às coordenadas geodésicas dos pontos, dadas anteriormente (e, portanto, já citadas) (Tabela 7) acrescenta-se o ponto RECF (origem do Sistema Geodésico Local).

Com o uso das coordenadas geodésicas há a possibilidade de cálculo das coordenadas cartesianas geocêntricas utilizadas nas fórmulas (e vistas na Figura 28), caso as mesmas não sejam dadas por software de processamento. Utiliza-se, portanto, as coordenadas geodésicas em SIRGAS2000, determinadas (GNSS) e para o ponto escolhido para origem do SGL, ponto RECF, para a transformação em coordenadas geodésicas cartesianas no referencial local.

Para os pontos P1 a P8, PERC e ponto SAT GPS 91551 suas coordenadas foram transformadas para o Sistema Geodésico Local (SGL) conforme, seção 4.2. item a). Utilizou-se como origem do sistema a posição horizontal (φ_0 , λ_0) do ponto RECF e a posição vertical como (a média das altitudes geodésicas dos vértices EPS1, EPS2,...,EPS7), pertencentes à rede cadastral do campus Recife Joaquim Amazonas da UFPE (MENDONÇA et al., 2010). A Tabela 10 contém os resultados da transformação.

Tabela 10 – Pontos de Referência para a Poligonação com centragem forçada.

Estação	Coordenadas geodésicas locais (advindas do Pos. GNSS Relativo Estático e modelos de transformação (WOLF e DEWITT, 2000) (FAZAN, 2007)) e respectivos desvios-padrões			
	X (m)	σ_x (m)	Y (m)	σ_y (m)
SAT GPS 91551	149.648,045	$\pm 0,002$	249.771,822	$\pm 0,003$
P1	150.590,761	$\pm 0,002$	249.986,954	$\pm 0,003$
P2	150.650,371	$\pm 0,002$	250.263,540	$\pm 0,003$
P3	150.708,715	$\pm 0,002$	250.431,106	$\pm 0,003$
P4	150.826,446	$\pm 0,002$	250.406,662	$\pm 0,004$
P5	150.811,395	$\pm 0,002$	250.233,857	$\pm 0,003$
P6	150.809,305	$\pm 0,002$	250.046,874	$\pm 0,003$
P7	150.778,720	$\pm 0,002$	249.926,312	$\pm 0,004$
P8	150.712,013	$\pm 0,002$	249.952,053	$\pm 0,004$
PERC	150.124,748	$\pm 0,001$	249.133,247	$\pm 0,002$
RECF	150.000,000		250.000,000	

Fonte: Autor (2022).

A propagação de covariâncias, apresentada na Tabela 10, e descrita em (GEMAEL, 1994), (GHILANI e WOLF, 2006) foram calculadas pelas equações dadas em (SOUZA, W., 2012), seção 2.5.7, equações (24) e (25).

6.3 PROCESSAMENTO E COMPENSAÇÕES OU AJUSTAMENTOS DOS DADOS MEDIDOS COM ESTAÇÃO TOTAL

Nesta seção, o item 6.3.1. refere-se ao cálculo e compensação da Poligonal Fechada. O item 6.3.2. trata especificamente do ajustamento em Rede Geodésica 3D, apenas considerando-se as coordenadas GNSS transformadas por modelo baseado em rotações e translações, dado por (WOLF e DEWITT, 2000); (transformação de coordenadas no referencial geodésico cartesiano para o referencial cartesiano local (SGL)), ou seja, sem a inclusão das distâncias inclinadas GNSS aos dados ajustados; no item 6.3.2.1. considera-se além das coord. GNSS transformadas a inclusão das distâncias inclinadas GNSS ao ajustamento em Rede Geodésica 3D. No item 6.3.3. descreve-se o cálculo e ajuste da Poligonal Enquadrada. Por último, item 6.3.3.1., corresponde às considerações e análise dos resultados da seção 6.3.3.

6.3.1 Método Tradicional - Poligonal Fechada

A Tabela 11 mostra os elementos médios calculados a partir da caderneta de campo apresentada no Apêndice D.1. O processamento para se obter as médias

das séries dos ângulos, distâncias e diferenças de nível foi realizado no módulo Planialtimetria do software AstGeoTop (GARNÉS, 2022a).

Tabela 11 – Elementos da Poligonal Fechada.

Est	Ré	Âng. Hor. (gg°mm`ss,ss")	Dist. Hor. (m)	dh (m)	Vante	Âng. Hor. (gg°mm`ss,ss")	Dist. Hor. (m)	dh (m)
P1	P8	0°00`00,0"	126,180	0,316	P2	266°06`44,0"	282,939	-0,280
P2	P1	0°00`00,0"	282,940	0,258	P3	187°02`01,2"	177,439	-0,197
P3	P2	0°00`00,0"	177,438	0,114	P4	262°32`07,7"	120,257	0,005
P4	P3	0°00`00,0"	120,255	-0,040	P5	263°14`57,3"	173,469	-0,471
P5	P4	0°00`00,0"	173,467	0,396	P6	175°39`49,0"	186,996	0,593
P6	P5	0°00`00,0"	186,997	-0,646	P7	193°34`16,7"	124,380	-0,463
P7	P6	0°00`00,0"	124,381	0,456	P8	276°52`28,8"	71,506	0,928
P8	P7	0°00`00,0"	71,508	-0,915	P1	174°56`18,3"	126,181	-0,281

Fonte: módulo Planialtimetria do software AstGeoTop. (GARNÉS, 2022a).

O módulo Planialtimetria permite o cálculo e compensação da poligonal fechada; neste módulo são inseridos dados de entrada, assim como a origem do SGL, neste não são consideradas as componentes do desvio da vertical.

Para esta dissertação e, portanto, para os cálculos da poligonal; utilizou-se como origem do sistema a origem do SGL da Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM) campus Recife da UFPE.

Conforme descrito no item 4.2., letra a), a origem é definida no ponto RECF, origem do SGL(φ_0 , λ_0), $h = 4,217$ m (MENDONÇA *et al.* 2010). As coordenadas geodésicas do ponto RECF são $\varphi_0 = -8,050963806^\circ$ e $\lambda_0 = -34,951516420^\circ$ no Sistema Geodésico SIRGAS2000, elipsoide GRS1980. Ou ainda, em graus, minutos e segundos, $\varphi_0 = 08^\circ 03' 03,46970''$ S e $\lambda_0 = 34^\circ 57' 05,45910''$ W; mais detalhes, consultar item 4.4.3.

Pontos da poligonal também foram levantados por GNSS, cujas coordenadas são dadas na Tabela 7 (coordenadas geodésicas). Utilizando para a orientação no georreferenciamento da poligonal os pontos P3 e P7, conforme ilustra a Figura 29, as coordenadas no SGL (Tabela 10) nesses dois pontos foram calculadas e permitiram rotacionar e transladar as coordenadas calculadas em um sistema arbitrário provisório.

Figura 29 – Elementos para o georreferenciamento da poligonal.

Fonte: módulo Planialtimetria do software AstGeoTop. (GARNÉS, 2022a).

Com isso, o azimute inicial Az_{P1-P2} da poligonal resultou $Az_{P1-P2} = 12^{\circ}09'43,7''$ e as coordenadas do ponto P1 foram $H_{P1} = 2,9717$ m, $X_{P1} = 150590,7564$ m, e $Y_{P1} = 249986,9304$ m. Na Tabela 12 as coordenadas da poligonal fechada são compensadas pelo método proporcional aos lados (compensação linear). A compensação angular é calculada pelo Inverso dos lados adjacentes. Nesta versão do *software* AstGeoTop a opção Ajustar pelo MMQ Paramétrico não está disponível.

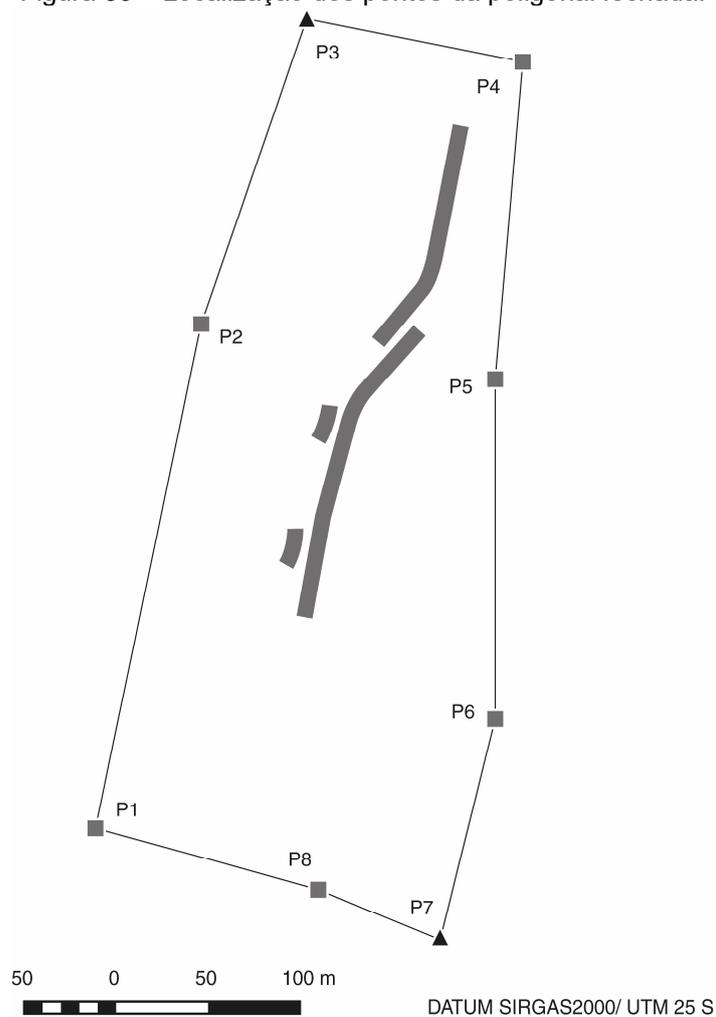
Tabela 12 – Coordenadas da poligonal compensadas pelo método proporcional aos lados (compensação linear) e compensação angular calculada pelo Inverso dos lados adjacentes.

Est	P. Vis	Ângulo (gg°mm`ss,ss")	Distância (m)	Azimute (gg°mm`ss,ss")	Coordenadas Totais		
					X(m)	Y(m)	H(m)
P1	P2	266°06`52,0"	282,949	12°09`43,7"	150.590,7564	249.986,9304	2,9717
P2	P3	187°02`06,3"	177,445	19°11`50,0"	150.650,3677	250.263,5283	2,7146
P3	P4	262°32`03,0"	120,261	101°43`53,1"	150.708,7154	250.431,1063	2,5670
P4	P5	263°15`05,0"	173,464	184°58`58,0"	150.826,4645	250.406,6543	2,5941
P5	P6	175°39`57,6"	186,992	180°38`55,6"	150.811,3981	250.233,8461	2,1683
P6	P7	193°34`27,1"	124,376	194°13`22,7"	150.809,2807	250.046,8661	2,7952
P7	P8	276°52`59,0"	71,504	291°06`21,7"	150.778,7220	249.926,3026	2,3404
P8	P1	174°56`30,1"	126,175	286°02`51,7"	150.712,0145	249.952,0509	3,2644

Fonte: módulo Planialtimetria do software AstGeoTop. (GARNÉS, 2022a).

A Figura 30 mostra a localização dos pontos da poligonal fechada.

Figura 30 – Localização dos pontos da poligonal fechada.



Fonte: Autor (2022).

Os pontos P1, P2, ..., P8 calculados e apresentados no Tabela 12 servirão de parâmetros aproximados (ou parâmetros iniciais) para uma análise mais detalhada no ajustamento em rede, no qual deverão entrar equações de distâncias inclinadas GNSS no processamento.

Detalhes da poligonal fechada compensada com o uso do software AstGeoTop são dados no Apêndice C. O resultado do fechamento da poligonal é dado abaixo (Tabela 13):

Tabela 13 – Elementos e Quantidades de Fechamento da Poligonal.

Elementos da Poligonal	
Tipo de Poligonal:	Fechada
Número de vértices:	8
Soma dos ângulos =	1799°58`43,0"
Perímetro (m) =	1263,166
Quantidades de Fechamento da Poligonal	
Erro fech. ang. =	-0°01`17,0"
Erros lineares sem compensação angular	
Erro em X (m) =	-0,048
Erro em Y (m) =	-0,069
Erro em h (m) =	-0,053
Erro Linear Horizontal (m) =	0,085
Precisão Relativa =	1/14837,80 \cong 1/14837

Fonte: módulo Planialtimetria do software AstGeoTop. (GARNÉS, 2022a).

Como citado na seção 4.4.7., os dados da dissertação foram adquiridos em disciplina isolada cursada em 2019.2. Por causa da situação pandêmica causada pelo vírus SARS-CoV-2 iniciada no final do ano de 2019, o tema da dissertação foi adaptado; utilizando-se os dados coletados. Na Tabela 13, há um erro de fechamento angular alto. Mais análises com estes mesmos dados são realizadas na seção 6.3.3., que se refere à Poligonal Enquadrada.

6.3.2 Ajustamento das observações em rede por medidas dos métodos clássicos topográficos

O ajustamento das observações pelo método clássico em rede foi realizado utilizando o módulo Ajustamento de rede 3D do software AstGeoTop (GARNÉS, 2022b). Os ângulos zenitais e as distâncias inclinadas a serem utilizados no módulo são reduzidos ao solo, conforme ilustra a Figura 24.

A fim de verificar os resultados do ajustamento em rede 3D comparado com a compensação pelo método tradicional apresentado na Tabela 12, são inseridas apenas as injunções de geometria mínimas, às quais foram também utilizadas para se chegar ao resultado da Tabela 12. O Ponto de injunção inicial foi o ponto P3, conforme ilustra a Figura 31, pois foi o primeiro ponto de controle utilizado, sendo que o programa (AstGeoTop) o usa como referência para translação do sistema arbitrário inicial. A segunda injunção inicial para que a poligonal possa ser calculada trata-se do azimute de uma direção, no caso a injunção de direção a ser utilizada será o azimute AZ_{P3-P7}. A Tabela 14 mostra os pontos P3 e P7 em coordenadas geodésicas e o correspondente azimute geodésico de P3 e P7.

Tabela 14 – Injunções iniciais para o cálculo da poligonal fechada.

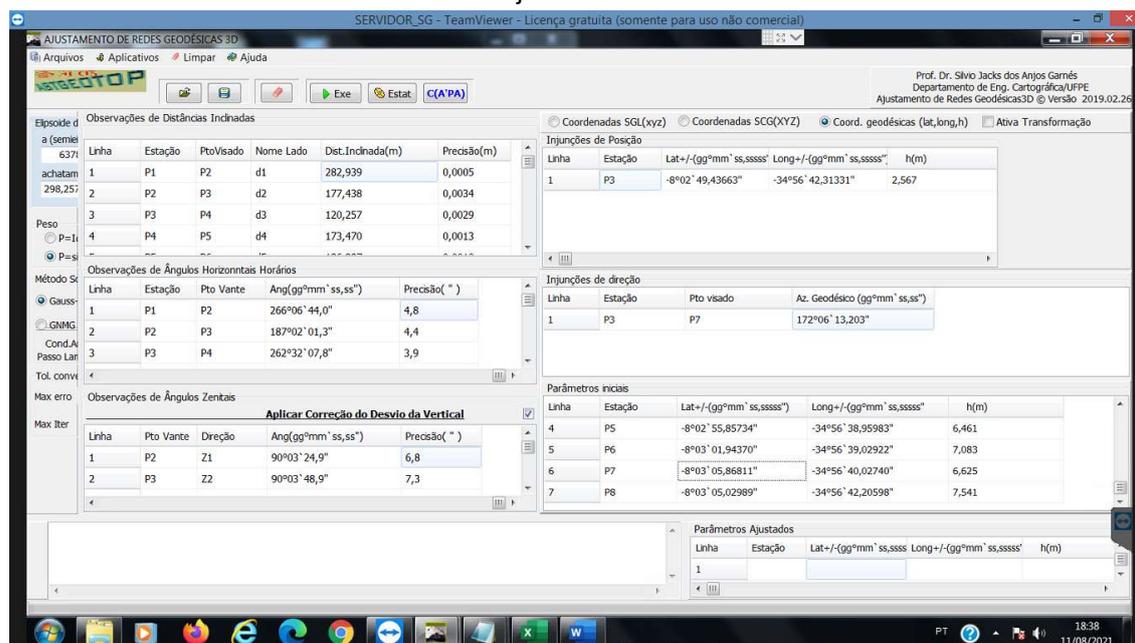
Estação	Latitude geodésica (gg°mm`ss,ss")			Longitude geodésica (gg°mm`ss,ss")			Altitude geodésica(h) (m)	
P3	-08	02	49,43663	-34	56	42,31331	2,5670	
P7	-08	03	05,86808	-34	56	40,02674	2,3240	
Estação	Pt. visado	Azimute (gg°mm`ss,ss")		Contra-Azimute (gg°mm`ss,ss")		Geodésica (m)		
P3	P7	172	06	13,203	352	06	12,883	509,625

Fonte: software AstGeoTop. (GARNÉS, 2022).

*Azimute, Contra-Azimute e Geodésica entre os pontos P3 e P7 calculados em módulos do software AstGeoTop (GARNÉS, 2022). Neste caso, utiliza-se o Problema Geodésico Inverso; neste tem-se a situação em que as coordenadas dos pontos, inicial e final, são conhecidas e deseja-se conhecer os azimutes de 1 para 2, de 2 para 1 e a distância entre os dois pontos. O software AstGeoTop considera para os cálculos do Problema Geodésico Inverso o método de Gauss pela latitude média.

Portanto, utilizando-se as coordenadas de P3 como injunção de posição e o Azimute AzP3-P7 como injunção de direção e inserindo-se as coordenadas aproximadas (parâmetros aproximados) dos vértices, com exceção ao ponto P3 que passou a ser fixo por causa da injunção, pode-se proceder os cálculos. A Figura 31 ilustra como fica a tela do módulo de ajustamento de rede do AstGeoTop para iniciar o processamento.

Figura 31 – Tela do software AstGeoTop com disposição dos elementos de entrada para proceder o ajustamento.



Fonte: módulo Ajustamento de Redes Geodésicas 3D do software AstGeoTop. (GARNÉS, 2022b).

A Figura 31 ilustra dados de entrada para o modelo de ajuste em rede 3D; para tanto, dispõe-se de distâncias inclinadas, ângulos horizontais, ângulos verticais zenitais, injunções de posição, injunções de direção e parâmetros iniciais.

A solução do ajustamento em rede 3D por processo iterativo do método de Gauss-Newton Modificado Globalizado (GNMG) é dada abaixo (Tabela 15). Neste caso, especificamente, durante a execução deste módulo, entre as observações utilizadas, os ângulos zenital de P5 para P6, e horizontais de P7 para P8 e de P1 para P2 foram retirados do ajustamento.

Tabela 15 – Ajustamento em rede 3D por processo iterativo do método de Gauss-Newton Modificado Globalizado.

Resultados do método de Gauss-Newton Modificado Globalizado (GNMG)	
Número de observações:	21
Número de parâmetros:	21
Nº de Injunções de direção:	1
Graus de liberdade:	1
Nº de iterações realizadas:	5
Gradiente de $f(x)=r(x)^T P r(x)$:	0,256740988762581
Passo na última iteração $ dX $:	0
Valor da função objetivo $f(x)$:	3,07609020347763
Valor do modelo quadrático v^{tpv} :	3,07609020347763
Var. da unid. Peso a posteriori (σ_2):	1

Fonte: módulo Ajustamento de Redes Geodésicas 3D do software AstGeoTop. (GARNÉS, 2022b).

Os parâmetros (coordenadas ajustadas) são dadas na Tabela 16, na qual o ponto P3 é junção. Com relação à Tabela 16, com o cálculo das coordenadas geodésicas dos pontos pelo ajuste em Rede Geodésica 3D, estas são transformadas para astronômicas com o uso do desvio vertical do lugar por meio de planilhas de cálculo. Obtém-se assim as coordenadas astronômicas em graus decimais. Posteriormente, estas são transformadas em topográficas planas locais com uso das coord. astronômicas do ponto RECF. Mesma metodologia utilizada nas seções 2.5.8 e 6.4.

Tabela 16 – Resultados Referentes aos Parâmetros.

Coordenadas geodésicas locais e respectivos desvios-padrões						
Estação	X (m)	σ_x (m)	Y (m)	σ_y (m)	Z (m)	σ_z (m)
P1	150.590,761	$\pm 0,001$	249.986,946	$\pm 0,003$	-1,206	$\pm 0,011$
P2	150.650,370	$\pm 0,002$	250.263,534	$\pm 0,003$	-1,493	$\pm 0,006$
P4	150.826,458	$\pm 0,002$	250.406,650	$\pm 0,001$	-1,710	$\pm 0,001$
P5	150.811,388	$\pm 0,002$	250.233,837	$\pm 0,002$	-2,168	$\pm 0,004$
P6	150.809,275	$\pm 0,001$	250.046,853	$\pm 0,002$	-1,416	$\pm 0,012$
P7	150.778,723	$\pm 0,000$	249.926,284	$\pm 0,002$	-1,875	$\pm 0,012$
P8	150.712,019	$\pm 0,001$	249.952,046	$\pm 0,002$	-0,938	$\pm 0,011$
P3	150.708,715	-	250.431,106	-	-1,704	-
Coordenadas topográficas planas locais (Componentes planimétricas) e respectivos desvios-padrões						
Estação	X (m)	σ_x (m)	Y (m)	σ_y (m)		
P1	150.590,761	$\pm 0,001$	249.986,949	$\pm 0,003$		
P2	150.650,369	$\pm 0,002$	250.263,538	$\pm 0,003$		
P4	150.826,455	$\pm 0,002$	250.406,654	$\pm 0,001$		
P5	150.811,388	$\pm 0,002$	250.233,842	$\pm 0,002$		
P6	150.809,275	$\pm 0,001$	250.046,857	$\pm 0,002$		
P7	150.778,723	$\pm 0,000$	249.926,288	$\pm 0,002$		
P8	150.712,019	$\pm 0,001$	249.952,050	$\pm 0,002$		
P3	150.708,715	-	250.431,106	-		
RECF	150.000,000		250.000,000			

Fonte: módulo Ajustamento de Redes Geodésicas 3D do software AstGeoTop. (GARNÉS, 2022b).

O erro esférico calculado para as mesmas estações é dado na Tabela 17.

Tabela 17 – Erro esférico no Sistema Geodésico Local.

Estação	Erro esférico (SGL)	
	E. esférico = $\text{raiz}((sx)^2+(sy)^2)$ (m)	E. esférico = $\text{raiz}((sx)^2+(sy)^2+(sz)^2)$ (m)
P1	0,003	0,012
P2	0,004	0,007
P4	0,002	0,003
P5	0,003	0,005
P6	0,002	0,013
P7	0,002	0,012
P8	0,002	0,012

Fonte: módulo Ajustamento de Redes Geodésicas 3D do software AstGeoTop. (GARNÉS, 2022b).

Com relação aos resultados apresentados, Tabelas 15 a 17, estes são os menores valores calculados entre os procedimentos de ajustamento (seções 6.3.2, 6.3.2.1.). Portanto, apesar do valor do modelo quadrático $v^{\prime}pv$ não ser mais próximo da variância da unidade de Peso a posteriori, que neste caso é igual a 1 (Tabela 15), é o menor valor calculado entre todos os procedimentos de ajustamento, indicando a acurácia do ajustamento. Os desvios-padrões altimétricos dos pontos P6 e P7 (0,012 m), e P8 e P1 (0,011 m) (Tabela 16) apresentam valores acima do esperado, mas em concordância com o erro altimétrico, dado na Tabela 13, de -0,053 m. Neste sentido, os erros esféricos para estes pontos são mais elevados.

6.3.2.1 Ajustamento das Observações em Rede por Medidas dos Métodos Clássicos Topográficos e com uso das Distâncias Inclinadas GNSS

Posteriormente, com a mesma metodologia descrita na seção anterior (rede 3D e dados da poligonal fechada), são acrescentadas ainda 14 distâncias inclinadas GNSS, dist. P1-P6 até P8-P1 (Tabela 6); entretanto, nesta etapa, apenas algumas das distâncias GNSS são utilizadas no ajustamento. Visto que as distâncias são apenas parte das observações utilizadas; mais à frente, isto é, a partir de vários processamentos, verificou-se que o restante das distâncias inclinadas GNSS acrescentadas não apresentaram diferença significativa com relação aos resultados apresentados nesta seção.

Neste item, 6.3.2.1, durante a execução do módulo Ajustamento de Redes Geodésicas 3D (software AstGeoTop), o ângulo horizontal da estação P1 para o ponto visado P2 e os ângulos verticais zenitais P5-P6, P6-P7 e de P7 para P8 não foram incluídos no ajustamento; pois o software evidencia quais as observações apresentaram os maiores desvios-padrões durante a etapa de ajuste, indicando, portanto, pela não inclusão destas observações ao ajuste (conforme processamentos realizados). O resultado deste processamento é visto na Tabela 18.

Tabela 18 – Ajustamento em rede 3D por processo iterativo do método de Gauss-Newton Modificado Globalizado.

Resultados do método de Gauss-Newton Modificado Globalizado (GNMG)	
Número de observações:	31
Número de parâmetros:	21
Nº de Injunções de direção:	1
Graus de liberdade:	11
Nº de iterações realizadas:	7
Gradiente de $f(x)=r(x) \cdot P r(x)$:	2,67360059743697
Passo na última iteração $ dX $:	7,55917911178238E-21
Valor da função objetivo $f(x_a)$:	65,7231052443729
Valor do modelo quadrático v^{tpv} :	65,7231052443729
Var. da unid. Peso a posteriori (sig2):	5,47692543703107

Fonte: módulo Ajustamento de Redes Geodésicas 3D do software AstGeoTop. (GARNÉS, 2022b).

Os parâmetros, vistos na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultados Referentes aos Parâmetros.

Coordenadas geodésicas locais e respectivos desvios-padrões						
Estação	X (m)	σ_x (m)	Y (m)	σ_y (m)	Z (m)	σ_z (m)
P1	150.590,729	±0,005	249.986,955	±0,006	-1,206	±0,026
P2	150.650,357	±0,005	250.263,539	±0,006	-1,493	±0,014
P4	150.826,449	±0,004	250.406,650	±0,004	-1,710	±0,003
P5	150.811,373	±0,006	250.233,842	±0,003	-2,168	±0,009
P6	150.809,252	±0,008	250.046,892	±0,006	1,465	±0,422
P7	150.778,709	±0,004	249.926,382	±0,031	-2,417	±0,510
P8	150.712,002	±0,004	249.952,111	±0,019	-0,938	±0,027
RECF		150.000,000			250.000,000	

Fonte: módulo Ajustamento de Redes Geodésicas 3D do software AstGeoTop. (GARNÉS, 2022b).

E os erros esféricos na Tabela 20.

Tabela 20 – Erro esférico no Sistema Geodésico Local.

Erro esférico (SGL)		
Estação	E. esférico = raiz((sx)²+(sy)²) (m)	E. esférico = raiz((sx)²+(sy)²+(sz)²) (m)
P1	0,008	0,027
P2	0,008	0,016
P4	0,006	0,007
P5	0,007	0,012
P6	0,010	0,422
P7	0,031	0,511
P8	0,019	0,033

Fonte: módulo Ajustamento de Redes Geodésicas 3D do software AstGeoTop. (GARNÉS, 2022b).

A verificação do ajustamento se dá pelo Teste Global. Este é definido pela aceitação ou não da hipótese nula, definida em relação à igualdade entre as variâncias a posteriori e a priori a um certo nível de significância. A estatística calculada, 65,72 (Tabela 21), não se encontra entre o intervalo definido pela distribuição Qui-Quadrado com 12 graus de liberdade [4,4 e 23,34]; logo, a hipótese nula foi rejeitada ao nível de significância de 5%. Portanto, as observações não são provenientes de uma distribuição normal. Uma das possíveis causas é que as observações são menos precisas do que se espera.

Tabela 21 – Verificação do Ajustamento pelo Teste Global.

Teste de Hipóteses Qui-Quadrado	
Hipótese nula:	$H_0 = \text{sig}2_{\text{pos}} = \text{sig}2_{\text{pri}}$
Hipótese alternativa:	$H_1 = \text{sig}2_{\text{pos}} < > \text{sig}2_{\text{pri}}$
Nível de significância do teste:	alfa = 5%
Graus de liberdade:	gl = 12
Estatística calculada:	Chi2C = 65,7231052443729
Percentil inferior:	Chi2_inf = 4,4
Percentil superior:	Chi2_sup = 23,34
Conclusão:	<u>A hipótese nula foi rejeitada ao nível de significância de 5%.</u>

Fonte: módulo Ajustamento de Redes Geodésicas 3D do software AstGeoTop. (GARNÉS, 2022b).

Portanto, apesar de maior número de observações, neste caso, distâncias inclinadas GNSS; quando se utiliza as mesmas juntamente às outras observações, como distâncias inclinadas através do método da Poligonação e ângulos horizontais e zenitais obtidos entre os vértices ou Pontos de Referência, o ajuste resulta em uma estatística mais elevada. Evidenciando superestimação das precisões das distâncias GNSS quando associadas aos levantamentos topográficos, ou ainda, diferenças acentuadas entre as precisões destas (dist. inclinadas GNSS) e das observações (ângulos horizontais e zenitais).

A partir dos resultados das seções 6.3.2. e 6.3.2.1. ajustes entre os vértices da poligonal e da rede não intervisíveis entre si, decorre que: O ajuste com uso das coordenadas GNSS, ângulos horizontais, zenitais e as distâncias inclinadas GNSS, não resultaram, neste caso especificamente, acurácia maior do que àquela associada somente às observações topográficas. (Incluindo distâncias inclinadas com uso da estação total, entre outras), e as coordenadas GNSS (no SGL).

6.3.3 Processamento dos Pontos de Referência medidos com o método de Poligonização com centragem forçada – Poligonal Enquadrada.

