

WANDER DA CRUZ

**IMPACTO CAUSADO PELA EVOLUÇÃO DOS MEDIDORES
ELETRÔNICOS DE DISTÂNCIA NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito parcial a obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luis Faggion

CURITIBA
2010

Da Cruz, Wander

Impacto causado pela evolução dos medidores eletrônicos de distância no processo de calibração / Wander da Cruz. – Curitiba, 2010.

80 f. : il.

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

Orientador: Pedro Luis Faggion

1. Distanciômetros eletrônicos – Calibração. I. Faggion, Pedro Luis. II. Título.

CDD 526.98

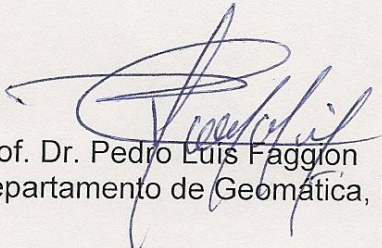
TERMO DE APROVAÇÃO

WANDER DA CRUZ

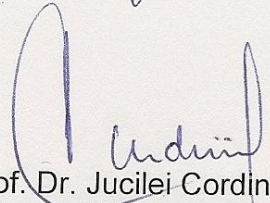
*"IMPACTO CAUSADO PELA EVOLUÇÃO DOS MEDIDORES ELETRÔNICOS DE
DISTÂNCIA NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO ATUAL"*

Dissertação nº 236 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

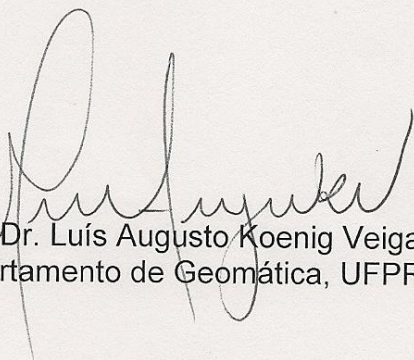
Orientador:



Prof. Dr. Pedro Luis Faggion
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Jucilei Cordini
Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC



Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 23 de julho de 2010.

*Dedico este trabalho à Glória, minha esposa, aos meus pais,
Geraldo e Selmira, e aos meus avós, Casimiro e Lenir.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, eterna companhia e proteção.

A minha esposa e grande amiga Glória, pelo apoio, paciência, e incentivo.

Aos meus pais e avós, pela dedicação e amor, demonstrados em todos os momentos da minha vida.

A minha nova família, Darci, Catarina, Jairo, Patrícia, Lucas, João Henrique e André, por terem me acolhido de forma tão carinhosa.

Ao Prof. Dr. Pedro Luis Faggion, meu orientador, pela confiança, incentivo, paciência, conselhos (inclusive no âmbito pessoal) e grande empenho para resolver problemas que surgiram no decorrer deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Nicola Pacilé Netto e ao Prof. Dr. Luis A. K. Veiga, pelas valiosas contribuições por meio de sugestões no Seminário I.

Ao Prof. Dr. Jucilei Cordini e novamente ao Prof. Dr. Luis A. K. Veiga pela composição da banca da Defesa de Dissertação.

Ao Prof. Dr. Silvio R. C. de Freitas, Prof. Dr. Daniel R. dos Santos, Prof. Dr. Carlos A. Nadal pelas conversas construtivas que contribuíram para o enriquecimento deste trabalho.

A todos os meus professores de Mestrado, por sanar as dúvidas relacionadas ou não ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eng. Agrônomo Márcio Luiz Olesko e sua equipe, por executar prontamente as solicitações referentes à conservação dos pilares da base de calibração na fazenda Canguiri.

Aos que me ajudaram na coleta, processamento dos dados de campo e discussões técnicas: Luís Ruivo, Felipe Gonçalves, Felipe Suci, Marcos “Margato” Basso, Guilherme Silva, Andrey, Fábio Oliveira, Lineardo, Suzana e Glória.

Ao amigo Raul. M.P. Friedman, pela grande colaboração na disciplina de Ajustamento de Observações e pelas contribuições através das discussões técnicas relevantes ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo Daniel Perozzo, por gentilmente colaborar na compreensão do código fonte do programa CALIBRAÇÃO.

Aos alunos do curso de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas da UTFPR, Campus Ponta Grossa, Paulo Capeller e Vinícius C. Andrade, por ajudarem a solucionar um problema que tornava impossível a compilação do programa CALIBRAÇÃO.

Aos amigos das horas de descontração: Adans e Rosi, Alisson e Lais, Anna, Daniel Bueno, Diuli, Fabi, Karol, Leonardo, Nassau, Sandro e Vera e tantos não citados que colaboram para a manutenção da minha sanidade mental.

A secretária do Programa de Pós-Graduação da UFPR, Verali Mônica Kleuser, pelo apoio prestado durante estes dois anos de curso.

Ao CNPq pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos.

A Universidade Federal do Paraná, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – PPGCG, por disponibilizar seus laboratórios e instalações.

Ao Laboratório de Aferição e Instrumentação Geodésica (LAIG) e ao Laboratório de Topografia (LABTOPO) pela disponibilização dos equipamentos.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CP	:	Com prisma
DIN	:	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
ET	:	Estação Total
GPS	:	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
INMETRO	:	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
LABTOPO	:	Laboratório de Topografia
LAIG	:	Laboratório de Aferição e Instrumentação Geodésica
LASER	:	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> (Amplificação de luz por emissão estimulada de radiação)
MED	:	Medidor Eletrônico de Distância
NBR	:	Norma Brasileira da ABNT
ppm	:	Parte por milhão
s	:	Segundos (tempo)
SP	:	Sem prisma
UFPR	:	Universidade Federal do Paraná
USP	:	Universidade de São Paulo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Princípio de funcionamento do MED	9
Figura 2 - Princípio da medição por diferença de fase	10
Figura 3 - Determinação da distância por diferença de fase.....	10
Figura 4 - Sobreposição de frequências	12
Figura 5 - Determinação do erro de zero de forma simplificada	15
Figura 6 - Determinação do Erro de Zero	16
Figura 7 - Esquema da base de calibração de NML, Austrália.....	19
Figura 8 - Estação Total sobre os trilhos do interferômetro	19
Figura 9 - Gráfico com os valores do erro cíclico.....	20
Figura 10 - Base Radial	21
Figura 11 - Base Linear de Tai Po, China.....	21
Figura 12 - Base configurada como rede.....	22
Figura 13 - Localização da Base Linear de Calibração	26
Figura 14 - Detalhe do córrego na posição calculada de P4	28
Figura 15 - Configuração dos pilares para os valores calculados.....	28
Figura 16 - Avaria na base do pilar P5.....	30
Figura 17 - Pilar P5 após recuperação	30
Figura 18 - Superabundância de medidas	31
Figura 19 - Erro cíclico em função da distância	33
Figura 20 - Montagem dos espelhos	38
Figura 21 - Prisma sobre base móvel do interferômetro	39
Figura 22 - Deslocamento do prisma.....	39
Figura 23 - Funcionamento do nível eletrônico.....	42
Figura 24 - Unidade de leitura dos valores medidos.....	43

Figura 25 - Nível eletrônico sobre o carrinho do interferômetro.....	44
Figura 26 - Nível e interferômetro	44
Figura 27 - Nivelamento trigonométrico (TC 2003).....	46
Figura 28 - Nivelamento Geométrico	47
Figura 29 - Nivelamento Geométrico - pontos auxiliares	47
Figura 30 - Croqui dos desníveis entre os pilares da Fazenda Canguiri	49
Figura 31 - Momentos da medição da base.....	50
Figura 32 - Interface para escolha do local de calibração – CAMPO	53
Figura 33 - Programa CALIBRACAO com o resultado referente a ET TCRA – Campo	54
Figura 34 - Desníveis dos trilhos do interferômetro	55
Figura 35 - Média dos desníveis dos trilhos.....	56
Figura 36 - Sensor de frequência/Estação Total/Frequencímetro	58
Figura 37 - Frequencímetro e Sensor de Frequência	58
Figura 38 - Escolha da frequência do equipamento	60
Figura 39 - Programa CALIBRACAO com o resultado referente a ET TCRA 1205 - Laboratório.....	61

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - EVOLUÇÃO DOS MED	8
QUADRO 2 - FREQUÊNCIA X COMPRIMENTO DE ONDA.....	13
QUADRO 3 - COMPRIMENTO DAS SEÇÕES DA BASE LINEAR	23
QUADRO 4 - CÁLCULO DO ESPAÇAMENTO ENTRE OS PILARES..	27
QUADRO 5 - DISTÂNCIAS DOS PILARES DA BASE DA UFPR	29
QUADRO 6 - PRECISÃO DAS ET UTILIZADAS.....	45
QUADRO 7- DESNÍVEIS EM DIFERENTES ÉPOCAS.....	48
QUADRO 8 - ESCALA DA BASE	51
QUADRO 9 - DISTÂNCIAS OBTIDAS EM DIFERENTES ÉPOCAS.....	52
QUADRO 10 - ELEMENTOS DE CALIBRAÇÃO OBTIDOS NA BASE LINEAR.....	54
QUADRO 11 - DISTÂNCIAS DO INTERFERÔMETRO.....	57
QUADRO 12 - FATOR DE ESCALA.....	59
QUADRO 13 - ELEMENTOS DO ERRO CÍCLICO.....	61
QUADRO 14 - CONSTANTE ADITIVA (CAMPO)	62
QUADRO 15 - FATOR DE ESCALA.....	62
QUADRO 16 - ELEMENTOS DO ERRO CÍCLICO.....	62

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE QUADROS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO	4
1.1.1 Objetivos Específicos	4
1.2 JUSTIFICATIVA	5
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 MEDIÇÃO ELETRÔNICA DE DISTÂNCIA	6
2.1.1 Princípio dos Medidores Eletrônicos de Distância	6
2.1.2 Erros na medição eletrônica de distância	13
2.1.2.1 Erro de Zero (ou Constante Aditiva)	14
2.1.2.2 Fator de Escala	16
2.1.2.3 Erro Cíclico	18
2.2 BASE PARA CALIBRAÇÃO EM CAMPO	20
3 METODOLOGIA	25
3.1 CALIBRAÇÃO COM OBSERVAÇÕES DE CAMPO	25
3.1.1 Descrição da Base de Calibração da UFPR	25
3.1.2 Determinação da escala da base	29
3.1.3 Determinação do fator de escala e erro de zero	32
3.1.4 Determinação das componentes do erro cíclico	33
3.2 CALIBRAÇÃO COM OBSERVAÇÕES EM LABORATÓRIO	35
3.2.1 Determinação do fator de escala	35
3.2.2 Determinação das componentes do erro cíclico	37
3.2.2.1 Nivelamento dos trilhos do Interferômetro	41
4 RESULTADOS	45
4.1 CALIBRAÇÃO EM CAMPO	45
4.1.1 Nivelamento da Base Linear	45
4.1.2 Determinação da escala da Base	50
4.1.3 Calibração das estações totais	53
4.2 CALIBRAÇÃO EM LABORATÓRIO	55
4.2.1 Nivelamento dos trilhos do Interferômetro	55
4.2.2 Determinação do fator de escala em laboratório	57
4.2.3 Determinação dos elementos do erro cíclico	59
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	63
5.1 CONCLUSÕES	63
5.2 RECOMENDAÇÕES	64
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

RESUMO

Com o advento dos medidores eletrônicos de distância (MED), solucionou-se um problema da Geodésia: a medição simultânea de direções angulares e distâncias em tempo real. Isto reduziu significativamente o número de cálculos realizados nos levantamentos e também o seu tempo de execução. Tais equipamentos, surgidos nos anos 40, estão em contínua evolução, aumentando a praticidade e os recursos em sua utilização. Se no início eles eram grandes, pesados, de difícil operação, hoje estão integrados aos teodolitos eletrônicos, equipamentos então chamados de Estação Total. O funcionamento dos MED é baseado na emissão/recepção de sinais eletromagnéticos, visíveis ou não, que atingem um anteparo e retornam ao aparelho. Os MED apresentam erros instrumentais inerentes ao processo de fabricação. Alguns não podem ser modelados e são embutidos na precisão do instrumento, outros, porém, são determinados em processos de calibração. Na realização de trabalhos utilizando MED, cada vez mais se tem exigido um certificado de calibração destes equipamentos, visando garantir a precisão das medidas. Uma das maneiras de realizar esta calibração é a utilização de bases lineares em campo. O espaçamento entre os pilares que compõem estas bases (escala da base) são definidos durante a sua construção levando em conta a frequência de medição dos MEDs existentes até aquele momento. Com a evolução tecnológica, estas frequências sofrem alterações. O objetivo deste trabalho é avaliar os impactos causados por tal evolução no processo de calibração atual. Isto foi possível, recalculando-se os espaçamentos entre os pilares considerando a frequência dos MEDs de última geração e realizando a calibração em campo, utilizando uma base construída há aproximadamente 24 anos, cujos desníveis e escala foram novamente medidos. Também foi realizada a calibração em laboratório, utilizando frequencímetro com precisão de 0,1 Hz para comparação da frequência nominal com a frequência real de cada equipamento, e interferômetro com precisão micrométrica, para possibilitar a comparação de deslocamentos medidos simultaneamente com a estação total a ser calibrada. Constatou-se que a base de calibração da UFPR atende às necessidades dos equipamentos atuais. Verificou-se a necessidade de realização de medições da escala da base com intervalos de tempo menores para detectar possíveis movimentações. Os elementos de calibração, erro de zero, fator de escala e erro cíclico obtidos neste trabalho, são coerentes com a precisão nominal de cada equipamento.