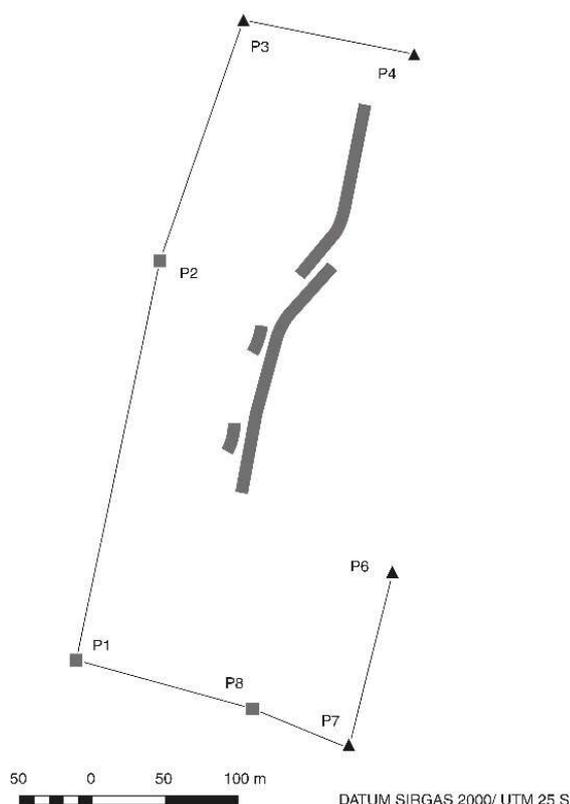
A Poligonal Fechada, como visto na seção 6.3.1. apresentou erro de fechamento angular de $-0^{\circ}01'17,0''$, com isto tornou-se necessária uma Pré-análise com uso do software ADJUST (GHILANI e WOLF, 2006), na qual se identificou presença de erro grosseiro no ponto P5.

As coordenadas geodésicas locais dos Pontos de Referência P6, P7, P3 e P4 (Tabela 10) foram utilizadas como referência para o controle geométrico da poligonal. Estas foram obtidas a partir de vértices implantados ao redor do edifício SUDENE (Figuras 20 e 22), tendo como base inicial e final os vértices P6 e P7; P3 e P4, respectivamente. Não utilizando o ponto com erro, P5. As coordenadas dos Pontos de Referência foram obtidas por rastreamento GNSS e transformadas para o Sistema Geodésico Local.

Antes dos cálculos das coordenadas foram calculadas as médias das distâncias inclinadas, ângulos horizontais e verticais.

A Figura 32 mostra a configuração geométrica da Poligonal Enquadrada com centragem forçada.

Figura 32 – Poligonal Enquadrada com centragem forçada.



Fonte: Autor (2022).

Para a poligonal Enquadrada a Tolerância angular é dada por $T.\text{angular} = 5''.[m]^{1/2}$, na qual m é o número de ângulos da poligonal e $\pm 5''$ a precisão do instrumento. Para este caso, $T.\text{angular} = 5''.[5]^{1/2} = 11,18''$.

O cálculo do erro de fechamento angular foi obtido pela diferença entre os azimutes, método descrito conforme Silva e Segantine (2015). O erro de fechamento foi de $-7''$ (diferença de azimutes), entre os azimutes de P3 a P4 medido em campo e o calculado pelas coordenadas de controle. Portanto, a diferença de azimutes é calculada a partir do transporte do azimute inicial e o azimute a partir das coordenadas. Isto é, azimute de chegada obtido a partir do transporte de azimutes menos o azimute obtido das coordenadas de controle.

A correção angular para cada um dos ângulos medidos foi obtida pela divisão do erro angular $-7''$ pelo número de ângulos, neste caso, 5 ângulos, o que corresponde a uma correção para cada ângulo medido de $+1,4''$. Posteriormente, o valor de $1,4''$ foi somado de cada ângulo medido.

Com estes novos valores de ângulos medidos realizou-se a partir do azimute inicial, azimute de 6 para 7, a soma: $+180^\circ$ se $(Az + \alpha (\text{ângulo}))$ for menor que 180° ou subtração de $+180^\circ$ se $(Az + \alpha (\text{ângulo}))$ for maior que 180° . Com estes novos valores de azimutes corrigidos calcula-se as coordenadas finais, juntamente às distâncias compensadas.

O erro de fechamento linear em y e em x , é calculado, respectivamente, pela diferença entre a soma das projeções no respectivo eixo e a *diferença entre as coordenadas do ponto final e do ponto inicial adotado na poligonal*; como exemplo, para o caso desta poligonal têm-se $e_{ly} = \sum \Delta y_{ij} - (Y_{P3} - Y_{P7})$ e $e_{lx} = \sum \Delta x_{ij} - (X_{P3} - X_{P7})$. Sendo, portanto, o ponto final Y_{P3} e X_{P3} e Y_{P7} e X_{P7} o ponto inicial.

Os valores de erros lineares em y e em x calculados são $e_{ly} = 0,004$ m e $e_{lx} = -0,027$ m. Portanto, o erro linear total, $e_{lt} = [(e_{lx})^2 + (e_{ly})^2]^{1/2}$ calculado foi de $e_{lt} = 0,02729469$ m. A precisão linear relativa é calculada pela divisão $e_{lt}/(\text{perímetro da poligonal})$. Para esta poligonal a Precisão linear relativa calculada foi de $(0,027 \text{ m}/658,063 \text{ m})$, ou ainda, Precisão linear relativa = $1/24.372,703 \cong 1/24.372$.

De acordo com a Tabela 11.18, página 299, Silva e Segantine, (2015), a acurácia do levantamento é boa, e com relação a mesma referência, Tabela 11.16, página 298, pela formulação $k = ea/(s.[n]^{1/2})$, na qual n é o número de ângulos para a poligonal enquadrada, $k = 7''/(5''. [5]^{1/2})$; $k = 0,62$ alta acurácia em termos de precisão angular.

Na Tabela 22 são vistos os dados finais calculados, com distribuição dos erros e compensações efetuadas.

Tabela 22 – Coordenadas Totais Compensadas dos Pontos de Referência pelo método da Poligonação com centragem forçada.

Estação	Coordenadas geodésicas locais	
	X (m)	Y (m)
RECF	150.000,000	250.000,000
P8	150.712,014	249.952,065
P1	150.590,754	249.986,947
P2	150.650,362	250.263,536
P3	150.708,699	250.431,110
P4	150.826,444	250.406,664

Fonte: Autor (2022).

Com os dados da poligonal foram calculadas as tolerâncias angular, lineares, resultante do erro de fechamento e Precisão Linear Relativa. Estes cálculos auxiliaram para a confirmação do erro angular encontrado.

Portanto, usou-se os ângulos e azimutes compensados, pela correção dos ângulos.

Posteriormente a esta etapa, as coordenadas finais calculadas pela poligonal a partir destes azimutes compensados (Tabela 22) foram adotadas como dados iniciais para o *software* ADJUST, como coordenadas a serem ajustadas. Isto é, as coordenadas obtidas através das compensações lineares e correções dos azimutes (os quais por sua vez foram obtidos das direções horizontais medidas compensadas).

Além destas coordenadas, estes próprios dados compensados, ângulos, juntamente aos outros dados medidos, distâncias inclinadas, medidas na poligonal e as coordenadas GNSS dos pontos de referência transformadas para o SGL e azimutes calculados a partir das mesmas foram adotados como valores de observações iniciais ao ajustamento.

Para o ajustamento das observações foi utilizado o *software* ADJUST (GHILANI e WOLF, 2006). A poligonal foi ajustada com dois pontos de controle e dois azimutes (poligonal enquadrada). Neste, foram obtidas as coordenadas finais ajustadas e desvios-padrões, σ_x e σ_y , elipses de erros com P(95%) de confiança, para cada ponto e respectivos desvios σ_u , σ_v e ângulo (Tabela 23) e (Tabela 24).

Tabela 23 – Pontos Ajustados da Poligonal Enquadrada.

Estação	Coordenadas geodésicas locais e respectivos desvios-padrões ajustadas no software ADJUST (GHILANI e WOLF, 2006)			
	X (m)	σ_x (m)	Y (m)	σ_y (m)
P6	150.809,305	$\pm 0,000$	250.046,874	$\pm 0,000$
P7	150.778,721	$\pm 0,002$	249.926,311	$\pm 0,000$
P8	150.712,011	$\pm 0,001$	249.952,066	$\pm 0,001$
P1	150.590,748	$\pm 0,001$	249.986,950	$\pm 0,002$
P2	150.650,361	$\pm 0,001$	250.263,538	$\pm 0,002$
P3	150.708,702	$\pm 0,000$	250.431,111	$\pm 0,001$
P4	150.826,446	$\pm 0,000$	250.406,662	$\pm 0,000$

Fonte: Autor (2022).

Tabela 24 – Elipses de Erros P(95%) de Confiança.

Estação	σ_u (m)	σ_v (m)	t (graus decimais)
P6	$\pm 0,000$	$\pm 0,000$	135,00°
P7	$\pm 0,002$	$\pm 0,000$	104,23°
P8	$\pm 0,002$	$\pm 0,000$	120,68°
P1	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	139,28°
P2	$\pm 0,002$	$\pm 0,001$	137,50°
P3	$\pm 0,001$	$\pm 0,000$	11,73°
P4	$\pm 0,000$	$\pm 0,000$	135,00°

Fonte: Autor (2022).

As coordenadas dos pontos P7, P8, P1, P2 e P3 foram ajustadas assim como as distâncias de P7 a P8, de P8 a P1, P1 a P2, P2 a P3, P7 a P6 e P3 a P4 e os ângulos externos P7, P8, P1, P2, P3. As injunções iniciais foram as coordenadas dos pontos P6 e P4 e os azimutes de P6 para P7 e de P4 para P3. A ênfase dos resultados é dada nos métodos de levantamentos, ajustamentos e como resultado nas coordenadas ajustadas.

As observações de distâncias ajustadas, respectivos resíduos e desvios-padrões, os dados das observações angulares ajustadas e os azimutes ajustados não apresentaram inconsistências, por isso, não são aqui descritos.

6.3.3.1 Considerações e Análise dos Resultados

Com relação ao processamento e ajustamento da poligonal, pontos P8, P1 e P2 observa-se na Tabela 23 que a precisões planimétricas variam entre 0,001m (1mm) e 0,002m (2mm). Estes valores são condizentes com os métodos de levantamentos executados em campo e processamentos realizados.

Análises em campo e em escritório dos dados brutos da poligonal, quantidade de medidas efetuadas; de processamentos realizados (ADJUST); a transformação das coordenadas dos dados GNSS, descrita anteriormente; e ainda a melhor forma de processamento da poligonal enquadrada foram determinantes para os resultados calculados. Ainda é importante ser destacado o procedimento anterior ao processamento dos dados com o uso do *software* ADJUST.

A quantidade de dados levantados, e a revisão e cálculo também foram muito importantes. O planejamento e execução de todo este levantamento de dados para a materialização, densificação de pontos no entorno do Edifício SUDENE são importantes não somente para a cidade do Recife, mas para todos que precisarem de coordenadas determinadas com alta acurácia em toda essa região.

6.4 COORDENADAS ASTRONÔMICAS E TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS CARTESIANAS GEOCÊNTRICAS SIRGAS2000 EM COORDENADAS TOPOGRÁFICAS PLANAS LOCAIS (STL)

As coordenadas astronômicas dos Pontos de Referência, adotando como referência a estação PERC, são dadas na Tabela 25. As componentes do desvio da vertical consideradas para a origem RECF são obtidas através do módulo Cálculo do Desvio da Vertical, integrante do software AstGeoTop (GARNÉS, 2012). As coordenadas astronômicas foram calculadas com uso do software Excel Microsoft 365. Detalhes sobre Desvio da Vertical ou Deflexão da Vertical e cálculos de coordenadas astronômicas podem ser vistos em Silva e Segantine, (2015), páginas 32 a 34.

Tabela 25 – Coordenadas Astronômicas ($\varphi a, \lambda a$) e h (altitude geodésica) em SIRGAS2000 dos pontos RECF, P1 a P8, PERC e SAT GPS 91551, respectivamente; dadas em graus, minutos e segundos.

Estação	Latitude astronômica			Longitude astronômica			Altitude geodésica(h)
RECF	-08	03	07,94592	-34	57	01,15026	4,2170
P1	-08	03	08,37030	-34	56	41,85646	2,9320
P2	-08	02	59,36718	-34	56	39,90984	2,7070
P3	-08	02	53,91273	-34	56	38,00448	2,5670
P4	-08	02	54,70833	-34	56	34,15948	2,5890
P5	-08	03	00,33330	-34	56	34,65096	2,1740
P6	-08	03	06,41976	-34	56	34,71906	2,7790
P7	-08	03	10,34418	-34	56	35,71788	2,3240
P8	-08	03	09,50631	-34	56	37,89648	3,2290
PERC	-08	03	36,15930	-34	56	57,07590	12,2120
SAT GPS 91551	-08	03	15,37306	-34	57	12,64476	49,1610

Fonte: Autor (2022).

A Tabela 26 contém as coordenadas astronômicas ($\varphi a, \lambda a$) representadas na projeção UTM e altitudes geodésicas (h), adotando como referência a estação PERC.

Tabela 26 – Coordenadas astronômicas ($\varphi a, \lambda a$) considerando-se as componentes do desvio da vertical do lugar, para a origem RECF e demais pontos, (P1 a P8, PERC e SAT GPS 91551). Coordenadas representadas no sistema de projeção UTM e altitudes geodésicas em SIRGAS2000 e respectivos desvios-padrões adotando a estação de referência PERC.

PONTO	Coordenadas plano-retangulares UTM			Desvios-padrões		
	N(Norte) (m)	E(Este) (m)	h(m)	σ_N (m)	σ_E (m)	σ_h (m)
SAT GPS 91551	9.109.188,099	284.712,736	49,161	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$\pm 0,003$
P1	9.109.407,762	285.654,570	2,932	$\pm 0,002$	$\pm 0,002$	$\pm 0,003$
P2	9.109.684,675	285.712,869	2,707	$\pm 0,002$	$\pm 0,002$	$\pm 0,003$
P3	9.109.852,545	285.770,422	2,567	$\pm 0,002$	$\pm 0,002$	$\pm 0,003$
P4	9.109.828,659	285.888,289	2,589	$\pm 0,002$	$\pm 0,002$	$\pm 0,004$
P5	9.109.655,755	285.874,059	2,174	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$\pm 0,003$
P6	9.109.468,733	285.872,861	2,779	$\pm 0,002$	$\pm 0,002$	$\pm 0,003$
P7	9.109.348,007	285.842,848	2,324	$\pm 0,002$	$\pm 0,002$	$\pm 0,004$
P8	9.109.373,434	285.776,006	3,229	$\pm 0,002$	$\pm 0,002$	$\pm 0,004$
PERC	9.108.551,697	285.192,562	12,212	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$

Fonte: Autor (2022).

As coordenadas topográficas planas locais (STL) obtidas são vistas na Tabela 27; para a propagação de covariâncias utilizou-se as equações (27) e (28), seção 2.5.8.

Tabela 27 – Pontos de Referência em coordenadas topográficas planas locais.

Estação	Coordenadas topográficas planas locais (STL) (advindas do Pos. GNSS Relativo Estático e modelos de transformação (WOLF e DEWITT, 2000) (FAZAN, 2007)) e respectivos desvios-padrões			
	X (m)	σ_x (m)	Y (m)	σ_y (m)
SAT GPS 91551	149.648,046	$\pm 0,002$	249.771,826	$\pm 0,003$
P1	150.590,761	$\pm 0,002$	249.986,958	$\pm 0,003$
P2	150.650,369	$\pm 0,002$	250.263,543	$\pm 0,003$
P3	150.708,712	$\pm 0,002$	250.431,110	$\pm 0,003$
P4	150.826,444	$\pm 0,002$	250.406,666	$\pm 0,004$
P5	150.811,392	$\pm 0,002$	250.233,861	$\pm 0,003$
P6	150.809,304	$\pm 0,002$	250.046,878	$\pm 0,003$
P7	150.778,718	$\pm 0,002$	249.926,315	$\pm 0,004$
P8	150.712,012	$\pm 0,002$	249.952,057	$\pm 0,004$
PERC	150.124,751	$\pm 0,001$	249.133,251	$\pm 0,002$
RECF	150.000,000		250.000,000	

Fonte: Autor (2022).

A diferença entre coordenadas geodésicas locais (SGL) e topográficas planas locais (STL) para os Pontos de Referência é vista na Tabela 28.

Tabela 28 – Diferenças entre as coordenadas geodésicas locais e topográficas planas locais para os Pontos de Referência.

Estação	Diferenças entre coordenadas geodésicas locais (SGL) e topográficas planas locais (STL)	
	Discrepância em X (m)	Discrepância em Y (m)
SAT GPS 91551	-0,001	-0,004
P1	0,000	-0,004
P2	0,002	-0,003
P3	0,003	-0,004
P4	0,002	-0,004
P5	0,003	-0,004
P6	0,001	-0,004
P7	0,002	-0,003
P8	0,001	-0,004
PERC	-0,003	-0,004

Fonte: Autor (2022).

As diferenças entre coordenadas geodésicas locais e topográficas planas locais são milimétricas, caso isto não ocorra, há, portanto, a evidência de um erro relacionado. A influência do desvio da vertical do lugar para o eixo Z do sistema de coordenadas, de certo modo, em seu uso prático, quando não exigido por Norma Técnica pode ser negligenciado.

Ainda sobre desvio da vertical do lugar, Souza, W. (2012) capítulos 3 a 5, traz os principais métodos envolvidos na obtenção das componentes do desvio; procedimentos metodológicos empregados em campo e resultados e discussões.

6.5 COORDENADAS ALTIMÉTRICAS DOS VÉRTICES DE REFERÊNCIA

Considerando, portanto, $K = 1.263,165$ m, que resulta em quilômetros $K = 1,263165$ km e realizando-se o cálculo, obtém-se, $T = 20\text{mm}\sqrt{1,263165}$, $T = 22,47$ mm ou ainda, tolerância T igual a 2,24 cm. Conforme citado anteriormente, a precisão da estação total utilizada é de $\pm 5''$ de precisão angular e $\pm(5\text{mm} + 5\text{ppm})$ de precisão linear.

Novamente, os dados foram colocados em planilhas de cálculos e processados com uso do *software* Excel Microsoft 365. As coordenadas altimétricas (altitudes ortométricas) aproximadas dos pontos de referência, descritos acima, foram

determinadas a partir dos desníveis calculados para a primeira e segunda série de leituras e com os desníveis calculados a partir da determinação das médias das leituras (primeira e segunda série). O erro de fechamento do transporte altimétrico para o percurso P1, P8, ..., P1 (sentido anti-horário) foi de (-0,0571 m), -5,71 cm. Valor acima da tolerância de 2,24 cm para a distância de 1.263,165 m. O percurso P1, P2, P3, ..., P1 (sentido horário) apresentou erro grosseiro e não foi considerado (erro de -0,1648 m). A Tabela 29 mostra as altitudes aproximadas dos pontos P8 a P2, as quais foram determinadas a partir dos ângulos verticais, distâncias inclinadas, altura do instrumento e altura do refletor, por meio da equação (79); a tabela também mostra as altitudes finais, isto é, determinadas considerando as correções devido à curvatura terrestre δR_0 e correção devido à refração atmosférica δk , por meio do acréscimo da equação (80), (SILVA e SEGANTINE, 2015).

Tabela 29 – Coordenadas altimétricas dos pontos de referência determinadas por nivelamento trigonométrico.

Pontos de referência	Coordenadas altimétricas (m)	($\delta R_0 - \delta k$) (mm)	Coordenadas altimétricas finais (m)
P1	8,4185	5,4780	8,4239
P8	8,7346	1,0894	8,7356
P7	7,8195	0,3498	7,8198
P6	8,2759	1,0586	8,2769
P5	7,6280	2,3927	7,6303
P4	8,0243	2,0590	8,0263
P3	7,9839	0,9895	7,9848
P2	8,0981	2,1544	8,1002

Fonte: Autor (2020).

*notar que os valores obtidos são para k, coeficiente de refração, igual a 0,13. Indica-se como sugestão a possibilidade do nivelamento de visadas recíprocas.

Em resumo, o nivelamento trigonométrico descrito no capítulo 3 foi empregado para a determinação das altitudes (ortométricas) dos pontos de referência P9, P1, P8, P7, P6, P5, P4, P3, P2, P1 e dos pontos de detalhes do Edifício SUDENE (Q1, Q2, Q3, Q4, Q5 e Q6), Tabela 38, seção 6.7., tendo-se a altitude do ponto RN_EPS03 como a Referência de Nível adotada.

Os dados utilizados no nivelamento trigonométrico foram coletados por meio da metodologia *Leap Frog* (ou caminhamento), percurso localizado entre a RN_EPS03 e P1; conforme citado anteriormente, foram realizadas observações dos ângulos verticais e das distâncias inclinadas do ponto P9 para o P1 e RN_EPS03,

respectivamente. Aplicando-se a técnica de medição dos pares conjugados com duas séries de leitura.

A Tabela 30 mostra as coordenadas altimétricas (altitudes ortométricas), da Referência de Nível RN_EPS03 e o ponto P1.

Tabela 30 – Coordenada altimétrica do ponto P1 a partir da Referência de Nível RN_EPS03 por nivelamento trigonométrico por caminhamento (Leap Frog).

Ponto de referência	Coordenada altimétrica (m)
RN_EPS03	9,42082
P1	8,4185

Fonte: Autor (2020).

Posteriormente, foi realizado um nivelamento trigonométrico por caminhamento no sentido anti-horário. A execução ocorreu: da estação em P8 e prisma em P1 e P7; depois, estação em P6 e prisma ré em P7 e prisma vante em P5; estação em P4 com prisma ré em P5 e prisma vante em P3; estação em P2, prisma ré em P3 e prisma vante em P1, fechando o circuito de caminhamento anti-horário por nivelamento trigonométrico. O erro de fechamento altimétrico foi de -5,71 cm; com determinação das coordenadas altimétricas de P1, P8, ..., P1 (Tabela 29).

Como parâmetro às altitudes ortométricas calculadas com o uso do Nivelamento Trigonométrico por caminhamento, utilizou-se as altitudes ortométricas obtidas por meio do Modelo Geoidal Local– Recife (PE) desenvolvido por Garnés (2017), e dados de Lima (2017) em conjunto com as altitudes geodésicas advindas de GNSS. Outra estimativa para as altitudes ortométricas da localidade foram obtidas com uso do MAPGEO2015; sistema que fornece a ondulação geoidal necessária à conversão de altitudes geodésicas, em altitudes ortométricas, ou seja, altitudes relacionadas à superfície equipotencial do campo de gravidade.

A Tabela 31 traz detalhes sobre a aplicação do Modelo Geoidal Local – Recife (PE) GARNÉS (2017), LIMA (2017) e do Sistema de Interpolação de Ondulação Geoidal (SIRGAS2000), MAPGEO 2015, ambos em conjunto com altitudes geodésicas GNSS (h), dadas na Tabela 7, seção 6.1.

Tabela 31 – Altitudes ortométricas (H) dos pontos de referência, desvios-padrões das altitudes ortométricas, Ondulações Geoidais, respectivos desvios-padrões das Ondulações Geoidais e discrepâncias entre as altitudes ortométricas em metros. Altitudes determinadas por modelo geoidal desenvolvido por Garnés (2017), Lima (2017) e pelo MAPGEO2015 (IBGE), ambos, respectivamente, em conjunto com as altitudes geodésicas GNSS (h).

Ponto ref.	modelo geoidal Garnés (2017), Lima (2017) e alt. geodésicas GNSS (m).				MAPGEO 2015 (IBGE) e alt. geodésicas GNSS (m).				Discrepâncias altitudes ortométricas H(m)
	H, desvio-padrão de H, Ondulação Geoidal e respectivo desvio-padrão (m)				H, desvio-padrão de H, Ondulação Geoidal e respectivo desvio-padrão (m)				
P1	8,367	0,003	-5,435	0,002	8,479	-	-05,54	*	-0,112
P8	8,665	0,004	-5,436	0,002	8,779	-	-05,55	*	-0,114
P7	7,761	0,005	-5,437	0,002	7,874	-	-05,55	*	-0,113
P6	8,214	0,004	-5,435	0,002	8,329	-	-05,55	*	-0,115
P5	7,607	0,004	-5,433	0,002	7,714	-	-05,54	*	-0,107
P4	8,020	0,005	-5,431	0,002	8,129	-	-05,54	*	-0,109
P3	7,997	0,004	-5,430	0,002	8,107	-	-05,54	*	-0,110
P2	8,139	0,004	-5,432	0,002	8,247	-	-05,54	*	-0,108
S 91551	54,591	0,003	-5,430	0,001	54,691	-	-05,53	*	-0,100

Fonte: modelo geoidal Garnés (2017), Lima (2017) e MAPGEO 2015 (IBGE) (2020).

*dados não disponibilizados, isto é, desvio-padrão da ondulação geoidal não é dado com o uso do MAPGEO2015.

-desvio-padrão da altitude ortométrica não calculado com os dados que se dispõe.

Como não se tem a altitude geodésica (h) da RN_EPS03 (leitura GNSS sobre RN), não foi possível a estimativa de altitude ortométrica dos Pontos de Referência através desta RN com o uso da relação citada na seção 3.4.6., $H_Q - H_P \approx h_Q - h_P$, a qual resulta, $H_P \approx -h_Q + h_P + H_Q$. Entretanto, para esta relação adotou-se o ponto P1, próximo à RN_EPS03; este, determinado pela Técnica *Leap Frog*. Portanto, a RN utilizada (H_Q) se refere à altitude ortométrica do ponto P1 e h_Q , altitude geodésica de P1.

Os resultados obtidos com o uso da relação acima, $H_P \approx -h_Q + h_P + H_Q$, e uso das altitudes geodésicas (Tabela 7) são vistos na Tabela 32; mais detalhes podem ser vistos na Figura 18 e seção 3.4.6. já citada.

Tabela 32 – Altitudes ortométricas através da relação $H_P \approx -h_Q + h_P + H_Q$ em conjunto com altitudes geodésicas GNSS dos pontos de referência (h).

P. de referência	Para H, Niv. Trig. sem correções devido à curvatura terrestre δR_0 e à refração atmosférica δk (m)	Para H, Niv. Trig. Coord. altimétricas finais (m)
P1 (Hq)	8,4185	8,4239
P8	8,7155	8,7209
P7	7,8105	7,8159
P6	8,2655	8,2709
P5	7,6605	7,6659
P4	8,0755	8,0809
P3	8,0535	8,0589
P2	8,1935	8,1989

Fonte: Autor (2020).

Também foi realizado o transporte de coordenadas altimétricas por nivelamento GNSS com o uso da relação, $H_P \approx [-h_Q + h_P + N_Q - N_P] + H_Q$ (Tabela 33), que, diferentemente da Tabela 32, considera a ondulação geoidal para os pontos (P) e (Q). O modelo geoidal para a cidade de Recife-PE possui precisão milimétrica; portanto, resultado mais preciso que o MAPGEO2015 com precisão centimétrica.

Tabela 33 – Altitudes ortométricas através da relação $H_P \approx [-h_Q + h_P + N_Q - N_P] + H_Q$, em conjunto com altitudes geodésicas GNSS dos pontos de referência (h). Por meio de modelo geoidal local, desenvolvido por Garnés (2017), e dados de Lima (2017).

P. de referência	Para H, Niv. Trig. sem correções devido à curvatura terrestre δR_0 e à refração atmosférica δk (m)	Para H, Niv. Trig. Coord. altimétricas finais (m)
P1 (Hq)	8,4185	8,4239
P8	8,7165	8,7219
P7	7,8125	7,8179
P6	8,2655	8,2709
P5	7,6585	7,6639
P4	8,0715	8,0769
P3	8,0485	8,0539
P2	8,1905	8,1959

Fonte: Autor (2020).

Com relação aos valores calculados, os resultados mais significativos se referem à Tabela 31, e calculados através de modelo geoidal desenvolvido por Garnés (2017), Lima (2017) e alt. geodésicas GNSS (m); pois estes não dependem da altitude ortométrica da Referência de Nível P1, determinada pela técnica *Leap Frog*. No entanto, as Tabelas 33 e 32, representam formas aproximadas de cálculo, úteis e dependentes da aplicação que se realiza, utilizando para isto o Nivelamento Trigonométrico.

6.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO MÉTODO DA INTERSEÇÃO A VANTE COM CENTRAGEM FORÇADA E COM EXCESSO DE VISADAS E TRIANGULAÇÃO

A Tabela 34 a seguir se refere às análises com uso do método da Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais, modelo abordado/ descrito em (HÄBLER e WACHSMUTH, 1984), seções 3.4.4.(b) e 3.4.4.1. Com uso deste modelo são realizados os ajustamentos. Nesta tabela são vistas as coordenadas calculadas nos Sistemas Geodésico Local (SGL) e Topográfico Local (STL), calculadas a partir das observações e médias.

Aos triângulos que passaram no teste estatístico do ajustamento de observações, Q6P6P7, Q6P7P8, Q5P5P6, Q4P3P4 e Q2P2P3, são apresentadas as coordenadas ajustadas e os desvios-padrões das coordenadas. O intervalo de aceitação conforme o modelo de ajustamento adotado, apresenta os valores tabelados 0,05 e 7,38 para a distribuição Qui-Quadrado, para este caso, com dois graus de liberdade, ao nível de significância de 5%.

Com os dados da Tabela 34 originou-se o gráfico visto na Figura 33.

Tabela 34 – Coordenadas ajustadas dos pontos de Detalhes a partir do método da Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais (HÄBLER e WACHSMUTH, 1984) com uso de coordenadas geodésicas locais e topográficas planas locais.

Triângulo e Ponto de Detalhe (Q)	Coordenada ajustada X (m)	Desvio-Padrão em X σ_X (m)	Coordenada ajustada Y (m)	Desvio-Padrão em Y σ_Y (m)	*Precisão horizontal (mm)	Qui-Quadrado Calculado
Coordenadas geodésicas locais						
Q6P6P7 (Q6)	150.709,958	$\pm 0,003$	250.101,500	$\pm 0,003$	4,242	2,53
Q6P7P8 (Q6)	150.709,919	$\pm 0,003$	250.101,437	$\pm 0,004$	5,000	2,44
Q5P5P6 (Q5)	150.770,703	$\pm 0,004$	250.257,293	$\pm 0,002$	4,472	2,94
Q4P3P4 (Q4)	150.796,213	$\pm 0,002$	250.370,201	$\pm 0,003$	3,605	4,95
Q2P2P3 (Q2)	150.710,895	$\pm 0,005$	250.202,984	$\pm 0,005$	7,071	5,20
Coordenadas topográficas planas locais						
Q6P6P7 (Q6)	150.709,956	$\pm 0,003$	250.101,505	$\pm 0,003$	4,242	2,53
Q6P7P8 (Q6)	150.709,921	$\pm 0,003$	250.101,440	$\pm 0,004$	5,000	2,44
Q5P5P6 (Q5)	150.770,700	$\pm 0,004$	250.257,297	$\pm 0,002$	4,472	2,94
Q4P3P4 (Q4)	150.796,210	$\pm 0,002$	250.370,205	$\pm 0,003$	3,605	4,95
Q2P2P3 (Q2)	150.710,893	$\pm 0,005$	250.202,987	$\pm 0,005$	7,071	5,20
RECF	150.000,000		250.000,000			

Fonte: Autor (2022).