Palavras-chave: Distanciômetros Eletrônicos. Calibração de MED. Base Linear. Interferômetro. Medição Eletrônica de Distância. Calibração em Laboratório. Erros na Medição Eletrônica de Distância.

ABSTRACT

From the development of the Electronic Distance Measurement (EDM), a problem in Geodesy was resolved: The measurement of distances in real time. This means gradually decrease the required numbers of calculations in measurement and performance time as well. Such equipments, emerged in the forties, are in continuous evolution, increasing the practicality and the features in their use. If in the earliest days they were big, heavy, hard operation, today they are integrates in electronic theodolites, knows as Total Station. The operation of EDM it is based on emission/reception of electromagnetic signals, visible or not, reaching the target. The EDMs have instrumental errors intrinsic to the process of manufacturing. Some cannot be modeled and they are inserted in the instrument accuracy, however, others can be determined by calibration process. On the realization of surveys using those EDMs, has increasingly required a certified of calibration from these equipments, on ensuring the measurement precision. One of the many ways to perform the calibration is to use linear bases at field. The spacing between the pillars that make up those bases (unit of base) are defined in its construction, considering the measurement frequency of MEDs existing at that time. With technological progress, these frequencies are altered. The main objective of this study is to evaluate the impacts of such developments in the calibration process today. This was made possible by recalculating the spacing between the pillars considering the frequency of contemporary's EDMs and performing the calibration in the field, using a base built for nearly 24 years ago, and whose slope and scale were measured again. The calibration process was also performed in the laboratory using frequency counter with an accuracy of 0.1 Hz for comparison to the nominal frequency with the real frequency of each equipment, and interferometer with micrometer precision to enable the comparison of displacements measured simultaneously with the total station to be calibrated. It was found that the UFPR base calibration meets the needs of current equipment. There is a need to make measurements of unit of base with smaller time gaps to detect any displacement. The calibration elements, zero error, scale factor and cyclic error were obtained in this research are consistent with the nominal accuracy of each device.

Keywords: Calibration of Electronic Distance Measurement, Interferometer, Electronic Distance Measurement, Calibration in Laboratory, Errors in Electronic Distance Measurement.

1 INTRODUÇÃO

Alguns obstáculos envolvidos na medição da distância em processos tradicionais na Topografia e na Geodésia no passado residiam na dificuldade de se obter resultados precisos, além do tempo prolongado para a execução dos trabalhos. Para realização das redes geodésicas clássicas, os primeiros levantamentos realizados no Brasil, em outubro de 1939, utilizavam-se de teodolitos para medições angulares e fitas de invar para as medições lineares de distância, o que era difícil, porque havia a necessidade de realizar vários lances, abrindo caminho pela mata entre outras dificuldades (IBGE, 2010).

A evolução tecnológica possibilitou, a partir dos anos 40, o surgimento de geodímetros e telurômetros, com emissão de feixes luminosos e microondas respectivamente (CHRZANOWSKI, 1977). Tais equipamentos permitiram a medida de longas distâncias em tempo real, uma das maiores limitações na realização de trabalhos de mensuração.

Em 1968, surge o primeiro distanciômetro eletro-óptico e, posteriormente, os distanciômetros eletrônicos que, acoplados aos teodolitos, tornaram possível a realização de medidas de distância com maior rapidez e precisão. A partir da evolução destes equipamentos, surgiram as estações totais, equipamentos oriundos da fusão dos teodolitos e distanciômetros, munidas de microprocessadores e com capacidade para realizar cálculos topográficos, inclusive durante o levantamento (FAGGION, 2001).

Os medidores eletrônicos de distância têm como princípio de funcionamento a emissão/recepção de sinais luminosos, visíveis ou não, que atingem um anteparo (prisma ou alvo). Alguns modelos de estações necessitam da utilização de prismas para que haja reflexão total do sinal emitido. As mais recentes utilizam o laser como fonte de luz coerente para as medidas de distância e, por este motivo, dispensam a utilização de prismas. (KAHMEN; FAÍG, 1988; PACILÉO NETTO, 1990; RÜEGER, 1996; FAGGION, 2001; LEICA TCRA 1205, 2004; MARTINI, 2005).

A distância é então calculada eletronicamente em função do tempo que o sinal leva para percorrer a distância de ida e volta da estação até o anteparo ou a partir da diferença de fase do sinal emitido. Esta diferença de fase consiste na

comparação da fase do sinal emitido em relação à sua parcela que retorna após refletir no anteparo. Segundo Faggion (2001), para garantir uma precisão de um centímetro, o tempo de deslocamento do sinal deve ser medido na ordem de 6×10^{-11} segundos, o que na prática é inviável para o caso de não utilização de relógios atômicos. Neste caso, a alternativa é a medida da diferença de fase.

Para a realização de levantamentos topográficos e geodésicos exige-se a verificação, classificação e calibração instrumental, cuja atribuição é delegada pela ABNT às instituições públicas, dentre as quais estão as universidades. A verificação consiste em um conjunto de operações que envolve o exame, a marcação ou selagem e ainda, a emissão de um certificado, no qual se constate que o instrumento de medir ou medida materializada satisfaz às exigências regulamentares (INMETRO, 1998).

A classificação, por sua vez, consiste na distribuição em classes ou grupos em que devem ser agrupados os instrumentos. Tais classes são definidas de acordo com o desvio-padrão de um conjunto de observações obtidas com o equipamento seguindo uma metodologia própria (NBR 13.133, 1994).

A calibração pode ser entendida como o conjunto de operações que estabelece, em condições especiais, a correspondência entre o estímulo e a resposta de um instrumento ou sistema de medir ou mostrador de medição. Assim, o resultado de uma calibração pode permitir a determinação de um ou mais parâmetros da curva característica que relaciona o estímulo, a resposta e os valores das grandezas correspondentes às divisões de escalas de um instrumento de medir (FAGGION, 2001).

O processo de calibração dos medidores eletrônicos de distância pode ser realizado tanto em campo, utilizando bases lineares multipilares, quanto em laboratório. Os elementos obtidos a partir da calibração da estação total são o fator de escala, o erro de zero e o erro cíclico (PACILÉO NETTO, 1990; CORDINI, 1991; FAGGION, 2001).

O fator de escala consiste na variação da frequência de operação do equipamento em relação ao valor nominal fornecido pelo fabricante. Esta variação provoca um acréscimo de até 1 ppm na distância medida por ano de uso (RÜEGER,

1996; FAGGION, 2001; ACT, 2009). O erro de zero consiste na diferença entre o centro geométrico do instrumento e o emissor do sinal para a medida de distância. O centro geométrico é materializado pelo cruzamento dos eixos principal e secundário enquanto o centro eletrônico é o emissor/receptor do sinal para a medida de distância.

Por último, o erro cíclico, que é causado por um salto de fase no momento do envio e recepção do sinal e está relacionado com a medição da fase desse sinal. O valor do erro cíclico pode aumentar com o envelhecimento e uso dos instrumentos (GRIPP, 1986; PACILÉO NETTO, 1990; KHALIL, 2005).

Com relação aos procedimentos necessários para a realização de calibração de MEDs, existem duas possibilidades: procedimento de campo e de laboratório. Os procedimentos de calibração em campo requerem a implantação de pilares alinhados, cujas distâncias entre si devem ser apropriadamente distribuídas. São as bases multipilares. Os procedimentos em laboratório requerem equipamentos eletrônicos capazes de medir a frequência de operação dos MEDs, e também um padrão para medição de deslocamentos.

No Brasil, existem algumas bases multipilares como as da USP e UFPR cujo espaçamento entre pilares foi calculado em função do comprimento de onda do sinal modulante dos MEDs existentes na época das respectivas construções. Porém, estes equipamentos estão em constante evolução, sofrendo alterações nos comprimentos de onda e na frequência de operação, de modo a possibilitar diferentes formas de medição de distância, como por exemplo, sem a utilização de prismas (FAGGION, 2001). Alguns exemplos de alterações de sinal são as mudanças do tipo de frequência (microondas e laser) e mudança nas frequências de medição na busca de precisões melhores. Para maiores informações sobre estudos de bases multipilares consultar Paciléio Netto (1990).

1.1 OBJETIVO

Avaliar o impacto causado pela evolução dos medidores eletrônicos de distância no processo de calibração.

1.1.1 Objetivos Específicos

- 1) Avaliar se o afastamento entre os pilares da base da Fazenda Canguiri atende as necessidades de calibração dos equipamentos atuais;
- 2) Recalcular o espaçamento entre os pilares e avaliar se a base da fazenda Canguiri atende aos equipamentos atuais;
- 3) Recuperar o sistema de centragem forçada dos pilares danificados;
- 4) Refazer o nivelamento entre os pilares da base linear da Fazenda Canguiri;
- 5) Redefinir a escala da base de calibração da Fazenda Canguiri com a estação total TC 2003;
- 6) Nivelar os trilhos do interferômetro para viabilizar a obtenção dos elementos do erro cíclico em laboratório;
- 7) Realizar a medida da frequência de operação dos instrumentos e comparar com o valor nominal;
- 8) Realizar a calibração de equipamentos no campo e em laboratório após a implementação dos itens anteriores.

1.2 JUSTIFICATIVA

As Bases Lineares de calibração têm as distâncias entre os pilares calculadas em função da frequência de operação dos MED disponíveis no momento da construção destas. O estudo deste tema já vem sendo feito na UFPR por pesquisadores como Doubek (1974), Gripp (1986), Cordini (1991) e Faggion (2001).

A calibração de MEDs no Brasil teve início em 1974, com a implantação de uma base de calibração ao longo da BR 277 que liga Curitiba a Paranaguá. Realizada por Doubek (1974), a definição da escala da base foi feita com uma fita de invar calibrada. Em sua dissertação, Gripp (1986) realiza um estudo sobre a origem e formas de determinação dos erros inerentes aos distanciômetros eletrônicos. Também discute procedimentos para implantação de bases de calibração de campo e realiza alguns dos primeiros levantamentos para determinar os desníveis, além de medir a escala da base da UFPR.

Cordini (1991) foi o primeiro autor no Brasil a tratar da calibração a partir de dados obtidos em laboratório. Sua pesquisa sobre a determinação das componentes do erro cíclico nos MEDs com observações em laboratório fundamentou sua dissertação. Alguns anos depois, Faggion (2001) apresenta em sua tese uma metodologia para a obtenção dos elementos de calibração de um MED em campo, utilizando a base de calibração e laboratório, utilizando medidor de frequência e interferômetro. Na ocasião, também realizou a determinação dos desníveis entre os pilares e a escala da base de calibração da UFPR.

O avanço tecnológico de tais equipamentos trouxe como consequência a mudança na frequência da onda moduladora e no tipo do sinal, o que proporcionou, por exemplo, a medição de distâncias sem a utilização de prismas. Através deste estudo, será possível uma avaliação dos elementos de calibração obtidos a partir de equipamentos com frequência diferente daquela que foi utilizada no momento da construção da base, bem como elementos obtidos em laboratório.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MEDIÇÃO ELETRÔNICA DE DISTÂNCIA

2.1.1 Princípio dos Medidores Eletrônicos de Distância

Os Medidores Eletrônicos de Distância surgiram embasados na teoria eletromagnética, que afirma que toda radiação se propaga com velocidade constante no vácuo. Então, é possível obter o valor da distância percorrida pelo sinal emitido pelo MED relacionando-se sua velocidade de propagação com o tempo necessário para este percorrer determinada distância. Basicamente, um MED possui os seguintes elementos: Gerador de onda portadora; oscilador de frequência de modulação; modulador; emissor; refletor; receptor; comparador de fase e dispositivo de leitura de fase (PACILÉO NETTO, 1990).