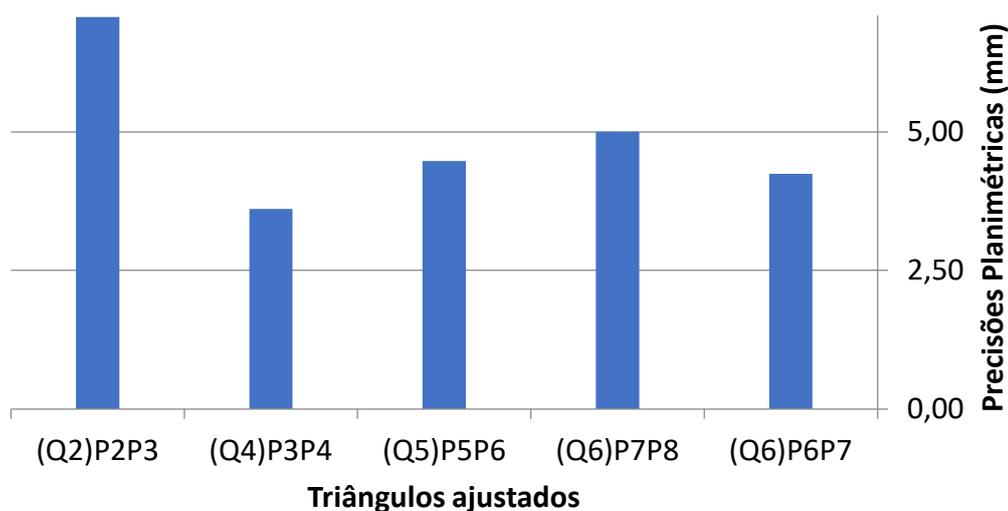
*as precisões horizontais acima são calculadas através dos desvios-padrões obtidos no método da Interseção a Vante 2D por Ângulos Azimutais. Considera-se para o método, conforme citado anteriormente, as precisões da estação total utilizada, que é de $\pm 5''$ de

precisão angular e $\pm(5\text{mm} + 5\text{ppm}\cdot D)$, valor indicado pelo fabricante para o cálculo da precisão de distâncias medidas com MED (TOPCON, 2012), ABNT NBR 13133 (2021).

*o ponto Q2 (Q2P2P3) pode ser desconsiderado por apresentar precisão horizontal maior que 5mm; isto é, maior que a precisão linear de $\pm(5\text{mm} + 5\text{ppm}\cdot D)$, da Estação Total para a distância em campo.

As discrepâncias entre as coordenadas (SGL e STL) (Tabela 34) variam de 2 mm a 5 mm.

Figura 33 – Precisões Planimétricas para os triângulos ajustados em milímetros.



Fonte: Autor (2022).

As Tabelas 35 e 36, complementam a Tabela 34, e apresentam as observações ajustadas e respectivos desvios-padrões (Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais) (HÄBLER e WACHSMUTH, 1984).

Tabela 35 – Observações ajustadas e respectivos desvios-padrões, método da Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais (HÄBLER e WACHSMUTH, 1984) (coordenadas geodésicas locais).

Observações ajustadas, distâncias e ângulos, distâncias a partir de coordenadas geodésicas locais para cada ponto da base formada ao ponto a ser determinado, Ponto de Detalhe (Q) para cada triângulo					
Triângulo	(m)	$\sigma(m)$		(m)	$\sigma(m)$
ID	(°)	$\sigma(")$		(°)	$\sigma(")$
(Q6)P6P7					
P6Xo	113,375 m	$\pm 4,312 \times 10^{-3}$ m	P7Xo	188,200 m	$\pm 3,885 \times 10^{-3}$ m
$\alpha 1$	104,561°	$\pm 4,949''$	$\alpha 2$	35,665°	$\pm 3,633''$
(Q6)P7P8					
P7Xo	188,155 m	$\pm 4,427 \times 10^{-3}$ m	P8Xo	149,399 m	$\pm 4,494 \times 10^{-3}$ m
$\alpha 1$	47,451°	$\pm 3,577''$	$\alpha 2$	111,891°	$\pm 4,393''$
(Q5)P5P6					
P5Xo	46,958 m	$\pm 4,604 \times 10^{-3}$ m	P6Xo	213,931 m	$\pm 3,178 \times 10^{-3}$ m
$\alpha 1$	119,283°	$\pm 5,949''$	$\alpha 2$	11,036°	$\pm 3,478''$
(Q4)P3P4					
P3Xo	106,608 m	$\pm 1,797 \times 10^{-3}$ m	P4Xo	47,365 m	$\pm 3,660 \times 10^{-3}$ m
$\alpha 1$	23,111°	$\pm 7,049''$	$\alpha 2$	62,079°	$\pm 7,707''$
(Q2)P2P3					
P2Xo	85,616 m	$\pm 6,403 \times 10^{-3}$ m	P3Xo	228,133 m	$\pm 5,128 \times 10^{-3}$ m
$\alpha 1$	115,804°	$\pm 7,596''$	$\alpha 2$	19,745°	$\pm 4,494''$
RECF	150.000,000		250.000,000		

Fonte: Autor (2022).

Tabela 36 – Observações ajustadas e respectivos desvios-padrões, método da Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais (HÄBLER e WACHSMUTH, 1984) (coordenadas topográficas planas locais).

Observações ajustadas, distâncias e ângulos, distâncias a partir de coordenadas topográficas planas locais para cada ponto da base formada ao ponto a ser determinado, Ponto de Detalhe (Q) para cada triângulo				
Triângulo	(m)	σ(m)	(m)	σ(m)
ID	(°)	σ(")	(°)	σ(")
(Q6)P6P7				
P6Xo	113,376 m	$\pm 4,312 \times 10^{-3}$ m	P7Xo	188,201 m
$\alpha 1$	104,561°	$\pm 4,949''$	$\alpha 2$	35,665°
(Q6)P7P8				
P7Xo	188,153 m	$\pm 4,427 \times 10^{-3}$ m	P8Xo	149,397 m
$\alpha 1$	47,451°	$\pm 3,577''$	$\alpha 2$	111,891°
(Q5)P5P6				
P5Xo	46,958 m	$\pm 4,604 \times 10^{-3}$ m	P6Xo	213,931 m
$\alpha 1$	119,283°	$\pm 5,949''$	$\alpha 2$	11,036°
(Q4)P3P4				
P3Xo	106,609 m	$\pm 1,797 \times 10^{-3}$ m	P4Xo	47,365 m
$\alpha 1$	23,111°	$\pm 7,049''$	$\alpha 2$	62,079°
(Q2)P2P3				
P2Xo	85,617 m	$\pm 6,403 \times 10^{-3}$ m	P3Xo	228,133 m
$\alpha 1$	115,804°	$\pm 7,596''$	$\alpha 2$	19,745°
RECF	150.000,000		250.000,000	

Fonte: Autor (2022).

Para o modelo descrito em (KAHMEN e FAIG 1988, SILVA e SEGANTINE 2015) são calculados os pontos Q2, Q4, Q5 e Q6 provenientes dos mesmos triângulos, citados anteriormente. As coordenadas 2D calculadas para os pontos-objeto são as mesmas para o método da Triangulação (Tabela 37). Neste caso, conforme descrição do método, seção 3.4.4.(a), são dados apenas os valores absolutos para as coordenadas dos pontos.

Tabela 37 – Coordenadas dos pontos de Detalhes a partir do método da Interseção a Vante 2D por meio dos Ângulos Horizontais (KAHMEN e FAIG 1988, SILVA e SEGANTINE 2015) com uso de coordenadas geodésicas locais e topográficas planas locais.

Triângulo e Ponto de Detalhe (Q)	X (m)	Y (m)
Coordenadas geodésicas locais		
Q6P6P7 (Q6)	150.709,953	250.101,488
Q6P7P8 (Q6)	150.709,939	250.101,425
Q5P5P6 (Q5)	150.770,698	250.257,281
Q4P3P4 (Q4)	150.796,222	250.370,194
Q2P2P3 (Q2)	150.710,907	250.202,998
Coordenadas topográficas planas locais		
Q6P6P7 (Q6)	150.709,950	250.101,493
Q6P7P8 (Q6)	150.709,938	250.101,425
Q5P5P6 (Q5)	150.770,697	250.257,284
Q4P3P4 (Q4)	150.796,220	250.370,197
Q2P2P3 (Q2)	150.710,904	250.203,001
RECF	150.000,000	250.000,000

Fonte: Autor (2022).

As discrepâncias entre as coordenadas (SGL e STL) (Tabela 37) variam entre 0 a 5 mm. A Tabela 34 apresenta as coordenadas das arestas com resultados entre o intervalo estatístico da distribuição Qui-Quadrado, neste caso, com dois graus de liberdade, ao nível de significância de 5%. O ponto Q6, obtido a partir de quatro vértices, ou ainda, por três triângulos, não apresentou resultado entre o intervalo estatístico para o triângulo Q6P8P1(Q6) e; portanto, não foi apresentado.

A partir dos objetivos específicos propostos nesta dissertação afirma-se que as precisões posicionais alcançadas apresentam resultados de acordo com a norma Decreto nº 9.310, de 2018 para o cadastro urbano no Brasil; como citado anteriormente, o erro posicional esférico do vértice definidor de limite deve ser igual ou menor a \pm oito centímetros de raio. As precisões planimétricas calculadas estão entre 3,605 mm e 7,071mm (Tabela 34, Figura 33).

6.7 RESULTADOS E DISCUSSÃO MÉTODO DA INTERSEÇÃO ESPACIAL ANALÍTICA

Na Tabela 38, com o cálculo da Interseção Espacial Analítica para os pontos de detalhes, são vistas as coordenadas geodésicas locais e topográficas planas locais (X, Y) com origem no ponto RECF, e a altitude ortométrica.

As coordenadas utilizadas para calcular as distâncias inclinadas entre os pontos de coordenadas conhecidas e os pontos a serem calculados são as coordenadas ajustadas, Tabela 34; com relação aos pontos-objeto Q1, Q3 e Q6, triângulos Q1P1P2, Q3P3P4 e Q6P8P1, respectivamente, são utilizadas as equações (33) e (34), seção 3.4.4.(b), sem o ajustamento de observações. As equações citadas permitem calcular os parâmetros aproximados pelo método que se utiliza dos ângulos azimutais. Neste caso, os parâmetros aproximados (coordenadas calculadas pelas equações), são iguais às coordenadas obtidas pelo cálculo por meio dos ângulos horizontais, dadas na Tabela 37.

Ainda na Tabela 38, em comparação às coordenadas ajustadas (Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais (HÄBLER e WACHSMUTH, 1984)), as coordenadas calculadas (Int. Espacial Analítica) para os mesmos triângulos são dadas em negrito. **Para a determinação altimétrica, HQ6 foi determinada a partir da altitude ortométrica de P1 (HP1), assim como HQ1; HQ5, determinada a partir de HP6; HQ4 e HQ3 a partir de HP4 e HQ2, determinada a partir de HP3.** As altitudes das arestas também são calculadas a partir das altitudes geodésicas dos Pontos de Referência.

As discrepâncias entre as coordenadas (SGL e STL), Tabela 38, variam entre 1 a -8 mm.

Tabela 38 – Coordenadas geodésicas locais e topográficas planas locais, origem RECF e as altitudes ortométrica e geodésica calculadas pelo método da Interseção Espacial Analítica, descrita em Silva e Segantine (2015) para os pontos de detalhes.

Triângulo e Ponto de Detalhe (Q)	X(m)	Y (m)	H (m) alt. ort. (H a partir do niv. trig.)	h (m) alt. geodésica
Coordenadas geodésicas locais				
Q1P1P2 (Q1)	150.699,693	250.103,626	60,835	55,343
Q6P8P1 (Q6)	150.709,989	250.101,419	60,832	55,340
Q5P5P6 (Q5)	150.770,703	250.257,293	60,923	55,425
Q4P3P4 (Q4)	150.796,222	250.370,193	60,831	55,394
Q3P3P4 (Q3)	150.785,993	250.372,422	60,818	55,380
Q2P2P3 (Q2)	150.710,907	250.202,984	66,206	60,789
Coordenadas topográficas planas locais				
Q1P1P2 (Q1)	150.699,693	250.103,628	60,835	
Q6P8P1 (Q6)	150.709,990	250.101,422	60,832	
Q5P5P6 (Q5)	150.770,695	250.257,296	60,923	mesmos valores acima
Q4P3P4 (Q4)	150.796,219	250.370,197	60,831	
Q3P3P4 (Q3)	150.785,992	250.372,425	60,818	
Q2P2P3 (Q2)	150.710,904	250.202,987	66,207	
RECF	150.000,000	250.000,000	25,710	4,2170

Fonte: Autor (2022).

*o ponto Q2 se encontra em parte mais elevada do prédio.

Por meio do método de interseção de retas espaciais (distância mínima) com a aplicação da Interseção Espacial Analítica são obtidas as coordenadas 3D das arestas simultaneamente.

Especificamente sobre as altitudes (ortométricas) determinadas, utiliza-se na Interseção Espacial Analítica, altitudes ortométricas obtidas através do Modelo Geoidal Local – Recife (PE) (GARNÉS, 2017), (LIMA, 2017) em conjunto com as altitudes geodésicas advindas de GNSS como referência. Estas são parâmetro às altitudes ortométricas utilizando-se o Nivelamento Trigonométrico por caminhamento.

Na Tabela 39 são dadas as altitudes ortométricas com as duas formas de cálculo.

Tabela 39 – Altitudes ortométricas calculadas pela Interseção Espacial Analítica (SILVA e SEGANTINE 2015); com o uso do modelo geoidal local Garnés (2017), Lima (2017) em conjunto com as altitudes geodésicas advindas de GNSS, e por meio do Nivelamento Trigonométrico por caminharmento.

Triângulo e Ponto de Detalhe (Q)	H (m) alt. ort. (H a partir do modelo geoidal local e alt. geodésicas GNSS)	H (m) alt. ort. (H a partir do nivelamento trigonométrico)
Q1P1P2 (Q1)	60,782	60,835
Q6P8P1 (Q6)	60,777	60,832
Q5P5P6 (Q5)	60,861	60,923
Q4P3P4 (Q4)	60,825	60,831
Q3P3P4 (Q3)	60,812	60,818
Q2P2P3 (Q2)	66,195	66,206

Fonte: Autor (2021).

*o ponto Q2 se encontra em parte mais elevada do prédio.

A Tabela 39 acima, que se refere às arestas da edificação, exemplifica o que foi citado anteriormente com relação ao erro de fechamento do transporte altimétrico para os pontos de referência. Este erro, calculado com o uso do Nivelamento Trigonométrico por caminharmento para o percurso P1, P8, ..., P1 (sentido anti-horário), foi de (-0,0571 m), -5,71 cm, seção 6.5.

Terminadas as etapas de cálculo de coordenadas a partir de Interseções, são efetuados os cálculos das distâncias horizontais e planas no plano de projeção topográfico entre as arestas, e comparadas com as distâncias horizontais e planas obtidas por meio de coordenadas com uso da Interseção Espacial Analítica. A Tabela 40 mostra as distâncias horizontais e as distâncias planas no plano de projeção topográfico calculadas a partir da Tabela 34 (Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais).

Tabela 40 – Distâncias horizontais e distâncias planas no plano de projeção topográfico entre as coordenadas ajustadas dos pontos de Detalhes a partir do método da Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais (HÄBLER e WACHSMUTH, 1984).

Diferenças entre arestas (Q)	distâncias (m)
Distâncias a partir de coordenadas geodésicas locais (distâncias horizontais)	
Q6P6P7 – Q5P5P6 (Q6 e Q5)	167,216
Q6P7P8 – Q5P5P6 (Q6 e Q5)	167,289
Q6P6P7 – Q4P3P4 (Q6 e Q4)	282,205
Q6P7P8 – Q4P3P4 (Q6 e Q4)	282,277
Q6P6P7 – Q2P2P3 (Q6 e Q2)	101,488
Q6P7P8 – Q2P2P3 (Q6 e Q2)	101,551
Q5P5P6 – Q4P3P4 (Q5 e Q4)	115,754
Q5P5P6 – Q2P2P3 (Q5 e Q2)	80,786
Q4P3P4 – Q2P2P3 (Q4 e Q2)	187,725
Distâncias a partir de coordenadas topográficas planas locais (distâncias planas)	
Q6P6P7 – Q5P5P6 (Q6 e Q5)	167,215
Q6P7P8 – Q5P5P6 (Q6 e Q5)	167,288
Q6P6P7 – Q4P3P4 (Q6 e Q4)	282,204
Q6P7P8 – Q4P3P4 (Q6 e Q4)	282,277
Q6P6P7 – Q2P2P3 (Q6 e Q2)	101,486
Q6P7P8 – Q2P2P3 (Q6 e Q2)	101,551
Q5P5P6 – Q4P3P4 (Q5 e Q4)	115,754
Q5P5P6 – Q2P2P3 (Q5 e Q2)	80,786
Q4P3P4 – Q2P2P3 (Q4 e Q2)	187,725

Fonte: Autor (2022).

As discrepâncias entre distâncias calculadas (SGL e STL), Tabela 40, variam entre 1 e 2 mm.

A Tabela 41 mostra as distâncias entre arestas, calculadas com dados da Tabela 38 (Int. Espacial Analítica).

Tabela 41 – Distâncias horizontais e distâncias planas no plano de projeção topográfico entre coordenadas calculadas pelo método da Interseção Espacial Analítica para os pontos de Detalhes, método descrito em Silva e Segantine (2015).

Diferenças entre arestas (Q)	distâncias (m)
Distâncias a partir de coordenadas geodésicas locais (distâncias horizontais)	
Q5P5P6 – Q4P3P4 (Q5 e Q4)	115,748
Q5P5P6 – Q2P2P3 (Q5 e Q2)	80,777
Q4P3P4 – Q2P2P3 (Q4 e Q2)	187,716
Distâncias a partir de coordenadas topográficas planas locais (distâncias planas)	
Q5P5P6 – Q4P3P4 (Q5 e Q4)	115,750
Q5P5P6 – Q2P2P3 (Q5 e Q2)	80,774
Q4P3P4 – Q2P2P3 (Q4 e Q2)	187,717

Fonte: Autor (2022).

As discrepâncias entre distâncias calculadas (SGL e STL), Tabela 41, variam entre 1 e 3 mm.

Para a definição de Pontos-Objeto e controle geométrico da edificação, distâncias são calculadas entre coordenadas das arestas (ou Pontos-Objeto) determinados. Com relação às distâncias calculadas entre as coordenadas ajustadas a partir do método da Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais (HÄBLER e WACHSMUTH, 1984) (Tabela 40), e as distâncias calculadas por Interseção Espacial Analítica (Tabela 41) são obtidas as diferenças; de 4mm, para a distância plana entre Q5 e Q4, menor valor (de diferença de distâncias); diferença de 12 mm, para a distância plana entre Q5 e Q2, maior valor (de diferença de distâncias); e diferença de 8mm, para a distância plana entre Q4 e Q2.

Se constituem elementos para a análise da precisão planimétrica dos levantamentos realizados além do posicionamento GNSS, seção 4.4.2., o Apêndice B, Relatório GNSS, e a Tabela 34. Para a altimetria, a seção 4.4.7.; conforme citado anteriormente, metodologia utilizada conforme Norma ABNT NBR 13133 (1994), pág. 18, Tabela 9, a qual especifica o método utilizado; método das direções: duas séries de leituras conjugadas direta e inversa, horizontal e vertical para Teodolito classe 2, isto é, de média precisão. Por esta norma a tolerância é dada por $T = 20 \text{ mm}\sqrt{K}$, na qual, K é a distância nivelada em Km. Em 2021, foi publicada a segunda versão desta norma, ABNT NBR 13133 (2021).

Por causa das características dos Pontos-Objeto em serem pontos de quinas (arestas) das edificações, o método de medição por pulso não pôde ser realizado; estes também não foram possíveis de serem materializados. Como nesta metodologia não foi realizada a leitura da distância (inclinada) para os pontos altos, houve a necessidade de estimação da distância inclinada a partir da distância horizontal. A seguir, realizou-se a diferença de coordenadas da Tabela 38 **(resultado)(aplicação da Int. Espacial Analítica) em relação à [Tabela 34 (coordenadas ajustadas (2D âng. azimutais))¹²]**. O objetivo era avaliar a diferença em termos de coordenadas com a adoção ou não de coordenadas ajustadas como dado inicial ao cálculo da Int. Espacial Analítica. Neste caso, importantes para o cálculo das distâncias inclinadas do ponto de Referência à Aresta Q.

Com relação à Interseção Espacial Analítica, os resultados da Tabela 38 apresentaram com relação à Tabela 34 (coordenadas ajustadas) diferenças para as

¹² coordenadas utilizadas como dado de entrada para o cálculo da Int. Espacial Analítica.

coordenadas X e Y, respectivamente, apresentadas na Tabela 42.

Tabela 42 – Diferenças de coordenadas entre a Interseção Espacial Analítica e Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais.

Triângulo e Ponto de Detalhe (Q)	Diferenças de coordenadas em X(mm)	Diferenças de coordenadas em Y (mm)
Coordenadas geodésicas locais		
Q5P5P6 (Q5)	0,0	0,0
Q4P3P4 (Q4)	9,0	-8,0
Q2P2P3 (Q2)	12,0	0,0
Coordenadas topográficas planas locais		
Q5P5P6 (Q5)	-5,0	-1,0
Q4P3P4 (Q4)	9,0	-8,0
Q2P2P3 (Q2)	11,0	0,0

Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 42, a qual mostra a diferença de coordenadas entre as Tabelas 36 e Tabela 34, nesta ordem, se vê para o SGL as diferenças de 9 mm na coordenada X e -8 mm na coordenada Y para o ponto Q4; para o ponto Q2, é obtida apenas uma diferença, de 12 mm em X, e para o ponto Q5 as coordenadas não apresentaram diferenças. Como citado anteriormente, aos pontos com coordenadas ajustadas (Q5, Q4, Q2), estas foram adotadas para o cálculo da Int. Espacial Analítica. De forma similar, para o STL, uma diferença significativa é vista para o ponto Q5; uma diferença de -5 mm em X e -1 mm em Y.

Para os pontos que utilizaram como coordenadas iniciais sem ajustamento, apenas coordenadas aproximadas (ou parâmetros iniciais), equações (33) e (34)(HÄBLER e WACHSMUTH, 1984), (pontos Q1, Q6 e Q3) a mesma diferença de coordenadas da Tabela 38 (resultados do método) em relação às coordenadas utilizadas como dado de entrada para o cálculo da Int. Espacial Analítica foi realizada.

Na Tabela 43 são vistos os resultados e as coordenadas de entrada da Interseção Espacial Analítica para os pontos Q1, Q6 e Q3; e na Tabela 48, as diferenças entre resultados e coordenadas de entrada.

Tabela 43 – Resultados e coordenadas de entrada da Interseção Espacial Analítica para os pontos Q1, Q6 e Q3.

Triângulo e Ponto de Detalhe (Q)	X(m)	Y (m)	H (m) alt. ort. (H a partir do niv. trig.)
Coordenadas geodésicas locais (resultado)			
Q1P1P2 (Q1)	150.699,693	250.103,626	60,835
Q6P8P1 (Q6)	150.709,989	250.101,419	60,832
Q3P3P4 (Q3)	150.785,993	250.372,422	60,818
Coordenadas geodésicas locais (coordenadas de entrada, sem ajuste)			
Q1P1P2 (Q1)	150.699,693	250.103,626	-
Q6P8P1 (Q6)	150.709,989	250.101,419	-
Q3P3P4 (Q3)	150.785,993	250.372,422	-
Coordenadas topográficas planas locais (resultado)			
Q1P1P2 (Q1)	150.699,693	250.103,628	60,835
Q6P8P1 (Q6)	150.709,990	250.101,422	60,832
Q3P3P4 (Q3)	150.785,992	250.372,425	60,818
Coordenadas topográficas planas locais (coordenadas de entrada, sem ajuste)			
Q1P1P2 (Q1)	150.699,692	250.103,629	-
Q6P8P1 (Q6)	150.709,988	250.101,424	-
Q3P3P4 (Q3)	150.785,992	250.372,425	-
REFC	150.000,000	250.000,000	25,710

Fonte: Autor (2022).

Tabela 44 – Diferenças entre resultados e coordenadas de entrada para o método da Interseção Espacial Analítica para os pontos Q1, Q6 e Q3.

Triângulo e Ponto de Detalhe (Q)	Diferenças de coordenadas em X(mm)	Diferenças de coordenadas em Y (mm)
Coordenadas geodésicas locais		
Q1P1P2 (Q1)	0,0	0,0
Q6P8P1 (Q6)	0,0	0,0
Q3P3P4 (Q3)	0,0	0,0
Coordenadas topográficas planas locais		
Q1P1P2 (Q1)	1,0	-1,0
Q6P8P1 (Q6)	2,0	-2,0
Q3P3P4 (Q3)	0,0	0,0

Fonte: Autor (2022).

Com relação aos resultados da Tabelas 43 e 44, não são vistas diferenças no SGL; no STL, estes pontos apresentaram diferenças pouco significativas, de 1 mm e -1 mm para os eixos X e Y, ponto Q1; para o ponto Q6, 2 mm e -2 mm, para os eixos X e Y, respectivamente; e para o ponto Q3 não houve diferenças. Entretanto, neste caso, estas diferenças não significam que estes resultados são melhores que no caso anterior. Apenas a similaridade entre os dois métodos (Int. Espacial Analítica e Int.

a Vante por Ângulos Azimutais, sem ajuste).

Esta análise permite afirmar a importância de pontos com alta acurácia para a determinação (cálculo, estimação) da distância inclinada com uso da Int. Espacial Analítica; e a importância de várias medidas (de ângulos verticais zenitais medidos) e pontos distintos, assim como ponderação adequada no caso de ajustamento pelo MMQ para o método (Int. Espacial Analítica). Como o método da Int. Espacial Analítica é recomendado para pequenas distâncias, os valores obtidos na Tabela 38 para os pontos Q5, Q4 e Q2, apesar de possuírem diferenças de até 12 mm em relação às coordenadas ajustadas pela Int. a Vante 2D por ângulos azimutais e respectivo ajustamento, são úteis à diversas finalidades. Kahmen e Faig (1988), consideram visadas (ou distâncias) longas a partir de 250 m.

Esta análise permite verificar que apesar da medida de distância inclinada correta, uma alteração angular pequena entre as medidas angulares (ângulos verticais zenitais) de uma série de leituras pode, p.ex., alterar a coordenada altimétrica, HQ, em vários milímetros. Portanto, recomenda-se a não aceitação de medidas (leituras de ângulos) muito discrepantes entre si, adotando-se, portanto, critérios de rejeição elevados para a finalidade (acurácia) a ser atendida. Considerando-se, portanto, a precisão nominal do equipamento.

Outro aspecto importante, no caso desta pesquisa, é o parâmetro para adoção ou não de determinada altitude para uma aresta com uso da Int. Espacial Analítica; além da citação dada anteriormente, HQ6 determinada a partir da altitude ortométrica de P1 (HP1), assim como HQ1; HQ5, determinada a partir de HP6; HQ4 e HQ3 a partir de HP4 e HQ2, determinada a partir de HP3.

6.8 RESULTADOS E DISCUSSÃO MÉTODO DA INTERSEÇÃO ESPACIAL ANALÍTICA COM DADOS CALCULADOS PELO AJUSTE EM REDE GEODÉSICA 3D

Para determinação das coordenadas dos Pontos-Objeto com uso dos dados de Referência determinados pelo ajuste em Rede 3D, também se utiliza de distâncias inclinadas estimadas a partir de distâncias horizontais. São utilizadas distâncias horizontais entre os Pontos de Referência, Tabela 16, e Pontos-Objeto previamente determinados por ajustamento, Tabela 34 (Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais (HÄBLER e WACHSMUTH, 1984)).

Os resultados, obtidos em coordenadas geodésicas locais e topográficas planas locais apresentam os mesmos valores vistos na Tabela 34; estes são vistos na Tabela 45.

Tabela 45 - Coordenadas calculadas pelo método da Interseção Espacial Analítica com uso de coordenadas ajustadas em rede geodésica 3D.

Triângulo e Ponto de Detalhe (Q)	X (m)	Y (m)	Z(m)
Coordenadas geodésicas locais			
Q6P6P7 (Q6) a partir de P6	150.709,958	250.101,500	51,261
Q6P6P7 (Q6) a partir de P7	150.709,902	250.101,478	51,027
Q6P7P8 (Q6) a partir de P7	150.709,919	250.101,437	51,014
Q6P7P8 (Q6) a partir de P8	150.709,919	250.101,437	51,328
Q5P5P6 (Q5) a partir de P5	150.770,703	250.257,293	51,210
Q5P5P6 (Q5) a partir de P6	150.770,703	250.257,293	51,234
Q4P3P4 (Q4) a partir de P3	150.796,213	250.370,201	51,013
Q4P3P4 (Q4) a partir de P4	150.796,213	250.370,201	51,095
Q2P2P3 (Q2) a partir de P2	150.710,895	250.202,984	56,690
Q2P2P3 (Q2) a partir de P3	150.710,895	250.202,984	56,518
Coordenadas topográficas planas locais			
Q6P6P7 (Q6) a partir de P6	150.709,956	250.101,505	-
Q6P6P7 (Q6) a partir de P7	150.709,956	250.101,505	-
Q6P7P8 (Q6) a partir de P7	150.709,921	250.101,440	-
Q6P7P8 (Q6) a partir de P8	150.709,921	250.101,440	-
Q5P5P6 (Q5) a partir de P5	150.770,700	250.257,297	-
Q5P5P6 (Q5) a partir de P6	150.770,700	250.257,297	-
Q4P3P4 (Q4) a partir de P3	150.796,210	250.370,205	-
Q4P3P4 (Q4) a partir de P4	150.796,210	250.370,205	-
Q2P2P3 (Q2) a partir de P2	150.710,893	250.202,987	-
Q2P2P3 (Q2) a partir de P3	150.710,893	250.202,987	-
RECF	150.000,000	250.000,000	4,217

Fonte: Autor (2022).

*o ponto Q2 se encontra em parte mais elevada do prédio.

Para os pontos Q1, Q6 e Q3 (Q1P1P2, Q6P8P1 e Q3P3P4)¹³ que não apresentaram resultados definidos entre o intervalo estatístico definido pela distribuição Qui-Quadrado, utiliza-se o ajuste em rede geodésica 3D e distância inclinada aproximada. Novamente, o mesmo procedimento anterior, para os pontos Q6, Q5, Q4 e Q2 (Q6P6P7, Q6P7P8, Q5P5P6, Q4P3P4 e Q2P2P3) também foi realizado, agora com uso de coordenadas aproximadas (Tabela 38), e Tabela 16 (ajuste em rede 3D) para obtenção da distância horizontal e, por meio desta, a distância inclinada para cálculo da Interseção Espacial Analítica, o resultado é visto na Tabela 46.

¹³ Os pontos Q1P1P2 (Q1), Q6P8P1 (Q6) e Q3P3P4 (Q3) são obtidos através das equações (33) e (34) dadas em HÄBLER e WACHSMUTH (1984).