Um dos primeiros equipamentos utilizados para medidas eletrônicas de distância é o geodímetro. O modelo AGA 6A apresentava diferentes alcances para dia e noite, pois emitia um feixe luminoso para realização da medida. Também apresentava variação na precisão (5mm para 1mm) dependendo do tempo de medição, que podia ser de cinco até trinta minutos e utilizava prismas para refletir o sinal. Sua frequência de operação era de 30 MHz (ADAPTADO DE UNSW, 2010).

O Telurômetro MRA 101 enviava ondas de rádio (microondas) a 7,5 MHz de uma unidade principal que eram captadas por outro equipamento idêntico, a unidade remota. Seu tempo de medição reduziu para um minuto e seu alcance dobrou em relação ao AGA 6A, porém teve a precisão piorada consideravelmente decaindo para a ordem do centímetro (ADAPTADO DE UNSW, 2010).

Alguns anos depois surgiu o distanciômetro HP 3800B. Este equipamento voltou a apresentar precisão na ordem do milímetro com o tempo de medição de dois minutos, porém teve seu alcance reduzido para três quilômetros. Emitia radiação variável na frequência do infra-vermelho (ADAPTADO DE UNSW, 2010).

Conforme os componentes dos distanciômetros foram diminuindo de tamanho, foi possível acoplá-los aos teodolitos, viabilizando a medida simultânea de direções angulares e distâncias. Esta possibilidade culminou na criação das Estações Totais, instrumentos compostos por um teodolito eletrônico, um MED e um microprocessador, que permite adequar suas medições e realizar cálculos topográficos de acordo com o trabalho a ser realizado (FAGGION, 2001).

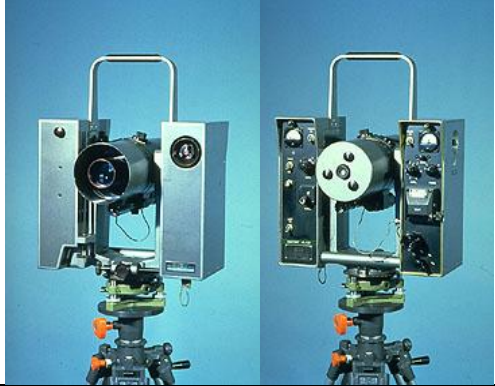


Tendo o laser como sinal emitido, algumas estações disponíveis atualmente, possibilitam a medição de distâncias sem a utilização de prismas, ou seja, o operador pode realizar a medição visando diretamente sobre o ponto desejado. Tal princípio será melhor comentado na sequência.

Ainda existe a possibilidade de integração de algumas Estações Totais com um receptor GPS (ADAPTADO DE LEICA TCRA 1205, 2004). Para interessados sobre o sistema GPS, recomenda-se o autor João Francisco Galera Monico.

Um exemplo de Estação Total integrada ao GPS é a SmartStation Leica TCRA 1205. Realiza medições em poucos segundos utilizando uma frequência de operação de aproximadamente 100 MHz, que pode acontecer com ou sem a utilização de prismas. É robotizada, por isso pode buscar prismas previamente programados e acompanhar prismas em movimento. Nominalmente, possui alcance nominal de três quilômetros, entretanto, em pesquisa desenvolvida por Santos (2009) foram realizadas visadas de até sete quilômetros (ADAPTADO DE LEICA TCRA 1205, 2004).

O princípio de funcionamento dos Medidores Eletrônicos de Distância (MED) baseia-se na emissão/recepção de sinais luminosos, visíveis ou não, que atingem um anteparo. Para haver a reflexão do sinal, alguns equipamentos necessitam da utilização de prismas que são fabricados em diversos modelos. Este princípio de funcionamento será abordado adiante.

No quadro a seguir, é possível observar as mudanças ocorridas nos equipamentos utilizados na medição eletrônica de distância com o passar do tempo. São utilizados apenas os exemplos comentados anteriormente, porém salientando que houve outras modificações não mencionados neste trabalho.

Equipamento	GEODÍMETRO AGA 6A	TELURÔMETRO MRA 101	DISTANCIÔMETRO HP 3800B	ESTAÇÃO TOTAL LEICA TCRA 1205
				
Alcance	10 km (dia) - 25 km (noite)	50 km	3 km	3 km
Precisão	$\pm (5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}) /$ $\pm (1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$	$\pm (1,5 \text{ cm} + 3 \text{ ppm})$	$\pm (3 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$	$\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$
Tempo para medição	5 min / 30 min	1 min	2 min	3 - 6 s
Ano de início de utilização	1949	1957	1965	2004
Sinal emitido	feixe de luz	ondas de rádio (microondas)	radiação na frequência do infra-vermelho	Laser
Frequência de operação	30 MHz	7,5 MHz	variável	100 MHz
Peso	16,3 kg	7,4 kg	7,7 kg	5,5 kg

QUADRO 1 - EVOLUÇÃO DOS MED
 FONTE: ADAPTADO DE UNSW, 2010

As estações mais recentes realizam as medições emitindo laser, que por se tratar de uma fonte de luz coerente com incidência bem localizada, permite que parte dos raios incidentes retorne ao MED sem a utilização de prismas (KAHMEN; FAÍG, 1988; PACILÉO NETTO, 1990; RÜEGER, 1996; FAGGION, 2001; LEICA TCRA 1205, 2004; MARTINI, 2005). A Figura 1 abaixo vislumbra o princípio de funcionamento do MED.

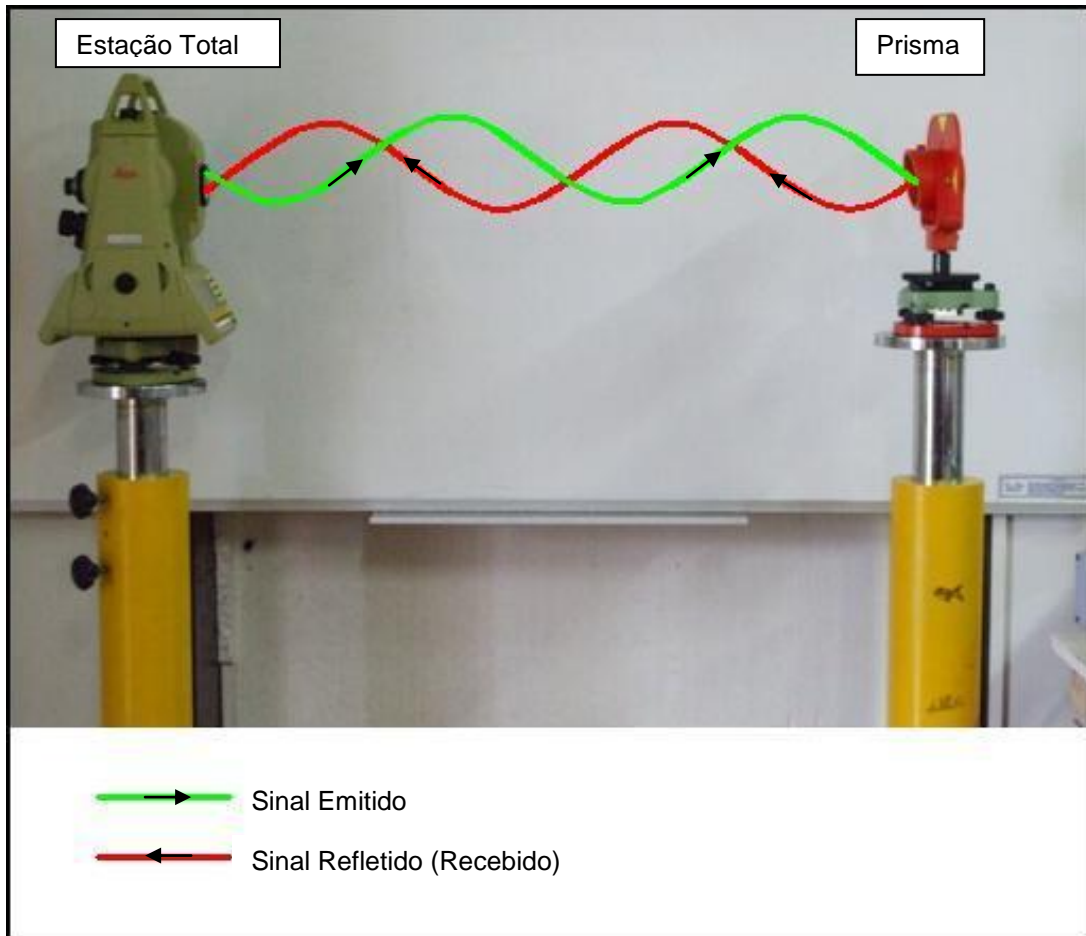


Figura 1 - Princípio de funcionamento do MED
 FONTE: O autor

A distância é calculada eletronicamente em função do tempo percorrido pelo sinal (pulso) ou pela comparação da fase do sinal emitido em relação à sua porção que retorna após refletido em algum anteparo ou prisma (diferença de fase). Como já foi dito, para se obter uma distância com precisão de 1 cm é necessário medir o tempo de deslocamento de sinal com precisão de 6×10^{-11} s. Considerando que para alcançar tal precisão seria necessária a utilização de um relógio atômico, por

exemplo, sua utilização nos MED se torna inviável pelo custo. Então a alternativa da medida da diferença de fase é utilizada (Figuras 2 e 3).

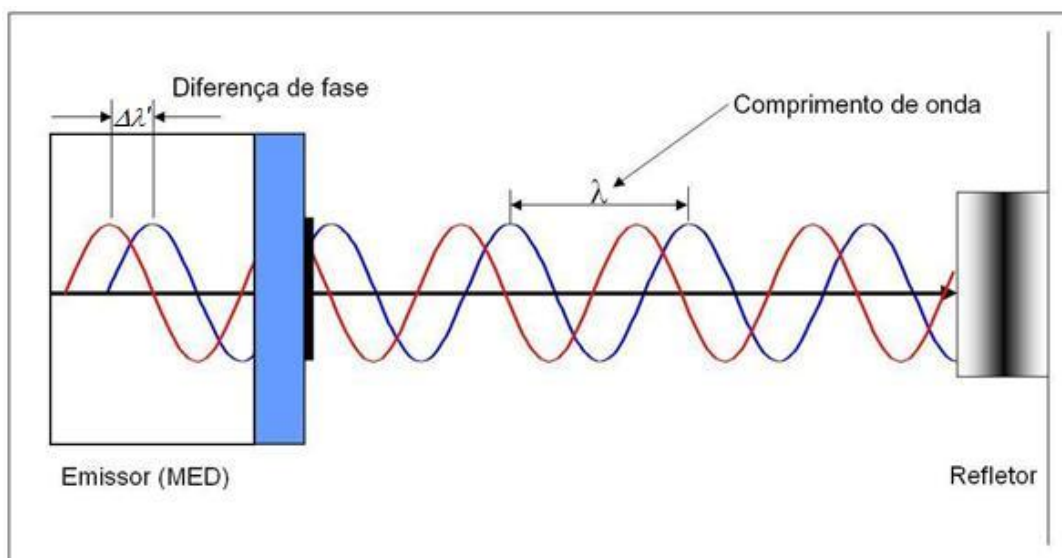


Figura 2 - Princípio da medição por diferença de fase
 FONTE: ADAPTADO DE SILVA, 2006