Tabela 46 - Coordenadas calculadas pelo método da Interseção Espacial Analítica com uso de coordenadas ajustadas em rede geodésica 3D e distância inclinada aproximada.

Triângulo e Ponto de Detalhe (Q)	X (m)	Y (m)	Z(m)
Coordenadas geodésicas locais			
Q1P1P2 (Q1) a partir de P1	150.699,693	250.103,625	51,207
Q1P1P2 (Q1) a partir de P2	150.699,693	250.103,625	51,258
Q6P8P1 (Q6) a partir de P8	150.709,990	250.101,419	51,322
Q6P8P1 (Q6) a partir de P1	150.709,990	250.101,419	51,204
Q3P3P4 (Q3) a partir de P3	150.785,994	250.372,421	51,004
Q3P3P4 (Q3) a partir de P4	150.785,994	250.372,421	51,083
Coordenadas topográficas planas locais			
Q1P1P2 (Q1) a partir de P1	150.699,693	250.103,628	-
Q1P1P2 (Q1) a partir de P2	150.699,693	250.103,628	-
Q6P8P1 (Q6) a partir de P8	150.709,990	250.101,422	-
Q6P8P1 (Q6) a partir de P1	150.709,990	250.101,422	-
Q3P3P4 (Q3) a partir de P3	150.785,992	250.372,425	-
Q3P3P4 (Q3) a partir de P4	150.785,992	250.372,425	-
RECF	150.000,000	250.000,000	4,217

Fonte: Autor (2022).

Os resultados obtidos pela Interseção Espacial Analítica com uso dos dados ajustados em rede (Pontos de Referência) são os mesmos que para as outras estratégias. Com esta metodologia (ajuste em rede 3D e Interseção Espacial Analítica) é possível, além de obter a altitude do prédio (SGL) com acurácia, analisar erros relacionados aos Pontos de Referência. Como exemplo, na Tabela 45, dada anteriormente, a determinação de Q6 (Q6P6P7) a partir do ponto P7; que resulta uma diferença de 0,056 m e 0,022 m nos eixos X e Y (SGL), respectivamente, quando comparados aos valores considerados verdadeiros (coordenadas P7 dado na Tabela 10).

Os resultados obtidos, Tabela 46, com uso de coordenadas dos Pontos de Referência pelo ajuste em rede 3D, não apresentaram diferenças em relação a Tabela 38, método da Interseção Espacial Analítica que se utiliza de forma direta das coordenadas do Posicionamento GNSS Relativo Estático e modelos de transformação (WOLF e DEWITT, 2000) (FAZAN, 2007). Evidenciando a possibilidade de uso do método sem perda de acurácia. As Tabelas 15 a 17 mostram detalhes do ajustamento em rede geodésica 3D.

As coordenadas dos Pontos-Objeto também poderiam ter sido determinadas de forma direta; para tanto, o ajuste em Rede Geodésica 3D consideraria as observações aos pontos altos e não somente as observações aos Pontos de

Referência (entre vértices da Poligonal e entre as bases formadas para a Interseção a Vante). Portanto, para esta metodologia utilizou-se apenas as observações aos Pontos de Referência (método indireto).

6.9 RESULTADOS E DISCUSSÃO: O USO DE DADOS AJUSTADOS EM REDE PARA CÁLCULO DA INTERSEÇÃO A VANTE 2D

Esta seção tem como propósito apresentar de forma direta, após à Interseção Espacial Analítica com o uso de dados ajustados em Rede 3D; o cálculo da Interseção a Vante 2D (por meio de modelo de ajuste) com as mesmas coordenadas (da Tabela 16). Como uma outra estimativa realista das coordenadas das arestas.

Na Tabela 47 abaixo são dados os valores da Interseção a Vante 2D por Ângulos Azimutais com o uso das coordenadas dos Pontos de Referência ajustadas em Rede 3D.

Tabela 47 – Valores da Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais (HÄBLER e WACHSMUTH, 1984) com o uso das coordenadas dos Pontos de Referência ajustadas em Rede 3D.

Triângulo e Ponto de Detalhe (Q)	Coordenada ajustada X (m)	Desvio-Padrão em X σ_X (m)	Coordenada ajustada Y (m)	Desvio-Padrão em Y σ_Y (m)	*Precisão horizontal (mm)	Qui-Quadrado Calculado
Coordenadas geodésicas locais						
Q6P6P7 (Q6)	150.709,914	$\pm 0,003$	250.101,452	$\pm 0,003$	4,242	2,53
Q6P7P8 (Q6)	150.709,968	$\pm 0,003$	250.101,440	$\pm 0,004$	5,000	2,44
Q5P5P6 (Q5)	150.770,699	$\pm 0,004$	250.257,278	$\pm 0,002$	4,472	2,94
Q4P3P4 (Q4)	150.796,218	$\pm 0,002$	250.370,187	$\pm 0,003$	3,605	4,95
Q2P2P3 (Q2)	150.710,896	$\pm 0,005$	250.202,976	$\pm 0,005$	7,071	5,20
Coordenadas topográficas planas locais						
Q6P6P7 (Q6)	150.709,914	$\pm 0,003$	250.101,456	$\pm 0,003$	4,242	2,53
Q6P7P8 (Q6)	150.709,968	$\pm 0,003$	250.101,444	$\pm 0,004$	5,000	2,44
Q5P5P6 (Q5)	150.770,699	$\pm 0,004$	250.257,284	$\pm 0,002$	4,472	2,94
Q4P3P4 (Q4)	150.796,217	$\pm 0,002$	250.370,192	$\pm 0,003$	3,605	4,95
Q2P2P3 (Q2)	150.710,893	$\pm 0,005$	250.202,981	$\pm 0,005$	7,071	5,20
RECF	150.000,000		250.000,000			

Fonte: Autor (2022).

Também se fez necessária a diferença entre estas novas coordenadas calculadas (Tabela 47) e as coordenadas apresentadas anteriormente, pela Interseção a Vante 2D com o uso das coordenadas GNSS transformadas (SGL e STL, origem no ponto RECF), vistas na Tabela 34.

As diferenças entre as Tabelas 47 e 34, nesta ordem, são dadas na Tabela 48.

Tabela 48 – Diferenças entre resultados da Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais com uso das coordenadas dos Pontos de Referência (ajustadas em Rede 3D e coordenadas GNSS, Tabelas 47 e 34, nesta ordem).

Triângulo e Ponto de Detalhe (Q)	Diferenças de coordenadas em X(mm)	Diferenças de coordenadas em Y (mm)
Coordenadas geodésicas locais		
Q6P7P8 (Q6)	49,00	03,00
Q5P5P6 (Q5)	-04,00	-15,00
Q4P3P4 (Q4)	05,00	-14,00
Q2P2P3 (Q2)	01,00	-08,00
Coordenadas topográficas planas locais		
Q6P7P8 (Q6)	47,00	04,00
Q5P5P6 (Q5)	-01,00	-13,00
Q4P3P4 (Q4)	07,00	-13,00
Q2P2P3 (Q2)	00,00	-06,00

Fonte: Autor (2022).

As diferenças de coordenadas entre os dois métodos que se utilizam da Interseção a Vante 2D por meio de Ângulos Azimutais é representativa, mesmo para os pontos que estão no intervalo estatístico do ajuste de observações (estatísticas aceitas).

O resultado mostra a importância de se utilizar os dados ajustados em Rede 3D como mais uma estatística de referência às arestas. Na tabela acima (Tabela 48), verifica-se que apenas a aresta Q2P2P3 (Q2) apresenta uma diferença pequena em termos de discrepância, isto é, melhor resultado. No entanto, todos os resultados da Tabela 47 podem ser utilizados para a determinação das arestas. Pois, permitem que se estime valores dentro do intervalo estatístico do teste de hipóteses.

Para cálculo das distâncias entre (coordenadas conhecidas, base conhecida) e o ponto Xo (parâmetros aproximados) no método de Int. a Vante 2D, por ângulos azimutais, utiliza-se as equações (33) e (34). Como descrito, seção 6.7.1., a medição de distância por pulso para cada aresta não foi possível. Os valores de desvios-padrões calculados, e respectivas precisões horizontais são dadas na Tabela 47. Para os Pontos de Referência (ajuste em Rede 3D, Tabela 16) são dadas estimativas dos desvios-padrões do ajustamento. Pode-se afirmar que estas são estimativas realistas quando comparadas aos desvios-padrões das coordenadas GNSS transformadas para o SGL e STL. Na Tabela 17 é possível se verificar os Erros Esféricos bidimensionais (SGL).

Aponta-se, portanto, que os resultados vistos na Tabela 47 (Interseção a Vante 2D por Ângulos Azimutais com o uso das coordenadas dos Pontos de

Referência ajustadas em Rede 3D) também podem ser considerados como referência para os propósitos da dissertação.

Com relação ao objetivo específico, propor procedimento para determinar pontos altos e inacessíveis situados em arestas de edificação predial; os métodos são vistos nas subseções e seções 3.4.2, 3.4.4, 5.1 e 5.2 e resultados e análises, seções 6.6 a 6.9, respectivamente.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONCLUSÕES

Além de pertencer ao Campus Recife da UFPE, a área onde se situa o prédio em estudo está sendo reestruturada, o que possibilita estudos de diversos temas da cartografia; portanto, o planejamento e execução deste levantamento geodésico para o Edifício SUDENE é importante.

Esta teve como princípio a obtenção de dados de campo; levantamentos geodésicos para finalidades específicas, como referências para planejamentos dos métodos de Nivelamento Trigonométrico e Interseção a Vante de pontos-objeto para trabalhos de mapeamento 3D. Nesta pesquisa, portanto, foram aplicados os Métodos Terrestres de Medição planialtimétrica com estação total (MTMs) denominados de Interseção a Vante (sem a medição de distância) e Nivelamento Trigonométrico com visadas unilaterais para a determinação planialtimétrica de pontos altos e inacessíveis.

Mesmo aplicando outros métodos de medição como os fotogramétricos e GNSS, p.ex., quase sempre é necessário integrá-los aos métodos terrestres de medição, isto é, os métodos de Interseção a Vante, a Ré, Poligonação, Triangulação, Redes Horizontais Angulares e Lineares.

Uma das proposições da dissertação é a aplicação do ajustamento de redes geodésicas 3D integrando dados obtidos com GNSS (Posicionamento Geodésico Relativo Estático) e com Estação Total (Poligonação e Interseção a Vante) para a determinação 3D de pontos-objeto, método indireto; isto é, com uso de observações apenas aos Pontos de Referência.

As especificações de levantamentos geodésicos- topográficos adotadas na metodologia se referem às normas brasileiras. Para a análise da precisão posicional foram adotados posicionamentos GNSS e método da Interseção a Vante 2D, descrito-abordado em (HÄBLER e WACHSMUTH, 1984; GRUBER e JOECKEL, 2011).

Os resultados, análise de precisão posicional, quanto ao método de Interseção a Vante 2D por meio de ângulos azimutais proporciona aos usuários possibilidades de várias aplicações, inclusive quanto a norma Decreto nº 9.310, de 2018 para o cadastro urbano no Brasil.

Com relação ao método da Interseção Espacial Analítica, útil para casos em que se tenha determinações altimétricas; no caso desta pesquisa, resultados consistentes com a realidade da edificação foram obtidos com uso do modelo geoidal local e altitudes geodésicas GNSS.

As altitudes (ortométricas) dos pontos altos foram calculadas pela Interseção Espacial Analítica a partir do uso de dados do Nivelamento Trigonométrico por caminhamento para os Pontos de Referência. Estas foram avaliadas tendo-se como referência, as altitudes ortométricas calculadas pela Int. Espacial Analítica com uso de modelo geoidal local e altitudes geodésicas GNSS; com relação às diferenças de altitudes ortométricas encontradas para as arestas, Tabelas 39 e 38, seção 6.7, a diferença determinada variou de 6 mm (arestas Q4 e Q3), menores valores, até 62 mm (aresta Q5), maior diferença encontrada. O Nivelamento Trigonométrico para os Pontos de Referência foi realizado conforme Norma ABNT NBR 13133 (1994), pág. 18, Tabela 9; isto é, com visadas unilaterais e com duas séries de leituras nas posições direta e inversa utilizando a técnica de medição dos pares conjugados (para Teodolito classe 2, (classe 2 conforme Norma ABNT NBR 13133 (1994)), de média precisão. Mais detalhes sobre o Nivelamento Trigonométrico para os Pontos de Referência podem ser consultados na seção 6.5, e Tabela 29. Na Tabela 31, apresentam-se as altitudes ortométricas dos Pontos de Referência determinadas por modelo geoidal local em conjunto com as altitudes geodésicas GNSS (h), as quais são adotadas como referência. Na nova atualização da norma ABNT NBR 13133, (2021), a classificação de estações totais foi alterada. Estas podem ser consultadas nas páginas 10 e 11 da mesma.

Com relação à planimetria, o maior erro calculado com uso da Int. Espacial Analítica foi para o ponto Q2, triângulo Q2P2P3, no qual foi obtida uma diferença de -12 mm na componente X com relação ao método de Interseção a Vante 2D por meio de ângulos azimutais.

Embora scanners a laser terrestres estejam sendo amplamente utilizados para levantamentos de alta precisão, sua tecnologia é baseada no princípio de medição de distâncias, na qual o alcance é correlacionado à precisão (HADDAD, 2011), e conforme Fawzy (2019) a precisão dos pontos é restrita à distâncias curtas (1-150m). Enfatiza-se, nesta pesquisa, que para distâncias curtas pode-se aplicar a Interseção Espacial Analítica sem prejuízo ao trabalho, visto que o método foi desenvolvido como uma das principais características/ aplicações o seu uso para leituras na indústria, portanto, visadas à curtas distâncias. Recomenda-se também que sejam realizadas leituras superabundantes para que o MMQ possa ser aplicado. Kahmen e Faig (1988) definem, neste caso, especificamente, para o Nivelamento Trigonométrico, distâncias curtas distâncias de até 250 m.

Portanto, para a Int. Espacial Analítica, observa-se a correta utilização do

método com relação às distâncias a serem medidas (distâncias curtas); e ainda, com redundância de observações e maior número de distintos pontos de Referência para a possibilidade de ajuste dos dados.

Outro aspecto levantado nesta pesquisa, é que apesar da Norma sobre Sistema de Projeção Topográfica ou Sistema Topográfico Local ser editada em 1994, Norma ABNT NBR 13133 (1994), primeira versão da norma, há poucas cidades no Brasil nas quais o STL foi implantado. A utilização do STL é condizente com as normas de levantamentos geodésicos atualmente vigentes no Brasil. A utilização do Sistema Topográfico Local em alguns dos municípios brasileiros é muito importante por se encontrarem em limites de fusos UTM.

Os padrões de acurácia adotados são estabelecidos pelas normas e especificações de levantamentos geodésicos vigentes no Brasil (ABNT NBR 13133 (2021)(1994); IBGE (2017) e ABNT NBR 14166 (1998)). O controle geométrico das arestas da edificação, nesta pesquisa, é realizado considerando-se coordenadas geodésicas locais; nesta dissertação utilizou-se como origem do sistema a origem do SGL da Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM) campus Recife da UFPE.

Ressalta-se também a importância da estação PERC da RBMC disponível para a pesquisa e todo o apoio material e as definições e materializações efetuadas anteriormente (origem da RRC - UFPE dada em (MENDONÇA et al., 2010)) e (RN_EPS03, disponibilizada em Silva e Seixas (2017)), esta, próxima à área do Edifício. Os resultados conseguidos nesta reiteram a importância do pré-planejamento e uma série de detalhes a serem levantados durante a sua execução.

Ainda, com relação à aquisição e correto processamento de dados obtidos com GNSS; observa-se como exemplo a leitura correta da altura da antena, até o centro de fase da mesma, medidas até o centro de fase disponibilizadas pelos fabricantes e informações de instalação, disponíveis nos memoriais descritivos das estações de referência, disponibilizados pelo IBGE, e métodos e técnicas de levantamentos geodésicos/ topográficos.

Observa-se também a proximidade dos valores calculados para as coordenadas geodésicas locais e topográficas planas locais, que apresentam discrepâncias milimétricas (Tabelas 10 e 27), respectivamente. A importância da localização da origem RECF do SGL e STL (e, neste último, das componentes do desvio da vertical, componente meridiana, ξ , e componente da primeira vertical, η (GARNÉS, 2012)), amplamente divulgadas, o que possibilita mais análises nesta região de estudo por outros profissionais. Além disso, o Modelo Geoidal Local – Recife (PE)

desenvolvido por Garnés (2017), Lima (2017) utilizado, que possibilitou a interpolação de altitudes ortométricas acuradas para a área de levantamentos geodésicos/topográficos.

E por último, o ajustamento em Rede 3D ou Rede Geodésica 3D apresentou maior acurácia se utilizando apenas de coordenadas GNSS (transformadas para o SGL) e observações relativas aos métodos topográficos (distâncias inclinadas, ângulos horizontais e zenitais) entre os vértices do método de Poligonação e entre as bases formadas para a Interseção a Vante. Com a introdução de distâncias inclinadas GNSS, seção 6.3.2.1., o ajuste resulta em uma estatística mais elevada conforme citado no texto.

Apenas observações aos Pontos de Referência são consideradas para o ajustamento em rede 3D, (as observações aos pontos altos no ajustamento em rede 3D não são consideradas). O uso de Pontos de Referência com o ajuste em Rede 3D resultou em diferenças milimétricas, e em sua maioria em resultados iguais ao método convencional utilizado para cálculo da Interseção Espacial Analítica. Comparação das Tabelas 38 (seção 6.7) e 45 e 46 (seção 6.8); também são comparadas as Tabelas 34 (seção 6.6) e 45 (seção 6.8). Com isso, pode-se afirmar que o método (ajuste em Rede 3D e Inter. Espacial Analítica) quando comparado apenas ao cálculo da Interseção Espacial Analítica com uso das coordenadas GNSS transformadas (no SGL) pode ser utilizado sem perda de acurácia para a finalidade estabelecida nesta dissertação. Isto é, estes não apresentam diferenças significativas.

A proposição de métodos para determinação planialtimétrica de pontos na fachada da edificação (arestas) obteve resultados de alta acurácia (ordem milimétrica). Para o ajuste em Rede Geodésica 3D (com o uso de distâncias inclinadas GNSS) a altimetria apresentou erros, os quais foram de $\pm 0,422$ m e $\pm 0,510$ m, (σ_z), por exemplo, conforme seção 6.3.2.1.

Resultados com acurácia milimétrica também foram determinados com o uso da Interseção Espacial Analítica e de modelo geoidal local, assim como, altitudes geodésicas GNSS sobre RRNN para a área de levantamentos.

Uma sistematização elaborada para esta dissertação está resumida no Fluxograma Procedimentos Metodológicos, dada na seção 4.3., Síntese Metodológica. O correto levantamento e processamento de cada etapa dos dados é importante para a determinação final dos Pontos. Algumas das etapas já citadas no Fluxograma, como a Obtenção dos dados são extremamente importantes, pois definem ou não sua aplicação prática. Entre os pontos mais importantes cita-se o Planejamento e a

Especificações dos levantamentos. Execução do levantamento GNSS. Execução do levantamento topográfico. Processamentos dos dados e Análises de dados inconsistentes, e por último, o cálculo para cada método e técnica utilizado.

7.2 RECOMENDAÇÕES

Algumas das recomendações a serem consideradas para possíveis trabalhos futuros são com relação aos levantamentos topográficos, métodos da Poligonação com centragem forçada e Nivelamento Trigonométrico; considera-se realizar novamente estes métodos (ou etapas) utilizando-se mais séries de leituras de campo, recomenda-se também consultar as alterações efetuadas nesta nova versão da Norma Técnica ABNT NBR 13133. Há a consideração de que o Nivelamento Trigonométrico também seja relacionado a mais de uma RN (referência de nível) e, possivelmente, uma RN da RAFB (Rede Altimétrica Fundamental do Brasil). Recomenda-se o uso da versão 2021 da Norma ABNT NBR 13133 para a execução do Nivelamento Trigonométrico e outros métodos terrestres de medição planialtimétrica com estação total. Há também a possibilidade de estudos quanto à Interseção Espacial Analítica e o uso conjunto com o método de Nivelamento Trigonométrico com visadas unilaterais. A técnica *Leap Frog* também poderia ser utilizada para o levantamento altimétrico de todos os Pontos de Referência e não apenas para a determinação altimétrica do Ponto de Referência P1.

Recomenda-se também por meio do Nivelamento Geométrico de Altíssima Precisão, a materialização de novas RRNN para a área de estudo; para que se possa ter resultados mais próximos das altitudes ortométricas determinadas por modelo geoidal local e altitudes geodésicas GNSS e estimativas de desvios-padrões para cada RN a ser implantada. Assim como possuir parâmetros para avaliar o método de Nivelamento Trigonométrico executado por lances de nivelamento. Portanto, obter altitudes geodésicas sobre RRNN para a área de levantamentos.

Caso se deseje realizar o Nivelamento Geométrico de Altíssima Precisão, é importante alterar a materialização dos vértices de hastes metálicas para pinos metálicos com superfície esférica para o apoio das miras de Nivelamento Geométrico; o qual não foi o objetivo na época da execução do levantamento.

Com relação aos métodos de Interseção a Vante 2D, principalmente para cálculo e ajuste por meio de Ângulos Azimutais, recomenda-se a realização de novas leituras para os Pontos-Objeto nos quais os triângulos ajustados apresentaram

resultados fora do intervalo de aceitação do teste de hipóteses do ajustamento (hipótese básica rejeitada ao nível de significância α de 5%); e ainda, a possibilidade de leituras para mais Pontos-Objeto (novos pontos ou arestas a serem determinados), maior quantidade de medidas para o controle geométrico da edificação.

Outra possibilidade, neste caso, com relação ao software AstGeoTop, é que o desvio da vertical seja implementado para os cálculos; assim como o ajuste em Rede 3D (Rede Geodésica 3D) utilizando-se de leituras aos pontos altos, isto é, Pontos-Objeto. Na Síntese Metodológica, seção 4.3., 5ª ETAPA, apenas observações aos Pontos de Referência são consideradas para o ajustamento em rede 3D, (as observações aos pontos altos no ajustamento em rede 3D não são consideradas).

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 14166 (1998). **Rede de Referência Cadastral Municipal – Procedimento**. Norma Técnica. Válida a partir de 30.09.1998, ABNT, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 23 p. (ABNT NBR 14166, 1998).
- ABNT NBR 13133 (2021). **Execução de Levantamento Topográfico – Procedimento**. Norma Técnica. Válida a partir de 24.08.2021, ABNT, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 57p. (ABNT NBR 13133, 2021).
- ABNT NBR 13133 (1994). **Execução de Levantamento Topográfico – Procedimento**. Norma Técnica. Válida a partir de 30.06.1994, ABNT, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 35p. (ABNT NBR 13133, 1994).
- ABNT NBR 14645-1 (2001). **Elaboração do “como construído” (as built) para edificações – Parte 1: Levantamento planialtimétrico e cadastral de imóvel urbanizado com área até 25000 m², para fins de estudos, projetos e edificação – Procedimento**. Norma Técnica. ABNT, Rio de Janeiro-RJ, Brasil. (ABNT NBR 14645-1, 2001).
- ABNT NBR 14645-2 (2005) – **Elaboração do “como construído” (as built) para edificações – Parte 2: Levantamento planimétrico para registro público, para retificação de imóvel urbano – Procedimento**. Norma Técnica. ABNT, Rio de Janeiro-RJ, Brasil. (ABNT NBR 14645-2, 2005).
- ABNT NBR 14645-3: 2011 – **Elaboração do “como construído” (as built) para edificações – Parte 3: Locação topográfica e controle dimensional da obra – Procedimento**. Norma Técnica. Versão corrigida. ABNT, Rio de Janeiro-RJ, Brasil. (ABNT NBR 14645-3, 2011).
- ALVES, T. (2017). Foto. **Fachada Edifício SUDENE**. Situado no Bairro Engenho do Meio, Recife-PE, Brasil. <https://www.flickr.com/photos/tarsio/34299588740/>. Acesso em 1º dezembro 2020.
- ALVES, D.B.M., PROL, F.S. **GNSS**. Grupo de Estudos em Geodésia Espacial. 2013. Disponível em: <<http://www.fct.unesp.br>>. Acesso em: 09 Abr. 2014.
- ANDRADE, L. S.; ALVES, D. B. M. Novas Observáveis GPS e a Melhoria na Acurácia do Posicionamento. **Brazilian Journal of Cartography** 68(5): 991-1004. 2016.
- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba; SBEE, 2003; 2a edição. 274p.
- AMOR, M.; LUTTENBERGER, C. Introducción al concepto de redes vrs (virtual reference stations). In: . Madrid: In:**VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía**, 2004.
- ARANA, J. M. **Introdução à Geodésia Física**. Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente. 2009.
- ARANA, J. M. **O Uso do GPS na Elaboração de Carta Geoidal**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná (UFPR). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Curitiba, PR, Brasil. 2000.

AUGUSTO, F.; DOMINGUES, A. **Topografia e Astronomia de Posição para engenheiros e arquitetos**. Editora McGraw-Hill do Brasil. 1939.

BLACHUT, T. J., CHRZANOWSKI, A., SAASTAMOINEN, T. J. **Urban surveying and mapping**. Springer-Verlag, New York, 1979.

BLITZKOW, D. Sistemas altimétricos e determinação do geoide. **Relatório técnico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes**. São Paulo – SP, 2004.

BORGES, A.C. **Topografia**. 2ª ed. São Paulo. EDITORA BUCHER. 2010.

BOUTELOUP, D. Chapitre 4. Introduction a la Géodésie Physique. *In*: BOUTELOUP, D. **Cours de Géodésie**. IGN (Institut Geographique National) – ENSG (École Nationale des Sciences Géographiques): France. 2002.

BLITZKOW, D.; CAMPOS, I. O.; FREITAS, S.R.C. Altitude: o que interessa e como equacionar. *In*: **Anais do I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife-PE, 1 a 3 de setembro de 2004.

BRASIL. (2018). **Lei n.º 9.310, de 15 de março de 2018**. Institui as normas gerais e os procedimentos aplicáveis à Regularização Fundiária Urbana e estabelece os procedimentos para a avaliação e a alienação dos imóveis da União. Publicação Original Diário Oficial da União de 16/03/2018 (p.7, col.2). Retificação (Seq.1) Diário Oficial da União de 19/03/2018 (p.2, col.2). Brasília, DF. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/norma/26374512>. Acesso em: 05 out. 2020.

BRASIL. (1984). **Decreto n.º 89.817, de 20 de junho de 1984**. Dispõe sobre as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 22 de junho de 1984.

CALADO, L. G. L. P.; MENDONÇA, F. J. B.; MENDONÇA, R. L.; MELO, W. D. A. Cálculo de uma poligonal enquadrada no plano topocêntrico com software livre pelo método dos Mínimos Quadrados. *In*: **VI Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife-PE, 24 e 25 de agosto de 2016. Editora UFPE.

CANTO, L. F. C.; SEIXAS, A. Auscultação Geodésica em Torres Eólicas Onshore: Definição do Sistema de Referência e de Medição para o Monitoramento. **Brazilian Journal of Cartography**, 72(2): 294-311. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv72n2-50539>.

CAPITAINE, N.; GUINOT, B.; MCCARTHY, D. D. (2000): Definition of the Celestial Ephemeris origin and of UT1 in the International Reference Frame. **Astronomy and Astrophysics**: 355: 398-405.

CASTRO, A. L. P. **Nivelamento através do GPS: avaliação e proposição de estratégias**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), 2002. 186 f.

CHRZANOWSKI, A. Implementation of trigonometric height traversing in geodetic levelling of high precision. **Technical Report n. 142. Geodesy and Geomatics, Engineering, University of New Brunswick, Canada.** 1989.

COLLIER, P.; CROFT, M. Heights from GPS in an engineering environment, **Survey Review**, (264): 76-86 e (265): 11-18. 1997.

DALMOLIN, Q. **Ajustamento Por Mínimos Quadrados.** Curitiba: Imprensa Universitária – UFPR, 2002. 175p.

DIÁRIO DE PERNAMBUCO. (1974). **Presidente inaugura sede da Sudene às 17 horas.** Recife, Brasil, 28 jan. de 1974, p.3.

DONG, D.; HERRING, T. A.; KING, R. W. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data. **Journal of Geodesy** 74, 200-214, 1998.

DREWES, H., SÁNCHEZ, L., BLITZKOW, D., FREITAS, S.R.P. Documento técnico sobre o sistema de referência vertical para a América do Sul. **SIRGAS, Boletim Informativo n.6**, 2002, p. 21–29.

ELLMANN, A. (2005). **[SHGEO software packages – An UNB Application to Stokes-Helmert Approach for Precise Geoid Computation.** Reference manual II]. New Brunswick, Canadá. University of New Brunswick. 43 p.

EL-RABBANY, A. (2002). **Introduction to GPS: the global positioning system.** Artech House mobile communications series. Boston, London: ARTECH HOUSE, INC. 176 p. ISBN 1-58053-183-1.

FAZAN, A. J. **Predição de sombras de edifícios sobre vias urbanas com base em um modelo digital de elevações e dados de imagens aéreas de alta-resolução.** Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente, 2007. 101 f.

FAWZY, H. E. D. (2019). 3D laser scanning and close-range photogrammetry for buildings documentation: A hybrid technique towards a better accuracy. **Alexandria Engineering Journal**, 58(4): 1191-1204.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.10.003>.

FEATHERSTONE, W. E. An updated explanation of the Geocentric Datum of Australia and its effects upon future mapping. **The Australian Surveyor** 41 (2), pp. 121-130, DOI: 10.1080/00050326.1996.10441738, 1996.

FEATHERSTONE, W. E.; DENTITH, M. C.; KIRBY, J. F. Strategies for the Accurate Determination of Orthometric Heights from GPS, **Survey Review**, 34, 267.1998.

FEATHERSTONE, W. E.; KUHN, M. Height systems and vertical datums: a review in the australian context. **Journal of Spatial Science** 51(1): 21-42, DOI:10.1080/14498596.2006.9635062, 2006.

FERREIRA, R. **O jardim de Burle Marx para a Sudene: um patrimônio moderno no Recife**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado de Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2018.

FERREIRA, T. S.; DE SEIXAS, A.; ROMÃO, V. M. C. Conceituação de Campos de Pontos na Medição de Deformação de Objetos. In: **Anais do I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife-PE, 1 a 3 de setembro de 2004.

FRANÇA, L.; DE SEIXAS, A.; GAMA, L.; MORAES, J. Optimized determination of 3D coordinates in the survey of inaccessible points of buildings - example of application implemented in free software. **Bulletin of Geodetic Sciences**. 27(2): e2021017, 2021.

FREITAS, G. L. (2019). **Ajustamento de Rede Geodésica 3D por Trilateração**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 110 f.