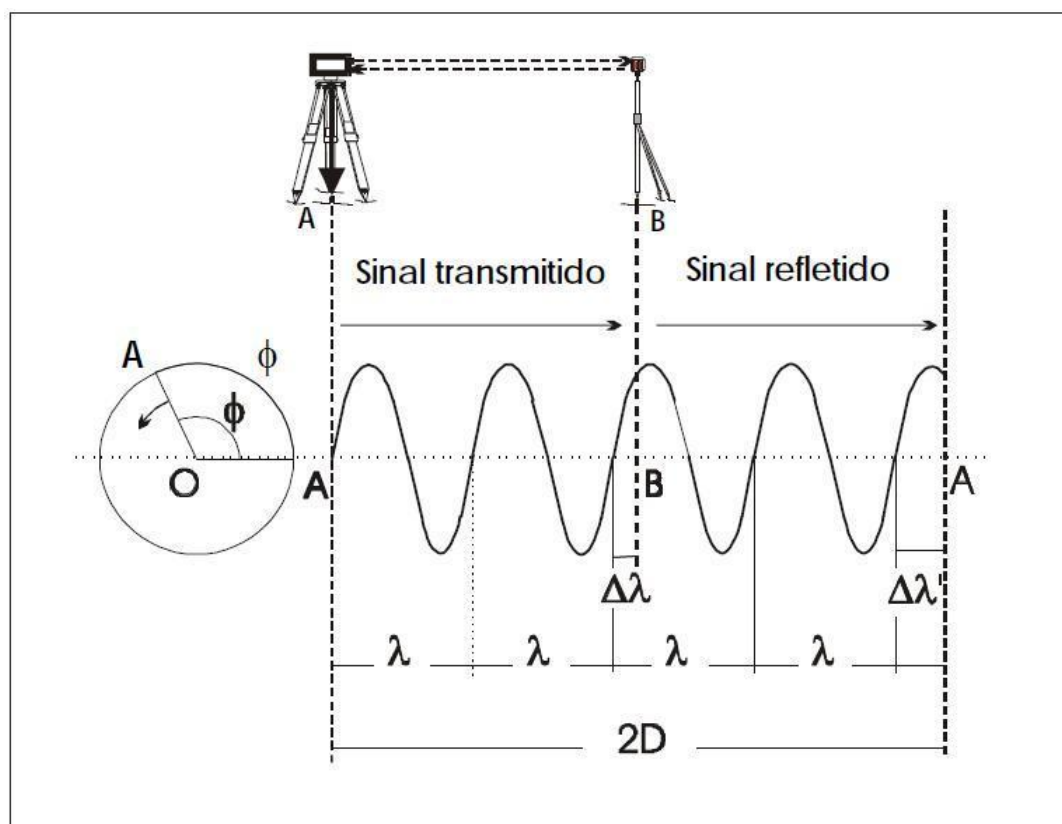


Figura 3 - Determinação da distância por diferença de fase
 FONTE: ADAPTADO DE KENNIE et al, 1993

O próprio instrumento receptor calcula a distância utilizando a equação 1 (para Figura 2) ou a equação 2 (para Figura 3).

$$D = \frac{1}{2}(N\lambda + \Delta\lambda') \quad (1)$$

$$D = N\frac{\lambda}{2} + \frac{\phi}{2\pi}\frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

Onde:

D (m) = Distância Medida;

N = Número de comprimentos de onda inteiros contidos dentro da distância medida;

λ (m) = Comprimento de onda;

$\Delta\lambda$ (m) = Fração do comprimento de onda até o alvo;

ϕ (rad) = $\Delta\lambda'$ (m) = Diferença de fase entre o sinal emitido e o sinal recebido.

Nesse processo, a onda recebida é comparada com uma amostra da onda emitida e a resolução do instrumento depende da precisão dessa medida. Atualmente essas operações são realizadas de forma automática, sendo que sua precisão depende basicamente do processo de comparação, estando sujeita a variações acidentais inerentes ao processo (PACILÉO NETTO, 1990; MARTINI, 2005)

Alguns MEDs podem modular e sobrepor o sinal em três ou mais frequências, como é o caso de alguns modelos de estação total da fabricante TOPCON, que utiliza cinco tipos de frequência: 250MHz, 30MHz, 1.8MHz, 117KHz e 113KHz (TOPCON, 2009).

O processo de medição com cinco frequências ocorre da seguinte forma (TOPCON, 2009):

1 – Uma das cinco frequências é escolhida como sinal de controle pelo processador. É emitida a onda de controle sobreposta e modulada com outra onda restante;

2 – o sinal é refletido pelo objeto;

3 – o receptor óptico processa o sinal recebido. Seu circuito amplifica o sinal e detecta a frequência sobreposta;

4 – pronta a determinação da frequência recebida, esta é convertida em distância e armazenada pelo microcomputador;

5 – os passos 1 a 4 são repetidos até que todas as cinco frequências tenham sido utilizadas como sinal de controle;

6 – a distância final é então calculada e mostrada no visor da estação total.

A seguir um exemplo da sobreposição da frequência de 30MHz, escolhida como sinal de controle, pela frequência de 250MHz (Figura 4):

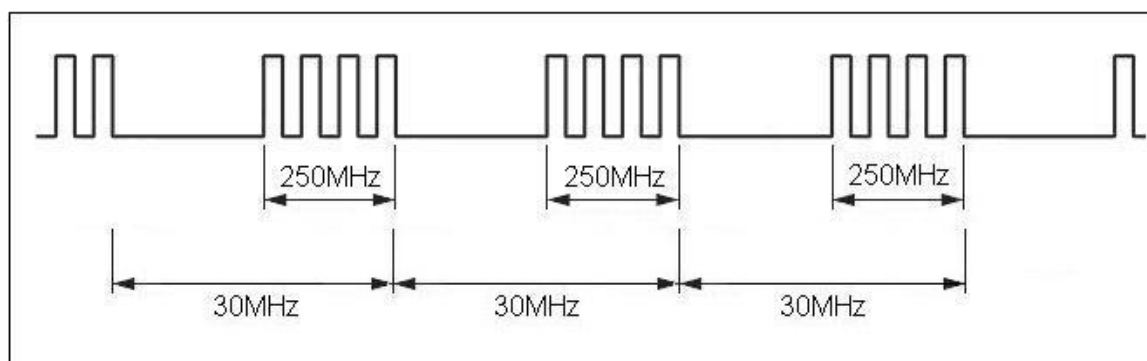


Figura 4 - Sobreposição de frequências
 FONTE – ADAPTADO DE TOPCON (2009)

NOTA:

Considerando que a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética c no vácuo corresponde a aproximadamente 300 000 000 m/s, e que passam determinados números de comprimento de onda por um ponto a cada segundo, então a velocidade de propagação é dada por (OBSERVATÓRIO NACIONAL, 2009):

$$c = f \cdot \lambda \quad (3)$$

onde:

c = velocidade da luz no vácuo;

f = frequência da onda;

λ = comprimento de onda.

Então, frequência e comprimento de onda se relacionam pelas expressões:

$$f = c / \lambda \quad (4)$$

e

$$\lambda = c / f \quad (5)$$

Desta relação, pode-se observar no QUADRO 2, exemplos de valores de frequências e comprimentos de onda. Os valores dos comprimentos de onda foram calculados utilizando-se a equação 5, e assumido o valor da velocidade da luz no vácuo igual a 300 000 000 m/s.

Frequência f (MHz)	Comprimento de onda λ (m)
10	30
20	15
50	6
100	3

QUADRO 2 - FREQUÊNCIA X COMPRIMENTO DE ONDA
FONTE: O autor

2.1.2 Erros na medição eletrônica de distância

Os principais erros instrumentais na medição eletrônica de distância que utilizam infravermelho como portadora são (RÜEGER, 1996; FAGGION, 2001): Constante aditiva (erro de zero), problemas na junção elétrica óptica, multicaminho, falta de homogeneidade na emissão do diodo, fator de escala (erro em frequência), desvio de fase, medida da fase (digital ou analógico), ponto eletrônico ou ponto óptico mal ajustado no telescópio, consequência da potência do sinal, variação da constante do refletor, resolução do valor de entrada em ppm.