GALO, M. **Cartografia II: notas de aulas do curso de graduação em Engenharia Cartográfica**. Universidade Estadual Paulista (UNESP). Presidente Prudente. 2009.

GALO, M. **Sistemas de projeção derivados da Projeção Transversa de Mercator: conceitos básicos e formulação**. ed. Preliminar. São Paulo: Universidade Estadual Paulista (UNESP). 2006.

GAMA, L.F., SEIXAS, A., MORAES, J.N., SILVA, E.V.S., GALVÃO, T.B. Controle de Qualidade de Levantamentos Cadastrais para a Homogeneização de Parcelas Territoriais Urbanas. **Brazilian Journal of Cartography** 67(2): 411-433. 2015.

GAMA, L.F.; SEIXAS, A.; SOUZA, A.M.B. Implantação e Análise de Estruturas Geodésicas Planimétricas Obtidas por GPS e Estação Total: Aplicações em Levantamentos Cadastrais Urbanos. **Brazilian Journal of Cartography** 64(2): 227-247. 2012.

GAMA L.F. **Experimentos e Análises Metodológicas do Desempenho de Estruturas Geodésicas Planimétricas Implantadas com GPS e Estação Total: Aplicações em Levantamentos Cadastrais Urbanos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da UFPE. Recife. 2008.

GARNÉS, S. J. A. **Geodésia** – Notas de aula. Recife: UFPE, 2022.

GARNÉS, S. J. A. AstGeoTop. **Software**. Recife-PE: Departamento de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal de Pernambuco. Compilação. 2022.

GARNÉS, S. J. A. AstGeoTop. **Software**. Módulo: Planialtimetria. RECIFE/PE. Versão © 2022. Departamento de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2022a.

GARNÉS, S. J. A. AstGeoTop. **Software**. Módulo: Ajustamento de Redes Geodésicas 3D. RECIFE/PE. Versão © 2022. Departamento de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2022b.

GARNÉS, S. J. A. AstGeoTop. **Software**. Recife-PE: Departamento de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal de Pernambuco. Compilação. 2019.

GARNÉS, S. J. A. AstGeoTop. **Software**. Módulo: Modelo Geoidal Local - RECIFE/PE. Versão © 2017.12.08. Departamento de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017.

GARNÉS, S. J. A. AstGeoTop. **Software**. Cálculo do Desvio da Vertical. Versão © 2012.05.11. Departamento de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal de Pernambuco. Compilação. 2012.

GARNÉS, S. J. A.; SIQUEIRA, V. S.; CACHO, J. P. **Definição para implantação do Sistema Topográfico Local de Campo Grande – MS e análise das fórmulas da NBR 14.166/1998**, In. IV CBCG, IV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba. 2005.

GARNÉS, S. J. A. **Sistema de projeção e orientação das plantas topográficas**. In: COBRAC 98. Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, UFSC Florianópolis 18 a 22 de outubro 1998.

GARNÉS, S. J. A. **Ajustamento Paramétrico Por Mínimos Quadrados Com Análise na Estabilidade da Solução**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Universidade Federal do Paraná- UFPR, Curitiba (Brasil), 1996. 164 p.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba. Editora UFPR. 1994. 319p.

GEO WEEK NEWS. **Novas estações totais da Leica se inclinam para a automação**. Disponível em: <https://www.geoweeknews.com/news/new-total-stations-from-leica-lean-in-to-automation>. Acesso em: 20 junho 2021. (GEO WEEK NEWS, 2020a).

GEO WEEK NEWS. **A Trimble anuncia o R12i GNSS com compensação de inclinação baseada em IMU inovadora**. Disponível em: <https://www.geoweeknews.com/news/trimble-announces-the-r12i-gnss-with-groundbreaking-imu-based-tilt-compensation>. Acesso em: 20 junho 2021. (GEO WEEK NEWS, 2020b).

GHILANI, C.D., WOLF, P.R. **Geomática** / Charles D. Ghilani, Paul R.Wolf; Tradução Daniel Vieira; revisão técnica Alessandro Salles Carvalho – São Paulo: Pearson education do Brasil, 2013. Title original: Elementary Surveying: an Introduction to Geomatics. 13 ed. Norte Americana.

GHILANI, C. D; WOLF, P. R. **Adjustment Computations: Spatial Data Analysis**, Fourth Edition / Charles D. Ghilani, Paul R.Wolf.— 4th. ed. John Wiley & Sons. 640 p. ISBN-13: 978-0-471-69728-2, 2006.

GOMES, J. P.; VEIGA, L. A. K.; DOS SANTOS, D. P.; FAGGION, P. L. Determinação de desníveis de precisão com nivelamento trigonométrico utilizando estação total. **Bulletin of Geodetic Sciences** 13(1): 127-150 pp. 2007.

GOMES, D.S.; MENDONÇA, F.J.B.; SEIXAS, A. (2021). Determinação de Coordenadas Tridimensionais para os Levantamentos do Patrimônio Cultural Edificado

com Fotogrametria Digital. **Anuário do Instituto de Geociências**, 44: 37203. DOI 1982-3908_2021_44_37203.

GOMES D.S. **Metodologia para georreferenciamento 3D com fotogrametria digital nos levantamentos do patrimônio cultural edificado**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife. 2020. 190 f.

GRUBER, F. J.; JOECKEL, R. (2011). **Formelsammlung fuer das Vermessungswesen**. 15. Auflage. Studium Viemegt: Teubner. 184p.

HÄBLER, J., WACHSMUTH, H. (1984). **Vermessungs beruf**.

HADDAD, N. A. (2011). From ground surveying to 3D laser scanner: A review of techniques used for spatial documentation of historic sites. **Journal of King Saud University-Engineering Sciences**, 23(2): 109-118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2011.03.001>.

HECK, B. Problems in the definition of vertical reference frames. In: SANSO, F. (Ed). Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy. **IAG Symposia** 127, 164-173, DOI: 10.1007/978-3-662-10735-5_22. Springer. 2004.

HEGER, R. **Receptor Trimble R12i**. 2021. (HEGER, 2021a)

HEGER, R. **SX10 A Revolução Tecnológica**. 2021. (HEGER, 2021b)

HEISKANEN, W.A.; MORITZ, H. **Physical geodesy**. San Francisco: Freeman and Co., 1967.

HERRING, T. A.; KING, R. W; MCCLUSKY, S. C. **Documentations for the GAMIT-GLOBK GPS Analysis Software: Release 10.71**. Cambridge: Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2020. Disponível em: <http://geoweb.mit.edu/gg/>. Acesso em: 14 abril 2021.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. (2008). **GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more**. New York: Springer-Verlag, 2008. 547p. ISBN-13: 978-3211730126.

IBGE. **Reajustamento da rede altimétrica com números geopotenciais**. IBGE/ Diretoria de Geociências. Coordenação de Geodésia. Rio de Janeiro -RJ, 2ª ed., 56 p. 2019.

IBGE. (2005). **Resolução do Presidente do IBGE Nº 1/2005**. Resolução - PR nº 01, de 25-02-2005 - Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro. 8 p.

IBGE- **Portal do IBGE**. <http://www.bdg.ibge.gov.br/> (IBGE, 2012).

IBGE. **Ajustamento Simultâneo da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro**. IBGE/ Diretoria de Geociências. Coordenação de Geodésia. Rio de Janeiro, 2011, 62p.

IBGE. **Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro**. IBGE/ Diretoria de Geociências. Coordenação de Geodésia. Rio de Janeiro, 2017. Acesso em: 10/03/2019.

IBGE. **Banco de dados do IBGE 2019**. Acesso em: 10/03/2019.

IBGE. **Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos: Coletâneas das Normas Vigentes**. IBGE/ Departamento de Geodésia. Rio de Janeiro, 1998, 74p.

IBGE. **Resolução – PR nº 22, de 21-07-83** – Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos, 1983 – www.ibge.gov.br. Acesso em: 02/07/2011.

IBGE. **Resolução - Padronização de Marcos Geodésicos**. 2008.

IBGE. **Resolução nº 23, de 21 de fevereiro de 1989**. Altera o Apêndice II da R. PR-22/83. Parâmetros para Transformação de Sistemas Geodésicos, Rio de Janeiro, p. 2-4, Fev.1984.

INCRA. **Norma técnica para georreferenciamento de imóveis rurais**. 3. ed. Rio de Janeiro: INCRA, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 19157: Geographic Information - Data Quality**. 2013.146 p. <https://www.iso.org/standard/32575.html>. Acesso em: 09/04/2021. (ISO 19157:2013).

JEKELI, C. Heights, the Geopotential, and Vertical Datums. **Report 459. Department of Geodetic Science, The Ohio State University**, Columbus, USA, 34p. 2000.

JEREZ, G. O.; ALVES, D. B. M. Assessment of GPS/GLONASS point positioning in Brazilian regions with distinct ionospheric behavior. **Bulletin of Geodetic Sciences** 26(2): e2020010, 2020.

JEREZ, G. O.; VIEIRA, J. V. E.; ALVES, D. B. M. Análise do Posicionamento por Ponto Preciso com dados GPS e GLONASS em diferentes latitudes. **Anuário do Instituto de Geociências** 43(4), p. 55-65, 2020.

JEREZ, G. O.; ALVES, D. B. M.; TACHIBANA, V. M. Multivariate analysis of combined GPS/GLONASS point positioning performance in Brazilian regions under different ionospheric conditions. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics** 187, p. 1-9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.03.003>.

JEREZ, G. O.; ALVES, D. B. M. Generation and Performance Analysis of GPS and GLONASS Virtual Data for Positioning Under Different Ionospheric Conditions. **Bulletin of Geodetic Sciences** 25(2), e2019007, 2019.

JEREZ, G. O. (2017). **Análise da integração GPS/GLONASS para posicionamento sob efeito de cintilação ionosférica**. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista UNESP, 155 f.

JEREZ, G. O.; ALVES, D. B. M.; SOUZA, J. S. Análise do uso combinado GPS/GLONASS no posicionamento sob efeito de cintilação ionosférica. RBC. **Brazilian Journal of Cartography** 67(1), p. 201-214, 2015.

KAHMEN, H. **Angewandte Geodäsie. Vermessungskunde**. 20. Aufl., 2005.

KAHMEN, H.; FAIG, W. (1988). **Surveying**. 1ª ed., Berlin: ED. De Gruyter. 578 p.

KUTTERER, H., NEILAN, R., BIANCO, G. Global Geodetic Observing System (GGOS). In: DREWES, H., HORNIK, H., ÁDÁM, J., RÓZSA, S. (Eds. 2012). The geodesist's handbook 2012. **J GEOD** 86, 10, 915-926. DOI - 10.1007/s00190-012-0584-1, 2012.

LANGLEY, R. B. **The GPS Observables**, GPS World 4(4), April 1993, pp. 52-59.

LIMA, D. F. V. de. **Desenvolvimento do modelo geoidal local do Recife com base em estruturas geodésicas altimétricas RRNN e GNSS**. Trabalho de Conclusão Curso (TCC). Orientador: Prof. Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés. Curso de Engenharia Cartográfica. Departamento de Engenharia. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017.

LUGNANI, J. B. **Introdução à fototriangulação**. Curitiba: Imprensa da Universidade Federal do Paraná, 1987, 134 p.

LUZ, R. T. **Estratégias para modernização da componente vertical do sistema geodésico brasileiro e sua integração ao SIRGAS**. 2008. 205 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, 2008. Disponível em: www.sirgas.org/fileadmin/docs/Roberto_Teixeira_Luz_Tese_de_Doutorado.pdf. Acesso em: jul. 2019.

MARTINS, D. O. **Determinação de coordenadas espaciais a partir do método das distâncias mínimas**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infraestrutura de Transporte, Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 2013.

MATOS, A.C.O.C. Metodologia de cálculo para o estabelecimento do IHRF no Brasil. In: **VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. 2018. (Apresentação de Trabalho/ Simpósio).

MATOS, A. C. O. C., BLITZKOW, D., GUIMARÃES, G. N., LOBIANCO, M. C. B., COSTA, S. M. A. (2012). Validação do MAPGEO 2010 e comparação com modelos do geopotencial recentes. **Bulletin of Geodetic Sciences** 18(1): 101-122. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1982-21702012000100006>.

McCORMAC, J.C. **Topografia**. Title original: Surveying. tradução Daniel Carneiro da Silva; revisão técnica Daniel Rodrigues dos Santos, Douglas Corbari Corrêa, Felipe Coutinho Ferreira da Silva – Rio de Janeiro: Editora LTC,. 5th ed., 2010. 391 p. ISBN: 978-85-216-1523-1.

MELO, M. F. O.; GOMES, S. O.; LIMA, V. N.; SEIXAS, A. Infraestrutura geodésica/topográfica para levantamento e locação de obras: Método da Poligonação com centragem forçada e método GNSS/RTK. In: **VII Simpósio Brasileiro de**

Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife-PE, 08 e 09 de novembro de 2018. Editora UFPE. p. 638-647.

MENDONÇA, F. J. B., GARNÉS, S. J. A., PEREIRA, C. M., BARROSO NETO, J. A., MELO, W. D. A. (2010). Análise do Ajustamento por Mínimos Quadrados de uma Trilateração Topocêntrica com Injunções nos Planos UTM e Topocêntrico. In: **III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife-PE, Brasil. Anais..., Recife: UFPE.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; McGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. John Wiley & Sons, 2001. 479 p.

MOESER, U.A. **Handbuch Ingenieurgeodäsie, Grundlagen**. Moeser, Mueller, Schlemmer, Werner (Hrsg.), 3., voellig neubearbeitete und erweiterte Auflage. 2000.

MONICO, J.F.G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Ed. UNESP, 2008.

MONICO, J. F. G.; DAL POZ, A. P.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. (2009). Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Bulletin of Geodetic Sciences** 15(3): 469-483.

MONICO, J. F. G.; CASTRO, A. L. P. (2000). Integration of GPS, Geoidal Model and Leveling Networks for Orthometric Heights Determination. In: **13 International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation: ION GPS 2000**, Salt Lake City, Utah. Proceedings of the 13 International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation: ION GPS 2000. Alexandria, VA, USA: The Institute of Navigation. p. 69-74.

MORAES, J. N.; ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G. Avaliação da Qualidade de Estações de Referência Virtuais Geradas por Diferentes Softwares. In: **III Simpósio Brasileiro de Geomática**, Presidente Prudente-SP, 25 a 27 de julho de 2012. p.246-251.

MORITZ, H., 1980. Geodetic Reference System 1980, **Bull. Geod.**, 54, 395–405.

MORITZ, H. Geodetic Reference System 1980. **J. Geod.** 74, 128-133, 2000.

MOREIRA, A. S. B. **Nivelamento trigonométrico e nivelamento geométrico classe IIN da NBR 13.133: limites e condições de compatibilidade**. Dissertação de Mestrado- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003. 103p.

NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION. **Calculadoras de Campo Magnético**. Disponível em:
<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml?useFullSite=true>.
Acesso em: 18 de setembro 2020. (NOAA, 2020).

NIMA, 2000. Department of defense world geodetic system 1984, **Tech. Rep. NIMA TR8350.2**, Third Edition, January 2000.

PETIT G.; LUZUM B. (Eds), 2010, IERS Conventions 2010. **IERS Technical Note 36**. Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt a.M.

PE3D. **PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL**, 2016. Disponível em: <<http://www.pe3d.pe.gov.br/>>. Acesso em: 17 mar. 2022. (PE3D, 2016).

PINA, W. H.; PINHEIRO, R. R.; SANTOS, C. C. C.; DI MAIO PEREIRA, N. R.; GOLDANI, D. Reajustamento Global da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Brasil – RAAP. In: **Anais da IV Conferência Nacional de Geociências**, Rio de Janeiro-RJ, 2006.

PINTO, M. S.; CAMARGO, P. O.; MONICO, J. F. G. Influência da combinação de dados GPS e GLONASS no georreferenciamento de imóveis rurais. **Bulletin of Geodetic Sciences** 19(1): 135-151, 2013.

POR AQUI.COM (2017). **Prédio da Sudene: conheça planos da UFPE. Mobiliário antigo está sendo doado**. Recife, Brasil, 22 dez. de 2017. Por Natália Dantas. Disponível em <https://poraqui.com/>. Acesso em: 20 setembro 2021. (POR AQUI.COM, 2017).

RESNIK, B.; BILL, R. **Vermessungskunde fuer den Planungs-, Bau- und Umweltbereich**. 3. Aulf. Wichmann Verlag: Heidelberg, 2003.

ROCHA, G.D.C., GAMA, L.F., SEIXAS, A., DIAS, E.R., CARMO, K.C. Levantamentos geodésicos de edificações prediais históricas. In: **Anais do IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife, 6 a 9 de maio de 2012.

ROMÃO, V. M. C. **Teoria dos Erros** – Notas de aula. Recife: UFPE, 2009.

RTCM. THE RADIO TECHNICAL COMISSION FOR MARITIME SERVICES – **RTCM recommended standards for differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) service**. [S.I.]: RTCM Special Committee N 104, 1998.

SAATKAMP, E. D. Protocolos RTCM-SC104: desenvolvimento histórico e características das versões, aspectos de codificação e decodificação. In: **I Workshop RBMC**. 2013. (Apresentação de Trabalho/ Simpósio).

SÁ, N. C.; MONICO, J. F. G.; KRUEGER, C. P.; SOUZA, S. F.; CASTRO, A. L. P.; VIEIRA, C. D. (2002). Rede GPS no Estado de São Paulo: um projeto orientado para aplicações cotidianas. In: **Simpósio Brasileiro de Geomática**, Presidente Prudente-SP, Brasil. Anais do Simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente, SP.: Departamento de Cartografia (UNESP). p. 100-104.

SÁ CARNEIRO, A. R.; SILVA, J. M.; ROLIM, M. E. D. O. (2018). Inventário e Conservação do Jardim de Burle Marx na Sudene. **Revista Percorso Nemo (Online)** 10 (1): 111-130.

SÁNCHEZ, L. Classical height systems, Vertical datum standardization (unification), Towards a modern vertical reference system. In: **11TH International School of the Geoid Service: Heights and Height Datum**. Loja, Ecuador. October 7-11, 2013.

SÁNCHEZ, L. Towards a vertical datum standardisation under the umbrella of Global Geodetic Observing System. **Journal of Geodetic Science** 2(4), p. 325-342, DOI: 10.2478/v10156-012-0002-x, 2012.

SANSÒ, F., VANÍCEK, P. The orthometric height and the holonomy problem, **Journal of Geodesy** 79 (in press). 2005.

SANTANA NETO, J.P. Metodologia para densificação e ajustamento de estruturas geodésicas em áreas urbanas: método da poligonação e método de nivelamento geométrico de alta precisão. In: **IV Simpósio Brasileiro de Geomática SBG2017**, Presidente Prudente-SP, 24 a 26 de julho de 2017.

SANTIAGO e CINTRA GEOTECNOLOGIAS. **Estação Total: Principais diferenças entre Estações Totais Robóticas e Convencionais**. Disponível em: <https://www.santiagoecintra.com.br/blog/geo-tecnologias/estacao-total-principais-diferencas-entre-estacoes-totais-roboticas-e-convencionais>. Acesso em: 20 junho 2021. (SC GEOTECNOLOGIAS, 2021).

SANTOS, C.M.R.; SEIXAS, A.; GARNÉS, S.J.A.; PÓVOAS, Y.V. (2021). A Medição e Análise de Prumagem e Planeza na Construção de Fachadas e Pisos/Lajes de Edifícios. **Brazilian Journal of Cartography** 73 (2): 340-358. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv73n2-55099>.

SANTOS, C.M.R. **A geodésia aplicada à medição e análise de superfícies: estudo de caso na construção civil**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife. 2019.

SEIXAS, A.; SOUZA, A.M.B.; GAMA, L.F. Methodology for Definition of the Three-Dimensional Geodesic Structures in the Olinda's Historical Site. **Journal of Civil Engineering and Architecture** 8: 1-10, 2014. (Print).

SEIXAS, A.; GAMA, L.F.; MORAES, J.N.; SOUZA, A.M.B. O estabelecimento de padrões de referência altimétrica utilizando o nivelamento geométrico para a definição de alvos altos e inacessíveis. **Bulletin of Geodetic Sciences** 20(2): 388-410, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702014000200023>.

SEIXAS, A.; SEIXAS, J.R.; SEIXAS, J.J. Verification and Control of Vertical Bench Mark Applied for Settling Measurements of Large Structure Buildings. In: **FIG Working Week 2012**, Rome. Knowing to manage the territory, to protect the environment and to evaluate the cultural heritage, 2012.

SEIXAS, A.; SILVA, T. F.; ROMÃO, V. M. C.; BOTELHO, F. J. Definição de Sistemas de Referência no Controle de Qualidade de Edificações. In: MITISHITA, E. A. (Org.). **Série em Ciências Geodésicas**. 1ed. Curitiba: Imprensa Universitária, v. 3, p. 209-224. 2003.

SEVERO, T. C.; SOUZA, F. S.; MATSUOKA, M. T.; GEHLEN, A. K. Estudo das Correções Gravimétricas para Altitudes Físicas Aplicadas aos Desníveis da RAPP. **Bulletin of Geodetic Sciences** 19 (3), p.472-497, doi:10.1590/S1982-21702013000300008, 2013.

SEVERO, T. C. **Estudo das altitudes físicas aplicado à rede altimétrica fundamental do Brasil no Estado do Rio Grande do Sul**. 96 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto, Área de Concentração: Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SILVA, D. C.; SILVA, C. V. A. Possibilidades de uso direto de altitude elipsoidal em obras de engenharia. **Pesquisas em Geociências (Online)**, 44(2): p. 275-292. 2017.

SILVA, J. M.; FERREIRA, R. N. C.; FEITOSA JUNIOR, W. B.; COSTA, T. S.; CARVALHO, E. (2020). Exercício de Conservação do Jardim Histórico do Conjunto Moderno da Sudene: Uma experiência didática no curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pernambuco. **Paisagem e Ambiente** 31 (45): 10-32.

SILVA, H. R.; MONICO, J. F. G.; ALVES, D. B. M. Análise do Desempenho do RTK em Rede no Brasil sob Efeito da Cintilação Ionosférica. **Brazilian Journal of Cartography** 68(10): 2083-2102. 2016.

SILVA, I.; SEGANTINE, P. C. L. (2015). **Topografia Para Engenharia: Teoria e Prática de Geomática**, 1ª ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 786 p. ISBN 978-85-352-7748-7.

SILVA, E. V. **Monitoramento de Estruturas Geodésicas Altimétricas e Estabelecimento de Padrões de Referência Metrológica: Campus Recife da UFPE**. Dissertação de Mestrado- Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do Centro de Tecnologia e Geociências, da Universidade Federal de Pernambuco, 2017. 165p.

SILVA, E.V; SEIXAS, A. (2017). O Estabelecimento de Padrões de Referência Metrológica: Controle e Análise da Qualidade de Estruturas Geodésicas Altimétricas Implantadas no Campus Recife na UFPE. **Brazilian Journal of Cartography**. 69 (9): 1743-1768.

SILVEIRA, L. C. Dados Elipsoide GRS 1980 (Geodetic Reference System 1980). **Revista A Mira**. 160, 2011.

SOUZA, A.M.B. **Análise e Comparação de Estruturas Geodésicas Tridimensionais Definidas por Métodos Planialtimétricos de Medição**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012. (SOUZA, A., 2012).

SOUZA, W. O. (2012). **Aplicação de métodos para determinação do desvio da vertical na integração de posicionamento GNSS com levantamentos topográficos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 131 f. (SOUZA, W., 2012).

SOUZA, W.O.; GARNÉS, S.J.A. Análise de Projeções Cartográficas para Grandes Escalas. In: **Anais do IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife-PE, 06 a 09 de maio de 2012.

SOUZA, G. F.; SILVEIRA, L. N. Implantação de marcos geodésicos para projetos de construção e restauração de rodovias. **Tecnologia e Ambiente** v.14: 36-52. 2008.

TALLER DEL SIRGAS-GTI, 2., 2008, Montevideo. **SIRGAS: Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas: reporte 2007-2008.** [S. l: s. n.], 2008. 40 p. (Boletín informativo, n. 13). Grupo de Trabalho I: Sistema de Referência. Disponível em: http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Boletin_SIRGAS_N0._13_Reporte_2007-2008.pdf. Acesso em: jul. 2019.

TENÓRIO, B., SEIXAS, A. Reconstrução tridimensional de superfícies topográficas terrestres e obras arquitetônicas no sítio histórico de Olinda. In: **Anais do II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife, 8 a 11 de setembro de 2008.

TEUNISSEN, P. J. G. **Testing Theory: an introduction**. Delft, Netherlands: Delft University Press, 2000.

TOPCON. (2004). **HiPer Lite and HiPer Lite+ Operator's Manual**. Receptores geodésicos de dupla frequência (L1/L2) da marca TOPCON. Descrição. U.S.A, Topcon Positioning Systems, Inc.

TOPCON. (2003b). **Hiper GD and Hiper GGD Operator's Manual**. U.S.A, Topcon Positioning Systems, Inc.

TOPCON. (2012). **Manual de Instruções Estação Total SÉRIE GPT-3200N**. Japão. Japan Surveying Instruments Manufacturers Association.

TORGE, W., MÜLLER, J. **Geodesy**. 4th Edition. Ed: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin/ Boston. 2012.

TRIMBLE. **Trimble® R12i - um novo ângulo de produtividade**. Disponível em: <https://r12i.trimble.com/>. Acesso em: 20 junho 2021. (TRIMBLE, 2020).

VAZ, J. A.; PISSARDINI, R. S.; FONSECA JUNIOR, E. S. Comparação da cobertura e acurácia entre os sistemas GLONASS e GPS obtidas dos dados de observação de uma estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo. **Brazilian Journal of Cartography** 65(3): 529-539, 2013.

VILA FLOR, C. D. R. **Planejamento e Implantação de uma Rede de Referência Cadastral no Campus Recife da UFPE**. Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, 2010.

VILA FLOR, C. D. R. **Rede geodésica cadastral do campus Recife da UFPE: Fase I – planejamento e implantação da rede principal**. Trabalho Final de Graduação. Relatório Parcial. Departamento de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. (2000). **Elements of Photogrammetry: with applications in GIS**. 3^a ed. Boston: McGraw-Hill (United States). 608 p.

XAVIER, A. M. **Emprego de Instrumentação Topográfica/Geodésica no Contexto da NBR 14645: Aplicações ao Controle Dimensional de Edificações e ao**

Cadastro. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em Engenharia Cartográfica) – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, 2017.

APÊNDICE A - PONTOS E ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA LEVANTADOS/ OBTIDOS E PROCESSADOS.

A.1 Monografia da Rede Geodésica do Edifício SUDENE.

MONOGRAFIA DA REDE GEODÉSICA DO EDIFÍCIO SUDENE RECIFE – PE.	
Nome da Estação: P1	Ano: 2020
DADOS GERAIS	COORDENADAS
Município: <i>Recife-PE</i> Localidade: <i>Edifício SUDENE</i> Fuso: 25S Meridiano central: 33° Sistema de Referência: SIRGAS2000 Época 2000.4 Datum Vertical: Marégrafo de Imbituba – SC	$\varphi = -08^{\circ}03'03,89421''$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $\lambda = -34^{\circ}56'46,16535''$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $N = 9.109.544,667\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $E = 285.521,961\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $H = 8,367\text{ m}$ (alt. Ortométrica); $\sigma = \pm 0,003\text{m}$ $h = 2,9320\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,003\text{m}$ (alt. Geodésica)
SISTEMA GEODÉSICO LOCAL	
Origem: <i>RECF</i> (φ_0, λ_0) $\varphi_0 = -08^{\circ}03'03,46970''$ $\lambda_0 = -34^{\circ}57'05,45910''$ $h = 4,217\text{ m}$ $x_0 = 150.000,000\text{ e}$ $y_0 = 250.000,000$	Coordenadas Topocêntricas: $x = 150.590,761\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $y = 249.986,954\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,003\text{m}$
Descrição: Refere-se à uma marcação na cor amarela, localizada na calçada e próxima ao meio fio; implantada pela UFPE. Está implantada na Rod. Gov. Mário Covas, na altura do Viaduto Reitoria.	
LOCALIZAÇÃO	FOTO
	
Data da foto: outubro de 2019.	
Monografia elaborada por Moraes(2022) – PGCGTG/UFPE Projeto de Pesquisa - Monitoramento Geodésico de Estruturas: Edificações Prediais, Torres Eólicas e Solos Rochosos e Inclinação (2019 – até o momento) (SEIXAS, 2019)	

Tabela A.1.2. – Coordenadas Ponto de Ref. P2.

MONOGRAFIA DA REDE GEODÉSICA DO EDIFÍCIO SUDENE RECIFE – PE.	
Nome da Estação: P2	Ano: 2020
DADOS GERAIS	COORDENADAS
Município: <i>Recife-PE</i> Localidade: <i>Edifício SUDENE</i> Fuso: 25S Meridiano central: 33° Sistema de Referência: SIRGAS2000 Época 2000.4 Datum Vertical: Marégrafo de Imbituba – SC	$\varphi = -8^{\circ}02'54,89109''$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $\lambda = -34^{\circ}56'44,21868''$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $N = 9.109.821,580\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $E = 285.580,250\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $H = 8,139\text{ m}$ (alt. Ortométrica) $\sigma = \pm 0,004\text{m}$ $h = 2,707\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,003\text{m}$ (alt. Geodésica)
SISTEMA GEODÉSICO LOCAL	
Origem: <i>RECF</i> (φ_0, λ_0) $\varphi_0 = -08^{\circ}03'03,46970''$ $\lambda_0 = -34^{\circ}57'05,45910''$ $h = 4,217\text{ m}$ $x_0 = 150.000,000\text{ e}$ $y_0 = 250.000,000$	Coordenadas Topocêntricas: $x = 150.650,371\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $y = 250.263,540\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,003\text{m}$
Descrição: Refere-se à uma marcação identificada pela cor amarela, implantada pela UFPE. Está implantada na Rod. Gov. Mário Covas.	
LOCALIZAÇÃO	FOTO
Data da foto: outubro de 2019.	
Monografia elaborada por Moraes(2022) – PGC GTG/UFPE Projeto de Pesquisa - Monitoramento Geodésico de Estruturas: Edificações Prediais, Torres Eólicas e Solos Rochosos e Inclinação (2019 – até o momento) (SEIXAS, 2019)	

Tabela A.1.3 – Coordenadas Ponto de Ref. P3.

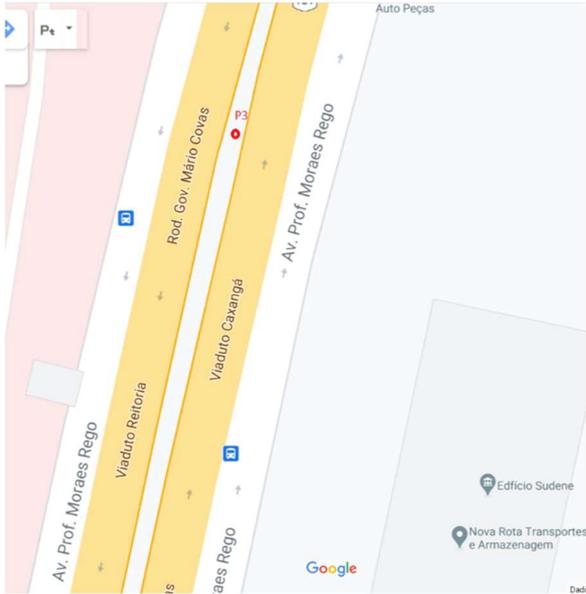
MONOGRAFIA DA REDE GEODÉSICA DO EDIFÍCIO SUDENE RECIFE – PE.	
Nome da Estação: P3	Ano: 2020
DADOS GERAIS	COORDENADAS
Município: <i>Recife-PE</i> Localidade: <i>Edifício SUDENE</i> Fuso: 25S Meridiano central: 33° Sistema de Referência: SIRGAS2000 Época 2000.4 Datum Vertical: Marégrafo de Imbituba – SC	$\varphi = -8^{\circ}02'49,43663''$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $\lambda = -34^{\circ}56'42,31331''$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ N= 9.109.989,451 m; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ E= 285.637,814 m; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ H= 7,997 m (alt. Ortométrica) $\sigma = \pm 0,004\text{m}$ h= 2,567 m; $\sigma = \pm 0,003\text{m}$ (alt. Geodésica)
SISTEMA GEODÉSICO LOCAL	
Origem: <i>RECF</i> (φ_0 , λ_0) $\varphi_0 = -08^{\circ}03'03,46970''$ $\lambda_0 = -34^{\circ}57'05,45910''$ h=4,217 m x0 = 150.000,000 e y0 = 250.000,000	Coordenadas Topocêntricas: x= 150.708,715 m; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ y= 250.431,106 m; $\sigma = \pm 0,003\text{m}$
Descrição: Refere-se a um ponto no meio do canteiro da Rodovia. Gov. Mário Covas, o ponto pode ser localizado pela identificação de duas marcações em amarelo na barra protetora da rodovia; o mesmo foi implantado pela UFPE.	
LOCALIZAÇÃO	FOTO
	 Data da foto: outubro de 2019.
Monografia elaborada por Moraes(2022) – PGC GTG/UFPE Projeto de Pesquisa - Monitoramento Geodésico de Estruturas: Edificações Prediais, Torres Eólicas e Solos Rochosos e Inclinações (2019 – até o momento) (SEIXAS, 2019)	

Tabela A.1.4 – Coordenadas Ponto de Ref. P4.

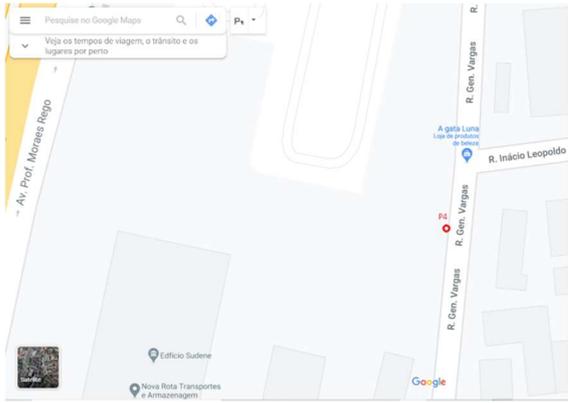
MONOGRAFIA DA REDE GEODÉSICA DO EDIFÍCIO SUDENE RECIFE – PE.	
Nome da Estação: P4	Ano: 2020
DADOS GERAIS	COORDENADAS
Município: <i>Recife-PE</i> Localidade: <i>Edifício SUDENE</i> Fuso: 25S Meridiano central: 33° Sistema de Referência: SIRGAS2000 Época 2000.4 Datum Vertical: Marégrafo de Imbituba – SC	$\varphi = -8^{\circ}02'50,23224''$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $\lambda = -34^{\circ}56'38,46834''$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $N = 9.109.965,565\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $E = 285.755,680\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $H = 8,020\text{ m}$ (alt. Ortométrica) $\sigma = \pm 0,005\text{m}$ $h = 2,589\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,005\text{m}$ (alt. Geodésica)
SISTEMA GEODÉSICO LOCAL	
Origem: <i>RECF</i> (φ_0, λ_0) $\varphi_0 = -08^{\circ}03'03,46970''$ $\lambda_0 = -34^{\circ}57'05,45910''$ $h = 4,217\text{ m}$ $x_0 = 150.000,000\text{ e}$ $y_0 = 250.000,000$	Coordenadas Topocêntricas: $x = 150.826,446\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $y = 250.406,662\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,004\text{m}$
Descrição: Refere-se à uma marcação na cor amarela, entre o paralelepípedo e a calçada; implantada pela UFPE. Está na Rua General Vargas, próxima à altura da Rua Inácio Leopoldo e a um dos vértices do prédio.	
LOCALIZAÇÃO	FOTO
	 Data da foto: outubro de 2019.
Monografia elaborada por Moraes(2022) – PGC GTG/UFPE Projeto de Pesquisa - Monitoramento Geodésico de Estruturas: Edificações Prediais, Torres Eólicas e Solos Rochosos e Inclinados (2019 – até o momento) (SEIXAS, 2019)	

Tabela A.1.5 – Coordenadas Ponto de Ref. P5.

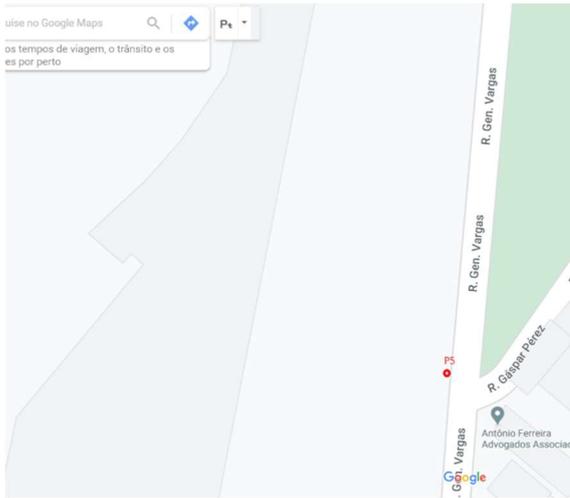
MONOGRAFIA DA REDE GEODÉSICA DO EDIFÍCIO SUDENE RECIFE – PE.	
Nome da Estação: P5	Ano: 2020
DADOS GERAIS	COORDENADAS
Município: <i>Recife-PE</i> Localidade: <i>Edifício SUDENE</i> Fuso: 25S Meridiano central: 33° Sistema de Referência: SIRGAS2000 Época 2000.4 Datum Vertical: Marégrafo de Imbituba – SC	$\varphi = -8^{\circ}02'55,85720''$; $\sigma = \pm 0,001\text{m}$ $\lambda = -34^{\circ}56'38,95979''$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $N = 9.109.792,661\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,001\text{m}$ $E = 285.741,451\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $H = 7,607\text{ m}$ (alt. Ortométrica) $\sigma = \pm 0,004\text{m}$ $h = 2,174\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,003\text{m}$ (alt. Geodésica)
SISTEMA GEODÉSICO LOCAL	
Origem: <i>RECF</i> (φ_0, λ_0) $\varphi_0 = -08^{\circ}03'03,46970''$ $\lambda_0 = -34^{\circ}57'05,45910''$ $h = 4,217\text{ m}$ $x_0 = 150.000,000\text{ e}$ $y_0 = 250.000,000$	Coordenadas Topocêntricas: $x = 150.811,395\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $y = 250.233,857\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,003\text{m}$
Descrição: Refere-se à uma marcação na cor amarela, implantada pela UFPE. Está na Rua General Vargas, em frente à escadaria do Edifício SUDENE.	
LOCALIZAÇÃO	FOTO
	
Data da foto: outubro de 2019.	
Monografia elaborada por Moraes(2022) – PGC GTG/UFPE Projeto de Pesquisa - Monitoramento Geodésico de Estruturas: Edificações Prediais, Torres Eólicas e Solos Rochosos e Inclinação (2019 – até o momento) (SEIXAS, 2019)	

Tabela A.1.6 – Coordenadas Ponto de Ref. P6.

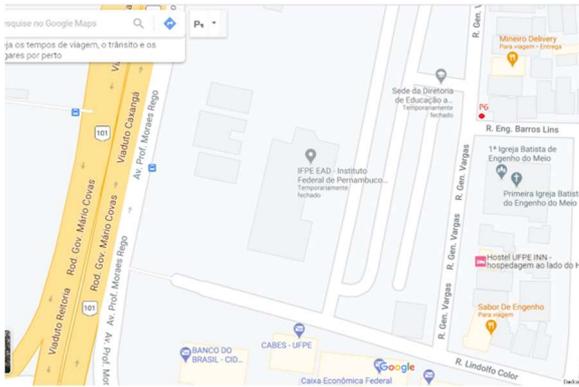
MONOGRAFIA DA REDE GEODÉSICA DO EDIFÍCIO SUDENE RECIFE – PE.	
Nome da Estação: P6	Ano: 2020
DADOS GERAIS	COORDENADAS
Município: <i>Recife-PE</i> Localidade: <i>Edifício SUDENE</i> Fuso: 25S Meridiano central: 33° Sistema de Referência: SIRGAS2000 Época 2000.4 Datum Vertical: Marégrafo de Imbituba – SC	$\varphi = -8^{\circ}03'01,94366''$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $\lambda = -34^{\circ}56'39,02794''$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ N = 9.109.605,639 m; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ E = 285.740,253 m; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ H = 8,214 m (alt. Ortométrica) $\sigma = \pm 0,004\text{m}$ h = 2,779 m; $\sigma = \pm 0,003\text{m}$ (alt. Geodésica)
SISTEMA GEODÉSICO LOCAL	
Origem: <i>RECF</i> (φ_0, λ_0) $\varphi_0 = -08^{\circ}03'03,46970''$ $\lambda_0 = -34^{\circ}57'05,45910''$ h = 4,217 m x0 = 150.000,000 e y0 = 250.000,000	Coordenadas Topocêntricas: x = 150.809,305m; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ y = 250.046,874m; $\sigma = \pm 0,003\text{m}$
Descrição: Refere-se à uma marcação na cor amarela, entre a calçada e o paralelepípedo, implantada pela UFPE. Está implantada na Rua General Vargas, esquina com a Rua Eng. Barros Lins.	
LOCALIZAÇÃO	FOTO
	
Data da foto: outubro de 2019.	
Monografia elaborada por Moraes(2022) – PGC GTG/UFPE Projeto de Pesquisa - Monitoramento Geodésico de Estruturas: Edificações Prediais, Torres Eólicas e Solos Rochosos e Inclinados (2019 – até o momento) (SEIXAS, 2019)	

Tabela A.1.7 – Coordenadas Ponto de Ref. P7.

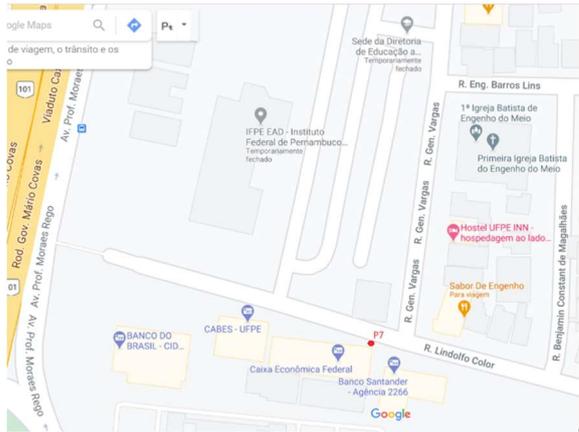
MONOGRAFIA DA REDE GEODÉSICA DO EDIFÍCIO SUDENE RECIFE – PE.	
Nome da Estação: P7	Ano: 2020
DADOS GERAIS	COORDENADAS
Município: <i>Recife-PE</i> Localidade: <i>Edifício SUDENE</i> Fuso: 25S Meridiano central: 33° Sistema de Referência: SIRGAS2000 Época 2000.4 Datum Vertical: Marégrafo de Imbituba – SC	$\varphi = -8^{\circ}03'05,86808''$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $\lambda = -34^{\circ}56'40,02674''$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $N = 9.109.484,912\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $E = 285.710,239\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $H = 7,761\text{ m}$ (alt. Ortométrica) $\sigma = \pm 0,005\text{m}$ $h = 2,324\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,004\text{m}$ (alt. Geodésica)
SISTEMA GEODÉSICO LOCAL	
Origem: <i>RECF</i> (φ_0, λ_0) $\varphi_0 = -08^{\circ}03'03,46970''$ $\lambda_0 = -34^{\circ}57'05,45910''$ $h = 4,217\text{ m}$ $x_0 = 150.000,000\text{ e}$ $y_0 = 250.000,000$	Coordenadas Topocêntricas: $x = 150.778,720\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $y = 249.926,312\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,004\text{m}$
Descrição: Refere-se à uma marcação na cor amarela, entre a calçada e o paralelepípedo; implantada pela UFPE. A mesma está implantada na Rua Lindolfo Color, próxima à Agência Santander e próxima também à altura da Rua General Vargas.	
LOCALIZAÇÃO	FOTO
	 Data da foto: outubro de 2019.
Monografia elaborada por Moraes(2022) – PGC GTG/UFPE Projeto de Pesquisa - Monitoramento Geodésico de Estruturas: Edificações Prediais, Torres Eólicas e Solos Rochosos e Inclinados (2019 – até o momento) (SEIXAS, 2019)	

Tabela A.1.8 – Coordenadas Ponto de Ref. P8.

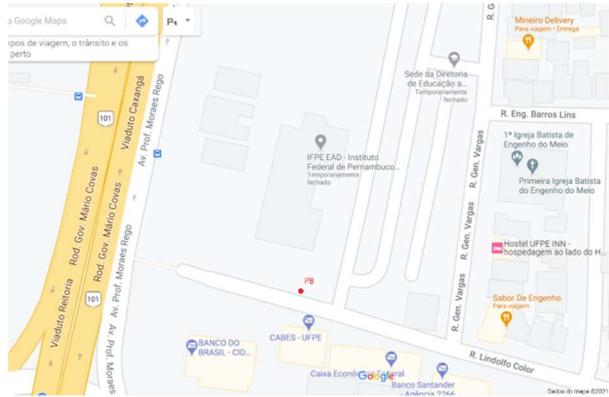
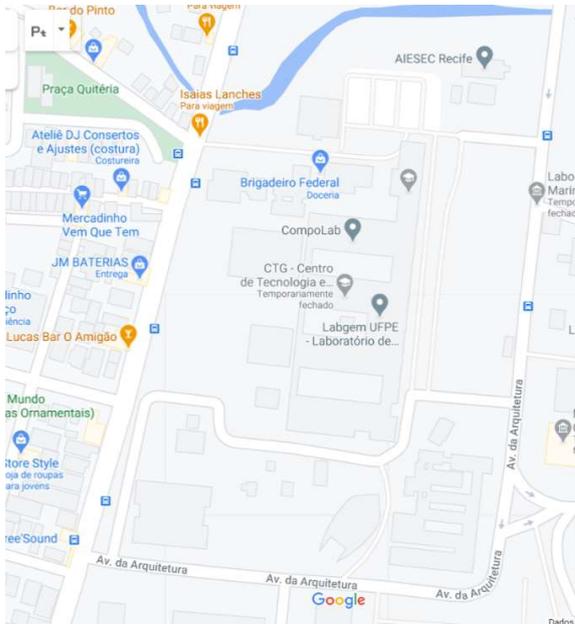
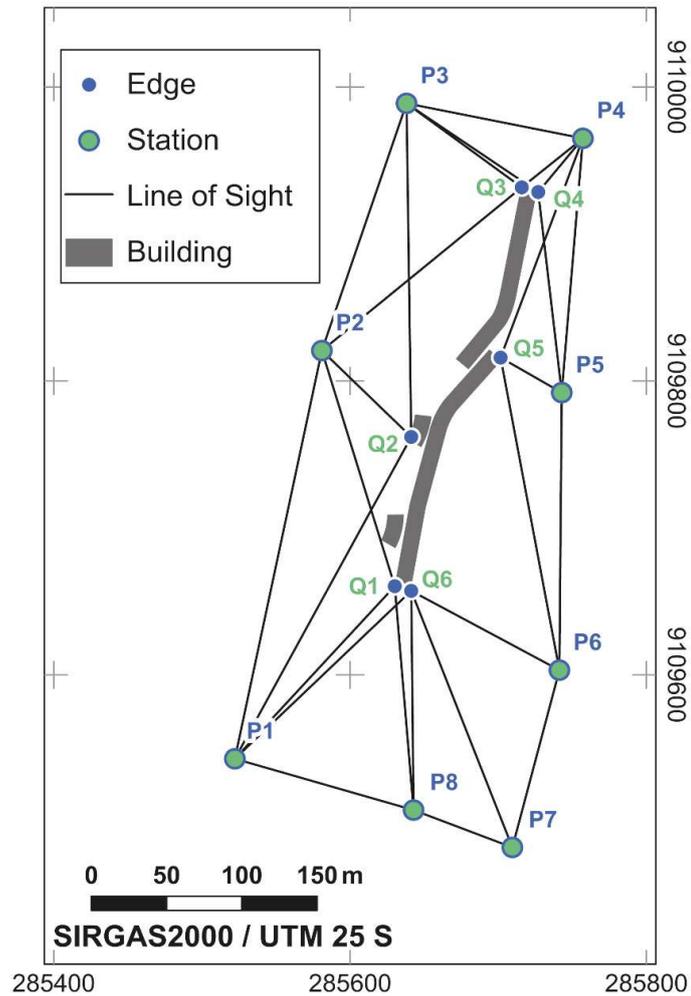
MONOGRAFIA DA REDE GEODÉSICA DO EDIFÍCIO SUDENE RECIFE – PE.	
Nome da Estação: P8	Ano: 2020
DADOS GERAIS	COORDENADAS
Município: <i>Recife-PE</i> Localidade: <i>Edifício SUDENE</i> Fuso: 25S Meridiano central: 33° Sistema de Referência: SIRGAS2000 Época 2000.4 Datum Vertical: Marégrafo de Imbituba – SC	$\varphi = -8^{\circ}03'05,03021''$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $\lambda = -34^{\circ}56'42,20537''$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $N = 9.109.510,339\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $E = 285.643,398\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $H = 8,665\text{ m}$ (alt. Ortométrica) $\sigma = \pm 0,004\text{m}$ $h = 3,229\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,004\text{m}$ (alt. Geodésica)
SISTEMA GEODÉSICO LOCAL	
Origem: <i>RECF</i> (φ_0, λ_0) $\varphi_0 = -08^{\circ}03'03,46970''$ $\lambda_0 = -34^{\circ}57'05,45910''$ $h = 4,217\text{ m}$ $x_0 = 150.000,000\text{ e}$ $y_0 = 250.000,000$	Coordenadas Topocêntricas: $x = 150.712,013\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $y = 249.952,053\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,004\text{m}$
Descrição: Refere-se a um pino de ferro, implantado pela UFPE. Está na Rua Lindolfo Color, próximo a CABES-UFPE.	
LOCALIZAÇÃO	FOTO
	 <p style="text-align: center;">Data da foto: outubro de 2019.</p>
Monografia elaborada por Moraes(2022) – PGC GTG/UFPE Projeto de Pesquisa - Monitoramento Geodésico de Estruturas: Edificações Prediais, Torres Eólicas e Solos Rochosos e Inclinados (2019 – até o momento) (SEIXAS, 2019)	

Tabela A.1.9 – Coordenadas Ponto de Ref. SAT GPS 91551.

MONOGRAFIA DA REDE GEODÉSICA DO EDIFÍCIO SUDENE RECIFE – PE.	
Nome da Estação: SAT GPS 91551	Ano: 2020
DADOS GERAIS	COORDENADAS
Município: <i>Recife-PE</i> Localidade: <i>Edifício SUDENE</i> Fuso: 25S Meridiano central: 33° Sistema de Referência: SIRGAS2000 Época 2000.4 Datum Vertical: Marégrafo de Imbituba – SC	$\varphi = -8^{\circ}03'10,89697''$; $\sigma = \pm 0,001\text{m}$ $\lambda = -34^{\circ}57'16,95361''$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $N = 9.109.325,002\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,001\text{m}$ $E = 284.580,123\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $H = 54,591\text{ m}$ (alt. Ortométrica) $\sigma = \pm 0,003\text{m}$ $h = 49,161\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,003\text{m}$ (alt. Geodésica)
SISTEMA GEODÉSICO LOCAL	
Origem: <i>RECF</i> (φ_0, λ_0) $\varphi_0 = -08^{\circ}03'03,46970''$ $\lambda_0 = -34^{\circ}57'05,45910''$ $h = 4,217\text{ m}$ $x_0 = 150.000,000\text{ e}$ $y_0 = 250.000,000$	Coordenadas Topocêntricas: $x = 149.648,045\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,002\text{m}$ $y = 249.771,822\text{ m}$; $\sigma = \pm 0,003\text{m}$
Descrição: Na cobertura do prédio de Administração do Centro de Tecnologia da UFPE, Departamento de Engenharia Cartográfica, Rua Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária.	
LOCALIZAÇÃO	FOTO
	 Data da foto: outubro de 2019.
Monografia elaborada por Moraes(2022) – PGC/GT/UFPE Projeto de Pesquisa - Monitoramento Geodésico de Estruturas: Edificações Prediais, Torres Eólicas e Solos Rochosos e Inclinações (2019 – até o momento) (SEIXAS, 2019)	

A.2 Pontos de Referência e Pontos-Objeto na área de levantamentos.

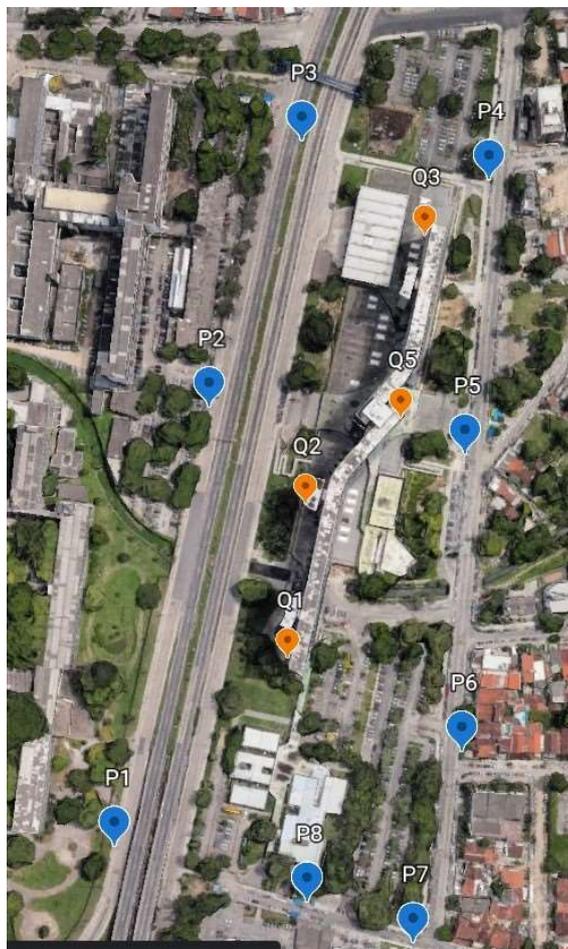
Figura A.2.1 – Localização dos pontos da área de levantamentos. Pontos de Referência (ou Apoio) (P1 a P8) e pontos-Objeto (ou Detalhes) (Q1 a Q6).



Fonte: Autores (2020).

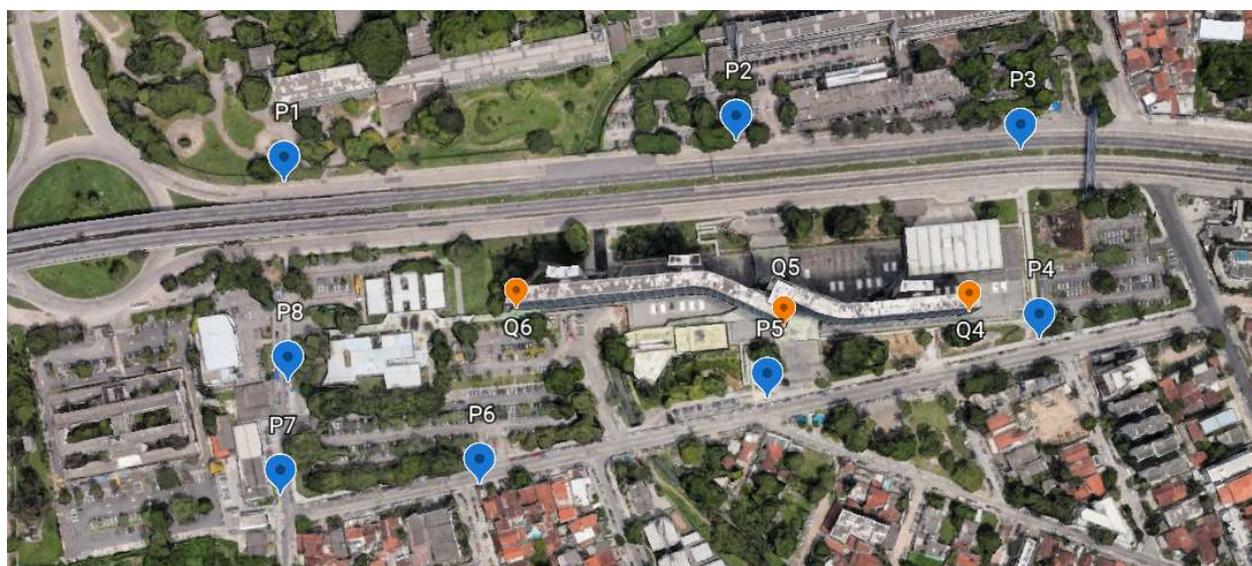
A.3 Imagens da área de levantamentos e localização dos Pontos de Referência e Pontos-Objeto.

Figura A.3.1 – Imagem da área de levantamentos com a localização dos Pontos de Referência e pontos-Objeto (ou Detalhes).



Fonte: Imagem Google Earth Web (2022). Autor (2022).

Figura A.3.2 – Imagem da área de levantamentos e Pontos de Referência e pontos-Objeto (ou Detalhes) em destaque.



Fonte: Imagem Google Earth Web (2022). Autor (2022).

P3	HiPer Lite/Lite+1,574	Inclinada	14/09/2019	17:12	14/09/2019	19:04	01:52:00	Estático	8RK4E74S9OG	
	5000	2070,257								
P8	HiPer Lite/Lite+1,582	Inclinada	14/09/2019	12:50	14/09/2019	14:01	01:11:05	Estático	8RK4E74S9OG	
	5000	2070,257								
P6	HiPer Lite/Lite+1,573	Inclinada	14/09/2019	14:18	14/09/2019	16:48	02:29:35	Estático	8RK4E74S9OG	
	5000	2070,257								
SAT 91551	Hiper V	0,222	Vertical	14/09/2019	11:36	14/09/2019	18:56	07:20:00	Estático	Q1NAVI4UFWW
	5000	2070,257								
PERC TRM59800.00	NONE	0,073	Vertical	14/09/2019	00:00	15/09/2019	00:00	24:00:00	Estático	4923K35550 15000
	2070,257									
P7	HiPer Lite/Lite+1,419	Inclinada	14/09/2019	13:02	14/09/2019	14:52	01:50:30	Estático	8QJLZKFTXXC	
	5000	2070,257								
P5	HiPer Lite/Lite+1,449	Inclinada	14/09/2019	16:00	14/09/2019	19:01	03:01:01	Estático	8P7JXIC4D8G	
	1000	2070,257								
P1	HiPer Lite/Lite+1,456	Inclinada	14/09/2019	12:14	14/09/2019	15:43	03:29:27	Estático	8P7JXIC4D8G	
	1000	2070,257								

Observações GPS

Nome	dN (m)	dE (m)	dZ (m)	Duração	Horz RMS (m)	Vert RMS (m)	Distancia (m)	Tipo	Solução	
	PDOP	Resíduo N (m)	Resíduo E (m)	(m)	Resíduo h (m)	Efemérides	Azimuth			
P1?P2	276,909	58,299	-0,208	00:30:22	0,003	0,005	282,932	Fixo	1,961 -0,003 0,001 0,017	Preciso
	"12°09'42,5177""									
P1?P6	60,971	218,293	-0,158	01:24:32	0,001	0,002	226,61	Fixo	1,958 0 0,002 -0,005	Preciso
	"74°40'01,6816""									
P1?P7	-59,756	188,277	-0,609	01:50:30	0,002	0,003	197,5	Fixo	1,942 -0,001 -0,001 -0,001	Preciso
	"107°52'51,9991""									
P1?P8	-34,326	121,436	0,299	01:11:05	0,001	0,002	126,173	Fixo	1,717 0,002 -0,001 0,001	Preciso
	"106°03'23,7987""									
P1?PERC	-856,066	-462,011	9,276	03:29:27	0,002	0,005	972,66	Fixo	1,815 0,001 0 -0,004	Preciso
	"208°37'41,3066""									
P1?SAT 91551	-219,665	-941,839	46,229	03:29:27	0,001	0,002	968,058	Fixo	1,813 0 -0,001 0	Preciso
	"257°08'39,4494""									
P2?P3	167,871	57,557	-0,141	00:32:45	0,002	0,004	177,434	Fixo	2,105 0 0,002 -0,001	Preciso
	"19°11'50,6119""									
P2?P5	-28,92	161,193	-0,529	01:45:00	0,001	0,002	163,74	Fixo	2,452 -0,001 0,001 0,004	Preciso
	"100°26'38,2940""									

P2?P6 -215,944 159,988 0,077 01:35:25 0,002 0,003 268,707 Fixo 1,787 -0,003 -0,005 0,005 Preciso
 "143°44'18,7551""
 P2?PERC -1132,978 -520,31 9,505 02:31:55 0,003 0,005 1246,565 Fixo 1,743 0,002 0 0 Preciso
 "204°56'21,1385""
 P2?SAT 91551 -496,577 -1000,136 46,451 02:31:55 0,001 0,002 1117,408 Fixo 1,75 0,001 0 -0,002
 Preciso "243°52'03,9234""
 P3?P4 -23,886 117,866 0,022 01:00:35 0,003 0,004 120,242 Fixo 1,793 0 0 0 Preciso
 "101°43'43,0789""
 P3?P5 -196,789 103,637 -0,395 01:48:46 0,001 0,001 222,374 Fixo 2,065 0,001 0 -0,002 Preciso
 "152°29'57,3400""
 P3?PERC -1300,852 -577,865 9,648 01:52:00 0,003 0,005 1423,219 Fixo 1,738 -0,001 -0,002 0,003
 Preciso "204°13'27,7371""
 P3?SAT 91551 -664,449 -1057,689 46,595 01:43:45 0,001 0,002 1249,739 Fixo 1,781 0 0,001 0,001
 Preciso "238°08'06,4414""
 P4?P5 -172,904 -14,234 -0,419 00:59:46 0,003 0,004 173,461 Fixo 2,041 -0,001 -0,005 -0,004
 Preciso "184°58'42,0622""
 P4?PERC -1276,969 -695,732 9,63 01:00:35 0,005 0,008 1453,985 Fixo 1,772 -0,004 -0,003 0,008
 Preciso "208°51'19,2938""
 P4?SAT 91551 -640,561 -1175,554 46,573 00:54:45 0,002 0,004 1339,334 Fixo 1,782 0,001 0,003 0,002
 Preciso "241°41'10,6842""
 P5?P6 -187,022 -1,195 0,606 00:48:30 0,002 0,002 186,995 Fixo 2,502 0,001 0,004 0,001 Preciso
 "180°38'17,9889""
 P5?PERC -1104,062 -681,504 10,037 03:01:01 0,002 0,004 1297,279 Fixo 2,094 -0,001 -0,004 -
 0,001 Preciso "211°57'29,8177""
 P5?SAT 91551 -467,659 -1161,328 46,986 02:56:00 0,001 0,002 1252,625 Fixo 2,106 0 0 -0,001
 Preciso "248°20'17,0484""
 P6?P7 -120,726 -30,012 -0,474 00:33:35 0,005 0,011 124,38 Fixo 2,201 0,001 0,002 -0,019 Preciso
 "194°13'58,0605""
 P6?PERC -917,039 -680,301 9,436 02:29:35 0,003 0,005 1141,674 Fixo 1,749 -0,001 0,001 0,003 Preciso
 "216°50'31,9026""
 P6?SAT 91551 -280,639 -1160,128 46,382 02:29:35 0,001 0,002 1194,29 Fixo 1,759 -0,002 0,002 0
 Preciso "256°40'25,0546""
 P7?P8 25,421 -66,837 0,902 00:59:25 0,005 0,008 71,502 Fixo 1,806 -0,006 0,004 -0,003 Preciso
 "291°05'45,6796""
 P7?PERC -796,313 -650,289 9,877 01:50:30 0,006 0,011 1027,974 Fixo 1,865 -0,001 0 -0,011
 Preciso "219°30'30,5643""

```

P7?SAT 91551      -159,91      -1130,118  46,833      01:50:30      0,003 0,006 1142,145      Fixo 1,868 0,001 -0,002      -
0,004 Preciso      "262°13'07,2967""
P8?PERC      -821,735      -583,445      8,989 01:11:05      0,007 0,014 1007,668      Fixo 1,654 0,004 0,002 0,006 Preciso
"215°38'52,9559""
P8?SAT 91551      -185,334      -1063,276  45,933      01:11:05      0,002 0,004 1080,104      Fixo 1,654 0,003 -0,002
0,002 Preciso      "260°23'05,9815""
PERC?SAT 91551      636,402      -479,829      36,949      07:20:00      0,002 0,004 797,743      Fixo 1,654 0      -0,002
0,001 Preciso      "323°15'29,4347""

```

Ajustamento

Adjustment type: Plano + Altura, Minimal constraint

Confidence level: 95 %

Number of adjusted points: 10

Number of plane control points: 1

Number of plane weighted points: 1

Number of used GPS vectors: 30

A posteriori plane or 3D UWE: 1,137888 , Bounds: (0,7866226 , 1,21283)

Number of height control points: 1

Number of height weighted points: 1

A posteriori height UWE: 1,089927 , Bounds: (0,6996598 , 1,299817)

Fechamento

Fechamento	dHz (m)	dZ (m)	Tolerância Hz (m)	Tolerância Vert (m)	dHz (ppm)	dZ (ppm)	Comprimento (m)
P2-P3(14/09/2019 17:12:15)	0,0021	0,0067	0,0328	0,0628	3,64	11,84	563,5479
P2-P5(14/09/2019 16:00:00)							
P3-P5(14/09/2019 17:12:15)							
P2-P3(14/09/2019 17:12:15)	0,0034	0,0019	0,0442	0,0742	1,18	0,68	2847,2175

P2-PERC(14/09/2019 15:13:05)
 P3-PERC(14/09/2019 17:12:15)
 P2-P3(14/09/2019 17:12:15) 0,0034 0,0028 0,0427 0,0727 1,35 1,11 2544,5812

P2-SAT 91551(14/09/2019 15:13:05)
 P3-SAT 91551(14/09/2019 17:12:15)
 P2-P6(14/09/2019 15:13:05) 0,008 0,0262 0,0339 0,0639 10,25 33,63 778,2499

P1-P2(14/09/2019 15:13:05)
 P1-P6(14/09/2019 14:18:55)
 P2-P6(14/09/2019 15:13:05) 0,01 0,0007 0,0331 0,0631 16,11 1,11 619,4423

P2-P5(14/09/2019 16:00:00)
 P5-P6(14/09/2019 16:00:00)
 P2-P6(14/09/2019 15:13:05) 0,0062 0,0073 0,0433 0,0733 2,34 2,74 2656,9466

P2-PERC(14/09/2019 15:13:05)
 P6-PERC(14/09/2019 14:18:55)
 P2-P6(14/09/2019 15:13:05) 0,0061 0,007 0,0429 0,0729 2,36 2,73 2580,4059

P2-SAT 91551(14/09/2019 15:13:05)
 P6-SAT 91551(14/09/2019 14:18:55)
 P2-PERC(14/09/2019 15:13:05) 0,0027 0,0212 0,0425 0,0725 1,09 8,49 2502,1576

P1-P2(14/09/2019 15:13:05)
 P1-PERC(14/09/2019 12:14:00)
 P2-PERC(14/09/2019 15:13:05) 0,005 0,0027 0,0435 0,0735 1,85 1 2707,5843

P2-P5(14/09/2019 16:00:00)
 P5-PERC(14/09/2019 16:00:00)
 P2-SAT 91551(14/09/2019 15:13:05) 0,0031 0,0147 0,0418 0,0718 1,33 6,21 2368,3984

P1-P2(14/09/2019 15:13:05)
 P1-SAT 91551(14/09/2019 12:14:00)
 P2-SAT 91551(14/09/2019 15:13:05) 0,0025 0,0058 0,0427 0,0727 1 2,28 2533,7736

P2-P5(14/09/2019 16:00:00)

P4-SAT 91551(14/09/2019 18:01:15)	0,0093	0,0066	0,0480,0782,6	1,85	3591,0623			
P4-PERC(14/09/2019 18:01:15)								
PERC-SAT 91551(14/09/2019 11:36:00)								
P6-P7(14/09/2019 14:18:55)	0,0042	0,0228	0,0327	0,0627	7,68	41,53	548,491	
P1-P6(14/09/2019 14:18:55)								
P1-P7(14/09/2019 13:02:00)								
P6-PERC(14/09/2019 14:18:55)	0,0042	0,0024	0,0417	0,0717	1,77	1,01	2340,9445	
P1-P6(14/09/2019 14:18:55)								
P1-PERC(14/09/2019 12:14:00)								
P6-PERC(14/09/2019 14:18:55)	0,0091	0,0053	0,0431	0,0731	3,45	2,01	2625,9481	
P5-P6(14/09/2019 16:00:00)								
P5-PERC(14/09/2019 16:00:00)								
P6-PERC(14/09/2019 14:18:55)	0,0005	0,0331	0,0415	0,0715	0,24	14,42	2294,0283	
P6-P7(14/09/2019 14:18:55)								
P7-PERC(14/09/2019 13:02:00)								
P6-SAT 91551(14/09/2019 14:18:55)	0,0049	0,0044	0,0419	0,0719	2,04	1,85	2388,9585	
P1-P6(14/09/2019 14:18:55)								
P1-SAT 91551(14/09/2019 12:14:00)								
P6-SAT 91551(14/09/2019 14:18:55)	0,0056	0,0019	0,0432	0,0732	2,11	0,74	2633,9107	
P5-P6(14/09/2019 16:00:00)								
P5-SAT 91551(14/09/2019 16:00:00)								
P6-SAT 91551(14/09/2019 14:18:55)	0,0035	0,0234	0,0423	0,0723	1,43	9,5	2460,8156	
P6-P7(14/09/2019 14:18:55)								
P7-SAT 91551(14/09/2019 13:02:00)								
P6-SAT 91551(14/09/2019 14:18:55)	0,0020,0034	0,0457	0,0757	0,64	1,08	3133,7073		
P6-PERC(14/09/2019 14:18:55)								
PERC-SAT 91551(14/09/2019 11:36:00)								
P7-P8(14/09/2019 13:02:00)	0,01	0,0051	0,0320,06225,2913	395,1752				

P1-P7(14/09/2019 13:02:00)
 P1-P8(14/09/2019 12:50:20)
 P7-PERC(14/09/2019 13:02:00) 0,003 0,0079 0,041 0,071 1,37 3,61 2198,1344

P1-P7(14/09/2019 13:02:00)
 P1-PERC(14/09/2019 12:14:00)
 P7-SAT 91551(14/09/2019 13:02:00) 0,0017 0,005 0,0415 0,0715 0,73 2,18 2307,7032

P1-P7(14/09/2019 13:02:00)
 P1-SAT 91551(14/09/2019 12:14:00)
 P8-PERC(14/09/2019 12:50:20) 0,0048 0,0113 0,0405 0,0705 2,29 5,39 2106,501

P1-P8(14/09/2019 12:50:20)
 P1-PERC(14/09/2019 12:14:00)
 P8-PERC(14/09/2019 12:50:20) 0,006 0,0142 0,0405 0,0705 2,84 6,72 2107,1437

P7-P8(14/09/2019 13:02:00)
 P7-PERC(14/09/2019 13:02:00)
 P8-SAT 91551(14/09/2019 12:50:20) 0,0058 0,003 0,0409 0,0709 2,67 1,38 2174,3348

P1-P8(14/09/2019 12:50:20)
 P1-SAT 91551(14/09/2019 12:14:00)
 P8-SAT 91551(14/09/2019 12:50:20) 0,0056 0,0029 0,0415 0,0715 2,46 1,27 2293,7506

P7-P8(14/09/2019 13:02:00)
 P7-SAT 91551(14/09/2019 13:02:00)
 P8-SAT 91551(14/09/2019 12:50:20) 0,0018 0,0049 0,0444 0,0744 0,62 1,71 2885,5147

P8-PERC(14/09/2019 12:50:20)
 PERC-SAT 91551(14/09/2019 11:36:00)
 PERC-SAT 91551(14/09/2019 11:36:00) 0,0014 0,0034 0,0437 0,0737 0,51 1,25 2738,4614

P1-PERC(14/09/2019 12:14:00)
 P1-SAT 91551(14/09/2019 12:14:00)
 PERC-SAT 91551(14/09/2019 11:36:00) 0,0056 0 0,0467 0,0767 1,67 0,01 3347,6478

P5-PERC(14/09/2019 16:00:00)

P5-SAT 91551(14/09/2019 16:00:00)

PERC-SAT 91551(14/09/2019 11:36:00) 0,0019 0,0063 0,0448 0,0748 0,63 2,13 2967,8619

P7-PERC(14/09/2019 13:02:00)

P7-SAT 91551(14/09/2019 13:02:00)

APÊNDICE C - POLIGONAL FECHADA.

C.1 Caderneta de Campo, Relatório de Cálculos, Elementos da Poligonal e Quantidades de Fechamento.

Software: AstGeoTop

Autor: Prof. Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés

Departamento de Eng. Cartográfica/UFPE

Módulo: Planialtimetria© Versão 2013.04.25

CADERNETA DE CAMPO

Est.	PtoVis	Alt.Instr	Alt.Prisma	Ang.Horário	Dist.Horiz	Ang.Zenital	Dist.Incli	DV	PD/PI
P1	P8	1,560	1,569	359°59`59,0"	126,180	89°51`23,0"	126,180	0,316	PD
P1	P8	1,560	1,569	180°00`02,0"	126,180	270°08`39,0"	126,180	0,317	PI
P1	P8	1,560	1,569	0°00`05,0"	126,180	89°50`56,0"	126,180	0,333	PD
P1	P8	1,560	1,569	179°59`59,0"	126,180	270°09`06,0"	126,180	0,334	PI
P1	P2	1,560	1,498	266°06`51,0"	282,939	90°04`10,0"	282,939	-0,343	PD
P1	P2	1,560	1,498	86°06`42,0"	282,939	269°55`48,0"	282,939	-0,346	PI
P1	P2	1,560	1,498	266°06`47,0"	282,939	90°04`00,0"	282,939	-0,329	PD
P1	P2	1,560	1,498	86°06`41,0"	282,938	269°55`44,0"	282,938	-0,351	PI
P2	P1	1,488	1,564	0°00`00,0"	282,943	89°55`51,0"	282,943	0,342	PD
P2	P1	1,488	1,564	179°59`50,0"	282,942	270°03`58,0"	282,942	0,326	PI
P2	P1	1,488	1,564	0°00`02,0"	282,938	89°55`59,0"	282,938	0,331	PD
P2	P1	1,488	1,564	179°59`58,0"	282,939	270°04`04,0"	282,939	0,335	PI
P2	P3	1,488	1,528	187°02`03,0"	177,440	90°02`52,0"	177,440	-0,148	PD
P2	P3	1,488	1,528	7°01`54,0"	177,434	269°56`51,0"	177,434	-0,163	PI
P2	P3	1,488	1,528	187°01`56,0"	177,442	90°03`05,0"	177,442	-0,159	PD
P2	P3	1,488	1,528	7°02`02,0"	177,438	269°56`58,0"	177,438	-0,157	PI
P3	P2	1,532	1,490	0°00`00,0"	177,437	89°58`34,0"	177,437	0,074	PD
P3	P2	1,532	1,490	180°00`02,0"	177,437	270°01`25,0"	177,437	0,073	PI
P3	P2	1,532	1,490	0°00`07,0"	177,437	89°58`43,0"	177,437	0,066	PD
P3	P2	1,532	1,490	180°00`06,0"	177,439	270°01`28,0"	177,439	0,076	PI

P3	P4	1,532	1,582	262°32`08,0"	120,256	89°58`27,0"	120,256	0,054	PD
P3	P4	1,532	1,582	82°32`10,0"	120,253	270°01`33,0"	120,253	0,054	PI
P3	P4	1,532	1,582	262°32`17,0"	120,259	89°58`23,0"	120,259	0,057	PD
P3	P4	1,532	1,582	82°32`11,0"	120,259	270°01`38,0"	120,259	0,057	PI
P4	P3	1,390	1,538	359°59`59,0"	120,255	89°56`53,0"	120,255	0,109	PD
P4	P3	1,390	1,538	179°59`59,0"	120,255	270°03`09,0"	120,255	0,110	PI
P4	P3	1,390	1,538	0°00`05,0"	120,255	89°56`59,0"	120,255	0,106	PD
P4	P3	1,390	1,538	179°59`53,0"	120,256	270°03`01,0"	120,256	0,106	PI
P4	P5	1,390	1,430	263°14`59,0"	173,467	90°08`26,0"	173,468	-0,426	PD
P4	P5	1,390	1,430	83°14`58,0"	173,468	269°51`28,0"	173,469	-0,431	PI
P4	P5	1,390	1,430	263°14`56,0"	173,469	90°08`33,0"	173,470	-0,431	PD
P4	P5	1,390	1,430	83°14`52,0"	173,470	269°51`23,0"	173,471	-0,435	PI
P5	P4	1,390	1,402	0°00`00,0"	173,468	89°51`57,0"	173,468	0,406	PD
P5	P4	1,390	1,402	179°59`59,0"	173,466	270°08`00,0"	173,466	0,404	PI
P5	P4	1,390	1,402	0°00`05,0"	173,467	89°51`55,0"	173,467	0,408	PD
P5	P4	1,390	1,402	180°00`03,0"	173,467	270°08`14,0"	173,467	0,415	PI
P5	P6	1,390	1,435	175°39`48,0"	186,995	89°48`07,0"	186,996	0,646	PD
P5	P6	1,390	1,435	355°39`48,0"	186,997	270°11`45,0"	186,998	0,639	PI
P5	P6	1,390	1,435	175°39`52,0"	186,996	89°48`17,0"	186,997	0,637	PD
P5	P6	1,390	1,435	355°39`55,0"	186,995	270°11`35,0"	186,996	0,630	PI
P6	P5	1,445	1,384	0°00`00,0"	186,999	90°13`00,0"	187,000	-0,707	PD
P6	P5	1,445	1,384	179°59`40,0"	186,996	269°47`03,0"	186,997	-0,704	PI
P6	P5	1,445	1,384	0°00`06,0"	186,997	90°13`03,0"	186,998	-0,710	PD
P6	P5	1,445	1,384	179°59`45,0"	186,995	269°46`59,0"	186,996	-0,708	PI
P6	P7	1,445	1,690	193°34`10,0"	124,380	90°06`11,0"	124,380	-0,224	PD
P6	P7	1,445	1,690	13°34`12,0"	124,380	269°54`06,0"	124,380	-0,213	PI
P6	P7	1,445	1,690	193°34`09,0"	124,380	90°05`57,0"	124,380	-0,215	PD
P6	P7	1,445	1,690	13°34`07,0"	124,380	269°53`56,0"	124,380	-0,219	PI
P7	P6	1,690	1,436	359°59`07,0"	124,382	89°54`26,0"	124,382	0,201	PD
P7	P6	1,690	1,436	179°59`00,0"	124,379	270°05`34,0"	124,379	0,201	PI
P7	P6	1,690	1,436	359°58`57,0"	124,383	89°54`19,0"	124,383	0,206	PD
P7	P6	1,690	1,436	179°58`48,0"	124,380	270°05`34,0"	124,380	0,201	PI

P7	P8	1,690	1,399	276°51`31,0"	71,505	89°29`31,0"	71,508	0,634	PD
P7	P8	1,690	1,399	96°51`34,0"	71,507	270°30`44,0"	71,510	0,639	PI
P7	P8	1,690	1,399	276°51`20,0"	71,506	89°29`13,0"	71,509	0,640	PD
P7	P8	1,690	1,399	96°51`22,0"	71,505	270°30`34,0"	71,508	0,636	PI
P8	P7	1,397	1,688	0°00`00,0"	71,507	90°30`00,0"	71,510	-0,624	PD
P8	P7	1,397	1,688	180°00`00,0"	71,506	269°30`00,0"	71,509	-0,624	PI
P8	P7	1,397	1,688	0°00`00,0"	71,507	90°30`07,0"	71,510	-0,626	PD
P8	P7	1,397	1,688	179°59`59,0"	71,510	269°30`06,0"	71,513	-0,622	PI
P8	P1	1,397	1,385	174°56`17,0"	126,180	90°08`06,0"	126,180	-0,297	PD
P8	P1	1,397	1,385	354°56`12,0"	126,181	269°52`07,0"	126,181	-0,289	PI
P8	P1	1,397	1,385	174°56`18,0"	126,180	90°08`01,0"	126,180	-0,294	PD
P8	P1	1,397	1,385	354°56`25,0"	126,182	269°52`01,0"	126,182	-0,293	PI

RELATÓRIO DE CÁLCULOS

***** Início da Primeira Fase (Organização dos dados no formato AstGeoTop) *****

EST	RÉ	ANG HOR	dist Hor	dh	VANTE	ANG HOR	dist Hor	dh	PD/PI
P1	P8	359°59`59,0"	126,180	0,307	P2	266°06`51,0"	282,939	-0,281	PD
P1	P8	180°00`02,0"	126,180	0,308	P2	86°06`42,0"	282,939	-0,284	PI
P1	P8	0°00`05,0"	126,180	0,324	P2	266°06`47,0"	282,939	-0,267	PD
P1	P8	179°59`59,0"	126,180	0,325	P2	86°06`41,0"	282,938	-0,289	PI
P2	P1	0°00`00,0"	282,943	0,266	P3	187°02`03,0"	177,440	-0,188	PD
P2	P1	179°59`50,0"	282,942	0,250	P3	7°01`54,0"	177,434	-0,203	PI
P2	P1	0°00`02,0"	282,938	0,255	P3	187°01`56,0"	177,442	-0,199	PD
P2	P1	179°59`58,0"	282,939	0,259	P3	7°02`02,0"	177,438	-0,197	PI
P3	P2	0°00`00,0"	177,437	0,116	P4	262°32`08,0"	120,256	0,004	PD
P3	P2	180°00`02,0"	177,437	0,115	P4	82°32`10,0"	120,253	0,004	PI
P3	P2	0°00`07,0"	177,437	0,108	P4	262°32`17,0"	120,259	0,007	PD
P3	P2	180°00`06,0"	177,439	0,118	P4	82°32`11,0"	120,259	0,007	PI

P4	P3	359°59`59,0"	120,255	-0,039	P5	263°14`59,0"	173,467	-0,466	PD
P4	P3	179°59`59,0"	120,255	-0,038	P5	83°14`58,0"	173,468	-0,471	PI
P4	P3	0°00`05,0"	120,255	-0,042	P5	263°14`56,0"	173,469	-0,471	PD
P4	P3	179°59`53,0"	120,256	-0,042	P5	83°14`52,0"	173,470	-0,475	PI
P5	P4	0°00`00,0"	173,468	0,394	P6	175°39`48,0"	186,995	0,601	PD
P5	P4	179°59`59,0"	173,466	0,392	P6	355°39`48,0"	186,997	0,594	PI
P5	P4	0°00`05,0"	173,467	0,396	P6	175°39`52,0"	186,996	0,592	PD
P5	P4	180°00`03,0"	173,467	0,403	P6	355°39`55,0"	186,995	0,585	PI
P6	P5	0°00`00,0"	186,999	-0,646	P7	193°34`10,0"	124,380	-0,469	PD
P6	P5	179°59`40,0"	186,996	-0,643	P7	13°34`12,0"	124,380	-0,458	PI
P6	P5	0°00`06,0"	186,997	-0,649	P7	193°34`09,0"	124,380	-0,460	PD
P6	P5	179°59`45,0"	186,995	-0,647	P7	13°34`07,0"	124,380	-0,464	PI
P7	P6	359°59`07,0"	124,382	0,455	P8	276°51`31,0"	71,505	0,925	PD
P7	P6	179°59`00,0"	124,379	0,455	P8	96°51`34,0"	71,507	0,930	PI
P7	P6	359°58`57,0"	124,383	0,460	P8	276°51`20,0"	71,506	0,931	PD
P7	P6	179°58`48,0"	124,380	0,455	P8	96°51`22,0"	71,505	0,927	PI
P8	P7	0°00`00,0"	71,507	-0,915	P1	174°56`17,0"	126,180	-0,285	PD
P8	P7	180°00`00,0"	71,506	-0,915	P1	354°56`12,0"	126,181	-0,277	PI
P8	P7	0°00`00,0"	71,507	-0,917	P1	174°56`18,0"	126,180	-0,282	PD
P8	P7	179°59`59,0"	71,510	-0,913	P1	354°56`25,0"	126,182	-0,281	PI

----- Fim da Primeira Fase -----

***** Início da Segunda Fase (Redução dos ângulos à Ré = Origem no Ponto de Ré) *****

EST	RÉ	ANG HOR	dist Hor	dh	VANTE	ANG HOR	dist Hor	dh	PD/PI
P1	P8	0°00`00,0"	126,180	0,307	P2	266°06`52,0"	282,939	-0,281	PD
P1	P8	0°00`00,0"	126,180	0,308	P2	266°06`40,0"	282,939	-0,284	PI
P1	P8	0°00`00,0"	126,180	0,324	P2	266°06`42,0"	282,939	-0,267	PD
P1	P8	0°00`00,0"	126,180	0,325	P2	266°06`42,0"	282,938	-0,289	PI
P2	P1	0°00`00,0"	282,943	0,266	P3	187°02`03,0"	177,440	-0,188	PD
P2	P1	0°00`00,0"	282,942	0,250	P3	187°02`04,0"	177,434	-0,203	PI
P2	P1	0°00`00,0"	282,938	0,255	P3	187°01`54,0"	177,442	-0,199	PD
P2	P1	0°00`00,0"	282,939	0,259	P3	187°02`04,0"	177,438	-0,197	PI

P3	P2	0°00`00,0"	177,437	0,116	P4	262°32`08,0"	120,256	0,004	PD
P3	P2	0°00`00,0"	177,437	0,115	P4	262°32`08,0"	120,253	0,004	PI
P3	P2	0°00`00,0"	177,437	0,108	P4	262°32`10,0"	120,259	0,007	PD
P3	P2	0°00`00,0"	177,439	0,118	P4	262°32`05,0"	120,259	0,007	PI
P4	P3	0°00`00,0"	120,255	-0,039	P5	263°15`00,0"	173,467	-0,466	PD
P4	P3	0°00`00,0"	120,255	-0,038	P5	263°14`59,0"	173,468	-0,471	PI
P4	P3	0°00`00,0"	120,255	-0,042	P5	263°14`51,0"	173,469	-0,471	PD
P4	P3	0°00`00,0"	120,256	-0,042	P5	263°14`59,0"	173,470	-0,475	PI
P5	P4	0°00`00,0"	173,468	0,394	P6	175°39`48,0"	186,995	0,601	PD
P5	P4	0°00`00,0"	173,466	0,392	P6	175°39`49,0"	186,997	0,594	PI
P5	P4	0°00`00,0"	173,467	0,396	P6	175°39`47,0"	186,996	0,592	PD
P5	P4	0°00`00,0"	173,467	0,403	P6	175°39`52,0"	186,995	0,585	PI
P6	P5	0°00`00,0"	186,999	-0,646	P7	193°34`10,0"	124,380	-0,469	PD
P6	P5	0°00`00,0"	186,996	-0,643	P7	193°34`32,0"	124,380	-0,458	PI
P6	P5	0°00`00,0"	186,997	-0,649	P7	193°34`03,0"	124,380	-0,460	PD
P6	P5	0°00`00,0"	186,995	-0,647	P7	193°34`22,0"	124,380	-0,464	PI
P7	P6	0°00`00,0"	124,382	0,455	P8	276°52`24,0"	71,505	0,925	PD
P7	P6	0°00`00,0"	124,379	0,455	P8	276°52`34,0"	71,507	0,930	PI
P7	P6	0°00`00,0"	124,383	0,460	P8	276°52`23,0"	71,506	0,931	PD
P7	P6	0°00`00,0"	124,380	0,455	P8	276°52`34,0"	71,505	0,927	PI
P8	P7	0°00`00,0"	71,507	-0,915	P1	174°56`17,0"	126,180	-0,285	PD
P8	P7	0°00`00,0"	71,506	-0,915	P1	174°56`12,0"	126,181	-0,277	PI
P8	P7	0°00`00,0"	71,507	-0,917	P1	174°56`18,0"	126,180	-0,282	PD
P8	P7	0°00`00,0"	71,510	-0,913	P1	174°56`26,0"	126,182	-0,281	PI

----- Fim da Segunda Fase -----

***** Início da Terceira Fase (Ângulos Médios Reduzidos) *****

EST	RÉ	ANG HOR	dist Hor	dh	VANTE	ANG HOR	dist Hor	dh
P1	P8	0°00`00,0"	126,180	0,316	P2	266°06`44,0"	282,939	-0,280
P2	P1	0°00`00,0"	282,940	0,258	P3	187°02`01,2"	177,439	-0,197
P3	P2	0°00`00,0"	177,438	0,114	P4	262°32`07,7"	120,257	0,005
P4	P3	0°00`00,0"	120,255	-0,040	P5	263°14`57,3"	173,469	-0,471

P5	P4	0°00'00,0"	173,467	0,396	P6	175°39'49,0"	186,996	0,593
P6	P5	0°00'00,0"	186,997	-0,646	P7	193°34'16,7"	124,380	-0,463
P7	P6	0°00'00,0"	124,381	0,456	P8	276°52'28,8"	71,506	0,928
P8	P7	0°00'00,0"	71,508	-0,915	P1	174°56'18,3"	126,181	-0,281

----- Fim da Terceira Fase -----

ELEMENTOS DA POLIGONAL

Tipo de Poligonal : Fechada
 Número de vértices : 8
 Número de Pontos Irrradiados : 0
 Soma dos ângulos = 1799°58'43,0"
 Perímetro = 1263,1665

QUANTIDADES DE FECHAMENTO DA POLIGONAL

Erro fech. ang. = -0°01'17,0"

Erros lineares sem compensação angular

Erro em X = -0,0033
 Erro em Y = -0,0851
 Erro em h = -0,0535
 Erro Linear Horizontal = 0,0851
 Precisão Relativa = 1/14837,80

APÊNDICE D - CADERNETA DE CAMPO DA POLIGONAL FECHADA.

D.1 Cadernetta de Campo utilizada para cálculo das médias das séries, de ângulos, distâncias e diferenças de nível no módulo Planialtimetria AstGeoTop (2022). Posição Direta e Posição Inversa.

Est	PtoVis	Alt.Instr	Alt.Prisma	Ang.Horário	Dist.Horiz	Ang.Zenital	Dist.Incli	DV	PD/PI
P1	P8	1,560	1,569	359°59`59,0"	126,180	89°51`23,0"	126,180	0,316	PD
P1	P8	1,560	1,569	180°00`02,0"	126,180	270°08`39,0"	126,180	0,317	PI
P1	P8	1,560	1,569	0°00`05,0"	126,180	89°50`56,0"	126,180	0,333	PD
P1	P8	1,560	1,569	179°59`59,0"	126,180	270°09`06,0"	126,180	0,334	PI
P1	P2	1,560	1,498	266°06`51,0"	282,939	90°04`10,0"	282,939	-0,343	PD
P1	P2	1,560	1,498	86°06`42,0"	282,939	269°55`48,0"	282,939	-0,346	PI
P1	P2	1,560	1,498	266°06`47,0"	282,939	90°04`00,0"	282,939	-0,329	PD
P1	P2	1,560	1,498	86°06`41,0"	282,938	269°55`44,0"	282,938	-0,351	PI
P2	P1	1,488	1,564	0°00`00,0"	282,943	89°55`51,0"	282,943	0,342	PD
P2	P1	1,488	1,564	179°59`50,0"	282,942	270°03`58,0"	282,942	0,326	PI
P2	P1	1,488	1,564	0°00`02,0"	282,938	89°55`59,0"	282,938	0,331	PD
P2	P1	1,488	1,564	179°59`58,0"	282,939	270°04`04,0"	282,939	0,335	PI
P2	P3	1,488	1,528	187°02`03,0"	177,440	90°02`52,0"	177,440	-0,148	PD
P2	P3	1,488	1,528	7°01`54,0"	177,434	269°56`51,0"	177,434	-0,163	PI
P2	P3	1,488	1,528	187°01`56,0"	177,442	90°03`05,0"	177,442	-0,159	PD
P2	P3	1,488	1,528	7°02`02,0"	177,438	269°56`58,0"	177,438	-0,157	PI
P3	P2	1,532	1,490	0°00`00,0"	177,437	89°58`34,0"	177,437	0,074	PD
P3	P2	1,532	1,490	180°00`02,0"	177,437	270°01`25,0"	177,437	0,073	PI
P3	P2	1,532	1,490	0°00`07,0"	177,437	89°58`43,0"	177,437	0,066	PD
P3	P2	1,532	1,490	180°00`06,0"	177,439	270°01`28,0"	177,439	0,076	PI
P3	P4	1,532	1,582	262°32`08,0"	120,256	89°58`27,0"	120,256	0,054	PD
P3	P4	1,532	1,582	82°32`10,0"	120,253	270°01`33,0"	120,253	0,054	PI
P3	P4	1,532	1,582	262°32`17,0"	120,259	89°58`23,0"	120,259	0,057	PD
P3	P4	1,532	1,582	82°32`11,0"	120,259	270°01`38,0"	120,259	0,057	PI
P4	P3	1,390	1,538	359°59`59,0"	120,255	89°56`53,0"	120,255	0,109	PD
P4	P3	1,390	1,538	179°59`59,0"	120,255	270°03`09,0"	120,255	0,110	PI
P4	P3	1,390	1,538	0°00`05,0"	120,255	89°56`59,0"	120,255	0,106	PD

P4	P3	1,390	1,538	179°59`53,0"	120,256	270°03`01,0"	120,256	0,106	PI
P4	P5	1,390	1,430	263°14`59,0"	173,467	90°08`26,0"	173,468	-0,426	PD
P4	P5	1,390	1,430	83°14`58,0"	173,468	269°51`28,0"	173,469	-0,431	PI
P4	P5	1,390	1,430	263°14`56,0"	173,469	90°08`33,0"	173,470	-0,431	PD
P4	P5	1,390	1,430	83°14`52,0"	173,470	269°51`23,0"	173,471	-0,435	PI
P5	P4	1,390	1,402	0°00`00,0"	173,468	89°51`57,0"	173,468	0,406	PD
P5	P4	1,390	1,402	179°59`59,0"	173,466	270°08`00,0"	173,466	0,404	PI
P5	P4	1,390	1,402	0°00`05,0"	173,467	89°51`55,0"	173,467	0,408	PD
P5	P4	1,390	1,402	180°00`03,0"	173,467	270°08`14,0"	173,467	0,415	PI
P5	P6	1,390	1,435	175°39`48,0"	186,995	89°48`07,0"	186,996	0,646	PD
P5	P6	1,390	1,435	355°39`48,0"	186,997	270°11`45,0"	186,998	0,639	PI
P5	P6	1,390	1,435	175°39`52,0"	186,996	89°48`17,0"	186,997	0,637	PD
P5	P6	1,390	1,435	355°39`55,0"	186,995	270°11`35,0"	186,996	0,630	PI
P6	P5	1,445	1,384	0°00`00,0"	186,999	90°13`00,0"	187,000	-0,707	PD
P6	P5	1,445	1,384	179°59`40,0"	186,996	269°47`03,0"	186,997	-0,704	PI
P6	P5	1,445	1,384	0°00`06,0"	186,997	90°13`03,0"	186,998	-0,710	PD
P6	P5	1,445	1,384	179°59`45,0"	186,995	269°46`59,0"	186,996	-0,708	PI
P6	P7	1,445	1,690	193°34`10,0"	124,380	90°06`11,0"	124,380	-0,224	PD
P6	P7	1,445	1,690	13°34`12,0"	124,380	269°54`06,0"	124,380	-0,213	PI
P6	P7	1,445	1,690	193°34`09,0"	124,380	90°05`57,0"	124,380	-0,215	PD
P6	P7	1,445	1,690	13°34`07,0"	124,380	269°53`56,0"	124,380	-0,219	PI
P7	P6	1,690	1,436	359°59`07,0"	124,382	89°54`26,0"	124,382	0,201	PD
P7	P6	1,690	1,436	179°59`00,0"	124,379	270°05`34,0"	124,379	0,201	PI
P7	P6	1,690	1,436	359°58`57,0"	124,383	89°54`19,0"	124,383	0,206	PD
P7	P6	1,690	1,436	179°58`48,0"	124,380	270°05`34,0"	124,380	0,201	PI
P7	P8	1,690	1,399	276°51`31,0"	71,505	89°29`31,0"	71,508	0,634	PD
P7	P8	1,690	1,399	96°51`34,0"	71,507	270°30`44,0"	71,510	0,639	PI
P7	P8	1,690	1,399	276°51`20,0"	71,506	89°29`13,0"	71,509	0,640	PD
P7	P8	1,690	1,399	96°51`22,0"	71,505	270°30`34,0"	71,508	0,636	PI
P8	P7	1,397	1,688	0°00`00,0"	71,507	90°30`00,0"	71,510	-0,624	PD
P8	P7	1,397	1,688	180°00`00,0"	71,506	269°30`00,0"	71,509	-0,624	PI
P8	P7	1,397	1,688	0°00`00,0"	71,507	90°30`07,0"	71,510	-0,626	PD
P8	P7	1,397	1,688	179°59`59,0"	71,510	269°30`06,0"	71,513	-0,622	PI
P8	P1	1,397	1,385	174°56`17,0"	126,180	90°08`06,0"	126,180	-0,297	PD

P8	P1	1,397	1,385	354°56`12,0"	126,181	269°52`07,0"	126,181	-0,289	PI
P8	P1	1,397	1,385	174°56`18,0"	126,180	90°08`01,0"	126,180	-0,294	PD
P8	P1	1,397	1,385	354°56`25,0"	126,182	269°52`01,0"	126,182	-0,293	PI

D.2 Caderneta de Campo utilizada para cálculo das médias das séries, de ângulos, distâncias e diferenças de nível no módulo Planialtimetria AstGeoTop (2022). Somente PD.

Est	(P. VISADO)	AI	AP	Âng. Horizontal.	Dist H	Âng.Z	Dist.Inc.	DV	PD/PI
P1	P8	1,560	1,569	359°59`59,0"	126,180	89°51`23,0"	126,180	0,316	PD
P1	P8	1,560	1,569	0°00`02,0"	126,180	89°51`21,0"	126,180	0,317	PD
P1	P8	1,560	1,569	0°00`05,0"	126,180	89°50`56,0"	126,180	0,333	PD
P1	P8	1,560	1,569	-0°00`01,0"	126,180	89°50`54,0"	126,180	0,334	PD
P1	P2	1,560	1,498	266°06`51,0"	282,939	90°04`10,0"	282,939	-	PD
P1	P2	1,560	1,498	266°06`42,0"	282,939	90°04`12,0"	282,939	-	PD
P1	P2	1,560	1,498	266°06`47,0"	282,939	90°04`00,0"	282,939	-	PD
P1	P2	1,560	1,498	266°06`41,0"	282,938	90°04`16,0"	282,938	-	PD
P2	P1	1,488	1,564	0°00`00,0"	282,943	89°55`51,0"	282,943	0,342	PD
P2	P1	1,488	1,564	-0°00`10,0"	282,942	89°56`02,0"	282,942	0,326	PD
P2	P1	1,488	1,564	0°00`02,0"	282,938	89°55`59,0"	282,938	0,331	PD
P2	P1	1,488	1,564	-0°00`02,0"	282,939	89°55`56,0"	282,939	0,335	PD
P2	P3	1,488	1,528	187°02`03,0"	177,440	90°02`52,0"	177,440	-	PD
P2	P3	1,488	1,528	187°01`54,0"	177,434	90°03`09,0"	177,434	-	PD
P2	P3	1,488	1,528	187°01`56,0"	177,442	90°03`05,0"	177,442	-	PD
P2	P3	1,488	1,528	187°02`02,0"	177,438	90°03`02,0"	177,438	-	PD
P3	P2	1,532	1,490	0°00`00,0"	177,437	89°58`34,0"	177,437	0,074	PD
P3	P2	1,532	1,490	0°00`02,0"	177,437	89°58`35,0"	177,437	0,073	PD
P3	P2	1,532	1,490	0°00`07,0"	177,437	89°58`43,0"	177,437	0,066	PD
P3	P2	1,532	1,490	0°00`06,0"	177,439	89°58`32,0"	177,439	0,076	PD
P3	P4	1,532	1,582	262°32`08,0"	120,256	89°58`27,0"	120,256	0,054	PD
P3	P4	1,532	1,582	262°32`10,0"	120,253	89°58`27,0"	120,253	0,054	PD
P3	P4	1,532	1,582	262°32`17,0"	120,259	89°58`23,0"	120,259	0,057	PD
P3	P4	1,532	1,582	262°32`11,0"	120,259	89°58`22,0"	120,259	0,057	PD
P4	P3	1,390	1,538	359°59`59,0"	120,255	89°56`53,0"	120,255	0,109	PD
P4	P3	1,390	1,538	-0°00`01,0"	120,255	89°56`51,0"	120,255	0,110	PD
P4	P3	1,390	1,538	0°00`05,0"	120,255	89°56`59,0"	120,255	0,106	PD

P4	P3	1,390	1,538	-0°00`07,0"	120,256	89°56`59,0"	120,256	0,106	PD
P4	P5	1,390	1,430	263°14`59,0"	173,467	90°08`26,0"	173,468	-	PD
P4	P5	1,390	1,430	263°14`58,0"	173,468	90°08`32,0"	173,469	-	PD
P4	P5	1,390	1,430	263°14`56,0"	173,469	90°08`33,0"	173,470	-	PD
P4	P5	1,390	1,430	263°14`52,0"	173,470	90°08`37,0"	173,471	-	PD
P5	P4	1,390	1,402	0°00`00,0"	173,468	89°51`57,0"	173,468	0,406	PD
P5	P4	1,390	1,402	-0°00`01,0"	173,466	89°52`00,0"	173,466	0,404	PD
P5	P4	1,390	1,402	0°00`05,0"	173,467	89°51`55,0"	173,467	0,408	PD
P5	P4	1,390	1,402	0°00`03,0"	173,467	89°51`46,0"	173,467	0,415	PD
P5	P6	1,390	1,435	175°39`48,0"	186,995	89°48`07,0"	186,996	0,646	PD
P5	P6	1,390	1,435	175°39`48,0"	186,997	89°48`15,0"	186,998	0,639	PD
P5	P6	1,390	1,435	175°39`52,0"	186,996	89°48`17,0"	186,997	0,637	PD
P5	P6	1,390	1,435	175°39`55,0"	186,995	89°48`25,0"	186,996	0,630	PD
P6	P5	1,445	1,384	0°00`00,0"	186,999	90°13`00,0"	187,000	-	PD
P6	P5	1,445	1,384	-0°00`20,0"	186,996	90°12`57,0"	186,997	-	PD
P6	P5	1,445	1,384	0°00`06,0"	186,997	90°13`03,0"	186,998	-	PD
P6	P5	1,445	1,384	-0°00`15,0"	186,995	90°13`01,0"	186,996	-	PD
P6	P7	1,445	1,690	193°34`10,0"	124,380	90°06`11,0"	124,380	-	PD
P6	P7	1,445	1,690	193°34`12,0"	124,380	90°05`54,0"	124,380	-	PD
P6	P7	1,445	1,690	193°34`09,0"	124,380	90°05`57,0"	124,380	-	PD
P6	P7	1,445	1,690	193°34`07,0"	124,380	90°06`04,0"	124,380	-	PD
P7	P6	1,690	1,436	359°59`07,0"	124,382	89°54`26,0"	124,382	0,201	PD
P7	P6	1,690	1,436	-0°01`00,0"	124,379	89°54`26,0"	124,379	0,201	PD
P7	P6	1,690	1,436	-0°01`03,0"	124,383	89°54`19,0"	124,383	0,206	PD
P7	P6	1,690	1,436	-0°01`12,0"	124,380	89°54`26,0"	124,380	0,201	PD
P7	P8	1,690	1,399	276°51`31,0"	71,505	89°29`31,0"	71,508	0,634	PD
P7	P8	1,690	1,399	276°51`34,0"	71,507	89°29`16,0"	71,510	0,639	PD
P7	P8	1,690	1,399	276°51`20,0"	71,506	89°29`13,0"	71,509	0,640	PD
P7	P8	1,690	1,399	276°51`22,0"	71,505	89°29`26,0"	71,508	0,636	PD
P8	P7	1,397	1,688	0°00`00,0"	71,507	90°30`00,0"	71,510	-	PD
P8	P7	1,397	1,688	0°00`00,0"	71,506	90°30`00,0"	71,509	-	PD
P8	P7	1,397	1,688	0°00`00,0"	71,507	90°30`07,0"	71,510	-	PD

P8	P7	1,397	1,688	-0°00`01,0"	71,510	90°29`54,0"	71,513	-	PD
P8	P1	1,397	1,385	174°56`17,0"	126,180	90°08`06,0"	126,180	-	PD
P8	P1	1,397	1,385	174°56`12,0"	126,181	90°07`53,0"	126,181	-	PD
P8	P1	1,397	1,385	174°56`18,0"	126,180	90°08`01,0"	126,180	-	PD
P8	P1	1,397	1,385	174°56`25,0"	126,182	90°07`59,0"	126,182	-	PD

APÊNDICE E - CADERNETA DE CAMPO PARA DETERMINAÇÃO DAS DISTÂNCIAS E ÂNGULOS NO CÁLCULO 3D DA POLIGONAL FECHADA.

E.1 Dados de entrada para o ajustamento de rede3D AstGeoTop (2022).

Est	(P. VIS.)	AI	AP	Âng.Horizontal.	Âng.Z	Dist.Inc.	PD/PI
P1	P8	1,560	1,569	0°00`00,0"	89°51`23,0"	126,180	PD
P1	P8	1,560	1,569	0°00`02,0"	89°51`21,0"	126,180	PD
P1	P8	1,560	1,569	0°00`05,0"	89°50`56,0"	126,180	PD
P1	P8	1,560	1,569	0°00`00,0"	89°50`54,0"	126,180	PD
P1	P2	1,560	1,498	266°06`52,0"	90°04`10,0"	282,939	PD
P1	P2	1,560	1,498	266°06`42,0"	90°04`12,0"	282,939	PD
P1	P2	1,560	1,498	266°06`47,0"	90°04`00,0"	282,939	PD
P1	P2	1,560	1,498	266°06`42,0"	90°04`16,0"	282,938	PD
P2	P1	1,488	1,564	0°00`00,0"	89°55`51,0"	282,943	PD
P2	P1	1,488	1,564	-0°00`10,0"	89°56`02,0"	282,942	PD
P2	P1	1,488	1,564	0°00`02,0"	89°55`59,0"	282,938	PD
P2	P1	1,488	1,564	-0°00`02,0"	89°55`56,0"	282,939	PD
P2	P3	1,488	1,528	187°02`03,0"	90°02`52,0"	177,440	PD
P2	P3	1,488	1,528	187°01`54,0"	90°03`09,0"	177,434	PD
P2	P3	1,488	1,528	187°01`56,0"	90°03`05,0"	177,442	PD
P2	P3	1,488	1,528	187°02`02,0"	90°03`02,0"	177,438	PD
P3	P2	1,532	1,490	0°00`00,0"	89°58`34,0"	177,437	PD
P3	P2	1,532	1,490	0°00`02,0"	89°58`35,0"	177,437	PD
P3	P2	1,532	1,490	0°00`07,0"	89°58`43,0"	177,437	PD
P3	P2	1,532	1,490	0°00`06,0"	89°58`32,0"	177,439	PD
P3	P4	1,532	1,582	262°32`08,0"	89°58`27,0"	120,256	PD
P3	P4	1,532	1,582	262°32`10,0"	89°58`27,0"	120,253	PD
P3	P4	1,532	1,582	262°32`17,0"	89°58`23,0"	120,259	PD
P3	P4	1,532	1,582	262°32`11,0"	89°58`22,0"	120,259	PD
P4	P3	1,390	1,538	-0°00`01,0"	89°56`53,0"	120,255	PD

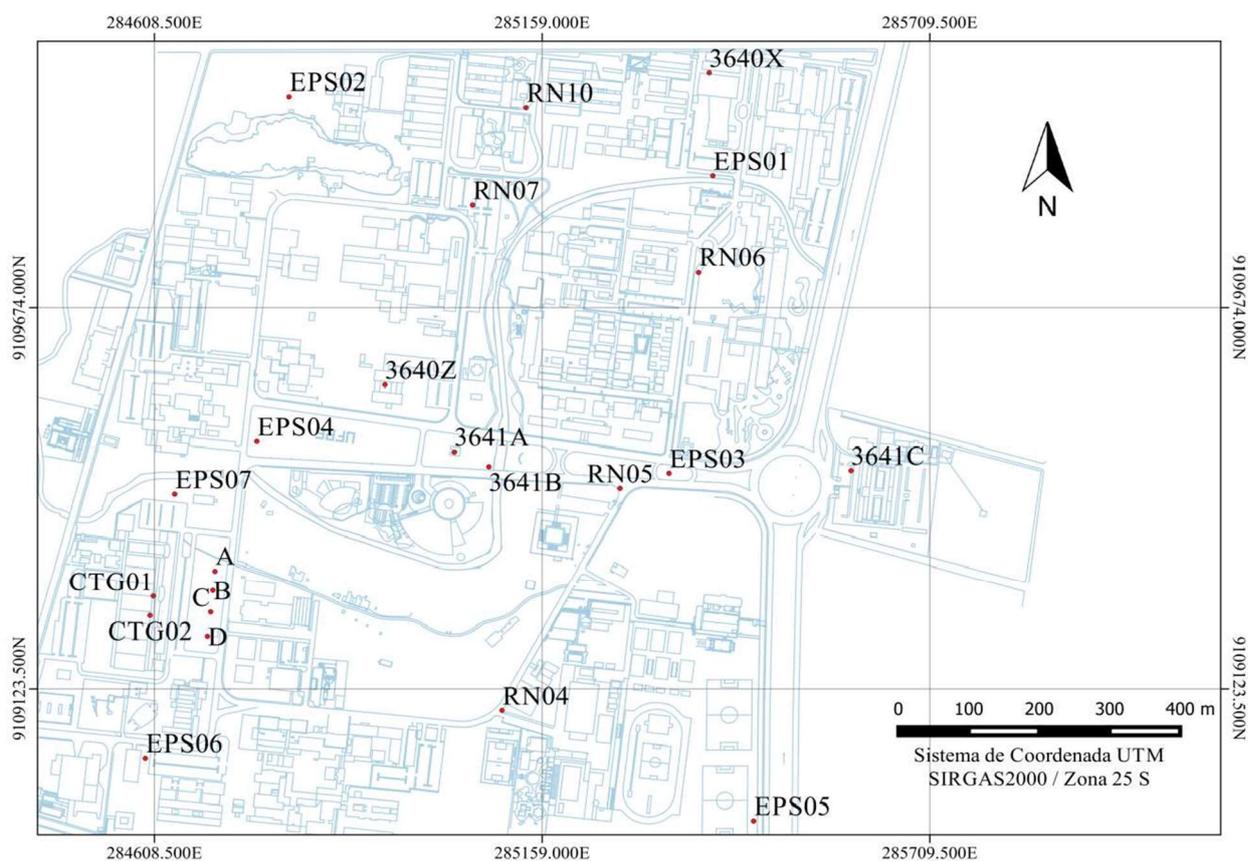
P4	P3	1,390	1,538	-0°00`01,0"	89°56`51,0"	120,255	PD
P4	P3	1,390	1,538	0°00`05,0"	89°56`59,0"	120,255	PD
P4	P3	1,390	1,538	-0°00`07,0"	89°56`59,0"	120,256	PD
P4	P5	1,390	1,430	263°14`59,0"	90°08`26,0"	173,468	PD
P4	P5	1,390	1,430	263°14`58,0"	90°08`32,0"	173,469	PD
P4	P5	1,390	1,430	263°14`56,0"	90°08`33,0"	173,470	PD
P4	P5	1,390	1,430	263°14`52,0"	90°08`37,0"	173,471	PD
P5	P4	1,390	1,402	0°00`00,0"	89°51`57,0"	173,468	PD
P5	P4	1,390	1,402	-0°00`01,0"	89°52`00,0"	173,466	PD
P5	P4	1,390	1,402	0°00`05,0"	89°51`55,0"	173,467	PD
P5	P4	1,390	1,402	0°00`03,0"	89°51`46,0"	173,467	PD
P5	P6	1,390	1,435	175°39`48,0"	89°48`07,0"	186,996	PD
P5	P6	1,390	1,435	175°39`48,0"	89°48`15,0"	186,998	PD
P5	P6	1,390	1,435	175°39`52,0"	89°48`17,0"	186,997	PD
P5	P6	1,390	1,435	175°39`55,0"	89°48`25,0"	186,996	PD
P6	P5	1,445	1,384	0°00`00,0"	90°13`00,0"	187,000	PD
P6	P5	1,445	1,384	-0°00`20,0"	90°12`57,0"	186,997	PD
P6	P5	1,445	1,384	0°00`06,0"	90°13`03,0"	186,998	PD
P6	P5	1,445	1,384	-0°00`15,0"	90°13`01,0"	186,996	PD
P6	P7	1,445	1,690	193°34`10,0"	90°06`11,0"	124,380	PD
P6	P7	1,445	1,690	193°34`12,0"	90°05`54,0"	124,380	PD
P6	P7	1,445	1,690	193°34`09,0"	90°05`57,0"	124,380	PD
P6	P7	1,445	1,690	193°34`07,0"	90°06`04,0"	124,380	PD
P7	P6	1,690	1,436	-0°00`53,0"	89°54`26,0"	124,382	PD
P7	P6	1,690	1,436	-0°01`00,0"	89°54`26,0"	124,379	PD
P7	P6	1,690	1,436	-0°01`03,0"	89°54`19,0"	124,383	PD
P7	P6	1,690	1,436	-0°01`12,0"	89°54`26,0"	124,380	PD
P7	P8	1,690	1,399	276°51`31,0"	89°29`31,0"	71,508	PD
P7	P8	1,690	1,399	276°51`34,0"	89°29`16,0"	71,510	PD
P7	P8	1,690	1,399	276°51`20,0"	89°29`13,0"	71,509	PD
P7	P8	1,690	1,399	276°51`22,0"	89°29`26,0"	71,508	PD

P8	P7	1,397	1,688	0°00`00,0"	90°30`00,0"	71,510	PD
P8	P7	1,397	1,688	0°00`00,0"	90°30`00,0"	71,509	PD
P8	P7	1,397	1,688	0°00`00,0"	90°30`07,0"	71,510	PD
P8	P7	1,397	1,688	-0°00`01,0"	90°29`54,0"	71,513	PD
P8	P1	1,397	1,385	174°56`17,0"	90°08`06,0"	126,180	PD
P8	P1	1,397	1,385	174°56`12,0"	90°07`53,0"	126,181	PD
P8	P1	1,397	1,385	174°56`18,0"	90°08`01,0"	126,180	PD
P8	P1	1,397	1,385	174°56`25,0"	90°07`59,0"	126,182	PD

ANEXO A - REFERÊNCIA DE NÍVEL RN_EPS03 (SILVA E SEIXAS, 2017).**ANEXO A.1 Rede de Referência Altimétrica do Campus Recife da UFPE.**

A RN_EPS03 se encontra no mesmo marco da estação EPS03, no entanto, não na mesma posição. A mesma se encontra situada no piso, conforme fotografia na página a seguir.

Figura An.1.1 – Pontos da Rede de Referência Altimétrica do Campus Recife da UFPE.



Fonte: (SILVA e SEIXAS, 2017).

ANEXO A.2 Imagem Ponto Referência de Nível RN_EPS03.

Figura An.2.1 – Localização do ponto RN_EPS03. Na parte inferior do pilar EPS03.

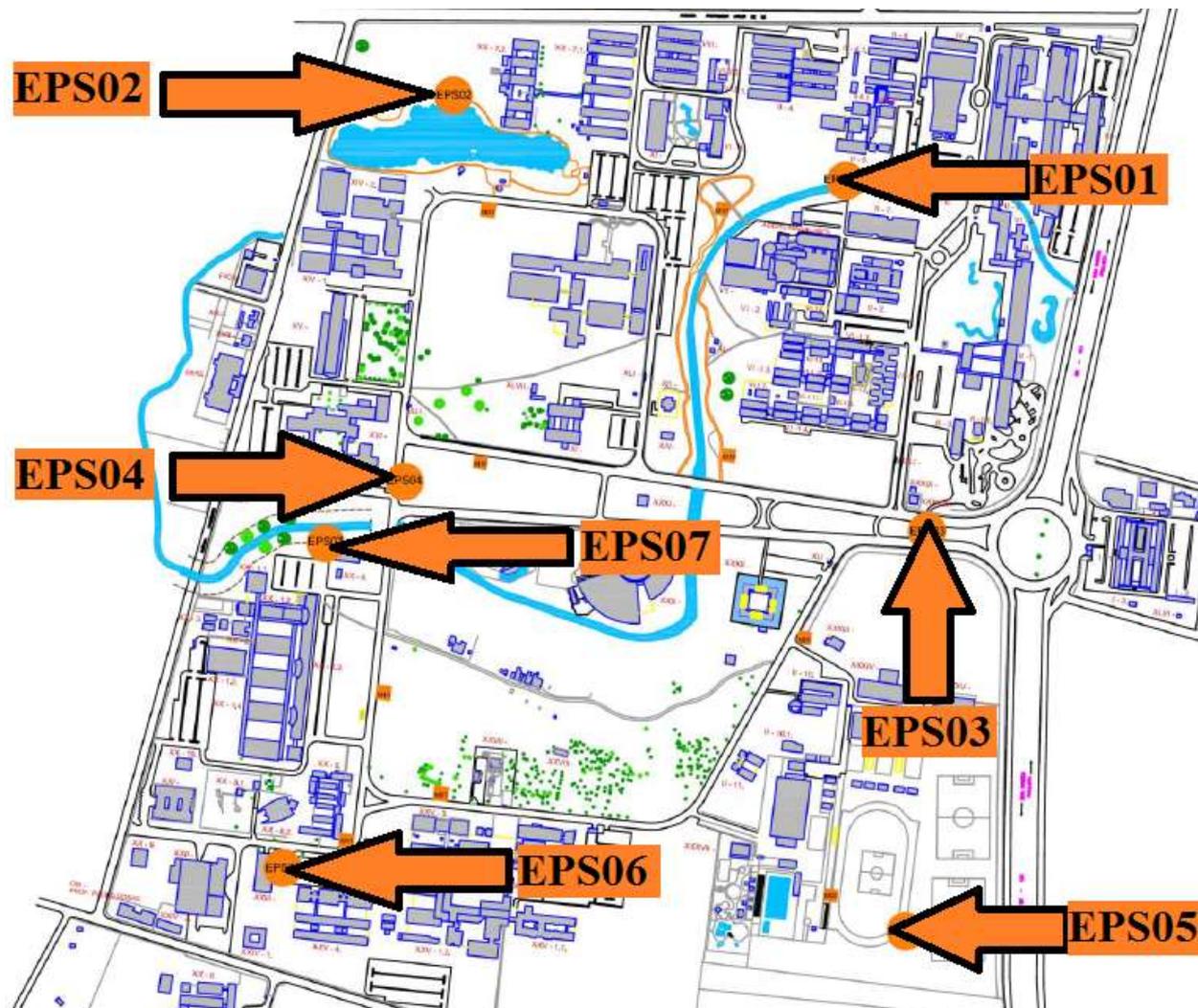


Fonte: Autores (2019). Data da foto: outubro de 2019.

*observação, o marco geodésico EPS03 é pertencente à RRCM do campus Recife (UFPE).
Detalhes sobre a RRCM (UFPE) podem ser consultados em:
<https://www.ufpe.br/latop/marcos-geodesicos>

ANEXO B - REDE DE REFERÊNCIA CADASTRAL DO CAMPUS RECIFE DA UFPE.**ANEXO B.1 Localização dos Marcos Geodésicos da RRC – UFPE (VILA FLOR, 2010), (MENDONÇA et al., 2010).**

Figura An.3.1 – Localização dos Marcos Geodésicos da RRC - UFPE.



Fonte: (VILA FLOR, 2010), (MENDONÇA et al., 2010).

Dados UFPE Campus Recife incluindo as Monografias de Marcos Geodésicos podem ser consultados em <https://www3.ufpe.br/lageo/> (acesso: dia 12 março 2022).

ANEXO C - RELATÓRIO DE ESTAÇÃO GEODÉSICA.

ANEXO C.1 Relatório de Estação Geodésica RBMC (PERC).



Relatório de Estação Geodésica

Estação :	93374	Nome da Estação :	93374	Tipo :	Estação GPS
Município :	RECIFE				UF : PE
Última Visita:	14/06/2018	Situação Marco Principal :	BOM	Última Atualização :	14/11/2018

DADOS		DADOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	08° 03' 31,68320" S	Altitude		Gravidade(mGa	
Longitude	Ortométrica(m))Datum	
Altitude Geométrica(m)	34° 57' 01,38486" W	Fonte		Data	
Fonte	12,212	Sigma Altitude(m)		Medição	
Origem	GPS Geodésico	Datum			
Datum	Ajustada	Data Medição			
Data Medição Data	SIRGAS2000	Data Cálculo			
Cálculo Sigma	14/06/2018				
Latitude(m)	05/11/2018				
Sigma Longitude(m)	0,001				
Sigma Altitude Geométrica(m)	0,001				
UTM(N)	0,002				
UTM(E)	9.108.688,600				
MC	285.059,950				

- Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 30/07/2018 - REALT 2018 2ª edição disponível em : <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101666.pdf>
- Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em : ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_planialtimetrica/relatorio/rel_sirgas2000.pdf
- Para obtenção de Altitude Ortométrica referente a levantamento SAT utilizar o MAPGEO2015 disponível em : <https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/modelos-digitais-de-superficie/modelos-digitais-de-superficie/10855-modelo-de-ondulacao-geoidal.html>
- As informações de coordenadas estão relacionadas ao sistema SIRGAS2000, em conformidade com a RPR 01/2015 de 24/02/2015 disponível em : ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rpr_01_2015_sirgas2000.pdf

Localização

Numa viga, junto à mureta de proteção do último piso, na entrada principal do prédio da reitoria do Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), na Av. Prof. Luís Freire, 500 - Cidade Universitária, Recife - PE, CEP 50740-54

Pilar de concreto, medindo 20 x 37 cm, aflorando 44 cm da mureta de proteção do teto. Possui dispositivo de centragem forçada em seu topo.

Observação

Estação RBMC: PERC



Mantenha-se atualizado consultando periodicamente o BDG. Agradecemos a comunicação de falhas ou omissões.

Para entrar em contato conosco, utilize os recursos abaixo : Fale conosco: 0800 721 8181 Email: ibge@ibge.gov.br