Segundo Faggion (2001), normalmente esses erros são determinados por processo de calibração, pelo fabricante ou por órgãos competentes posteriormente. Já os erros não modelados são embutidos na precisão do instrumento. Maiores

informações podem ser encontradas em Rüeger (1996), Miranda (2007) e Landgate (2009).

A precisão nominal de operação dos equipamentos de medição é definida pela norma alemã DIN 18723 e adotada internacionalmente. Baseia-se no desvio padrão nominal. A especificação do procedimento adotado para cálculo do desvio-padrão nominal de um equipamento pode ser encontrada na NBR 13.133/94. Ela é apresentada da seguinte forma: $\pm (A\text{mm} + B\text{ppm})$, onde A é a parte sistemática e independente e B é a parte aleatória, proporcional à distância, expresso em parte por milhão. O erro total (combinação dos erros sistemático e aleatório) é dado por $\sigma_D = \sqrt{(A^2 + B^2 d^2)}$ (CHRZANOWSKI, 1977). Por exemplo, um equipamento cuja precisão é de $\pm (2\text{mm}+2\text{ppm})$ significa que em um processo de medição, o valor encontrado pode ter um erro de $\pm (2\text{mm} \text{ mais } 2\text{mm/km})$.

2.1.2.1 Erro de Zero (ou Constante Aditiva)

Também conhecido como constante aditiva, o erro de zero consiste na diferença de posição entre o centro geométrico do equipamento (materializado pela intersecção dos eixos principal, secundário e de colimação) e o centro eletrônico do equipamento, onde é montado o gerador/receptor do sinal utilizado na medição eletrônica de distância (SMITH; NASCARELLA, 2010). Citados anteriormente, o sistema de eixos é definido como:

- Eixo Principal ou vertical: eixo no qual o equipamento descreve a rotação horizontal (KAHMEN e FAIG, 1988);
- Eixo Secundário ou horizontal: eixo perpendicular ao eixo principal, no qual se bascula a luneta (KAHMEN e FAIG, 1988);
- Eixo de Colimação ou linha de visada: este eixo deve ser perpendicular ao eixo secundário e coincidente com o eixo central da luneta.

Inicialmente sua determinação é feita e incorporada ao instrumento pelo próprio fabricante, porém seu valor deve ser determinado periodicamente, pois varia

com batidas e envelhecimento do equipamento. Trata-se de uma constante algébrica que deve ser aplicada diretamente a cada observação (GRIPP, 1986; PACILÉO NETTO, 1990; LANDGATE, 2009).

Segundo Martini (2005), é possível realizar sua determinação de forma simplificada, utilizando três distâncias observadas, conforme pode ser visto na Figura 5 e adotando a formulação a seguir:

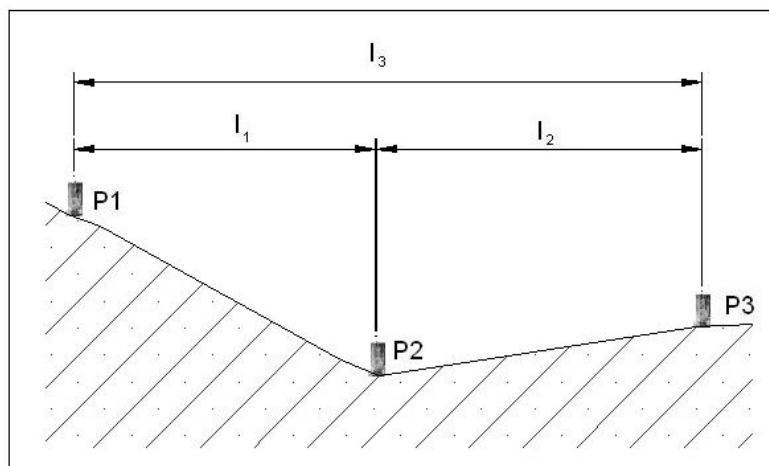


Figura 5 - Determinação do erro de zero de forma simplificada
FONTE: O autor

$$l_i = d_i + Z_0 \quad (6)$$

com $i = 1$ a 3 .

Onde:

l_i = Distância Real;

d_i = Distância medida;

Z_0 = Erro de Zero

Daí tem-se:

$$(d_3 + Z_0) = (d_1 + Z_0) + (d_2 + Z_0) \quad (7)$$

$$Z_0 - 2Z_0 = -d_3 + d_1 + d_2 \quad (8)$$

$$-Z_0 = -d_3 + d_1 + d_2 \quad (9)$$

Multiplicando a equação 9 por (-1):

$$Z_0 = d_3 - d_1 - d_2 \quad (10)$$

A seguir apresenta-se um exemplo para determinação do erro de zero (Figura 6). Os valores utilizados são as distâncias entre os pilares P1, P2 e P3 da base de calibração da UFPR (a ser descrita posteriormente na seção 3.1.1), medidas utilizando a estação total TC 2003 da marca Leica, cujas observações originaram a escala da base utilizada neste trabalho.

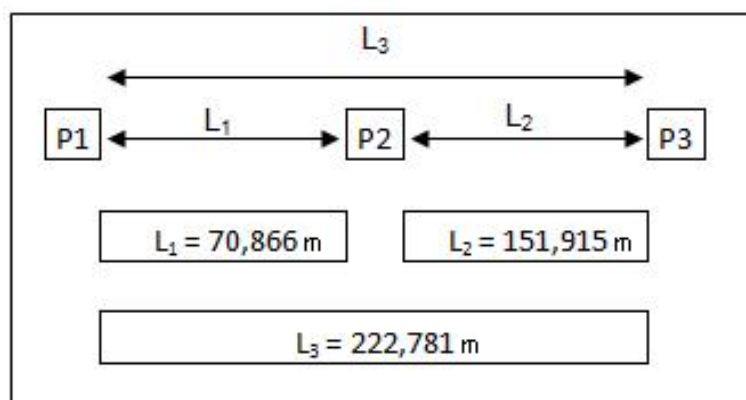


Figura 6 - Determinação do Erro de Zero
FONTE: O autor

Utilizando a equação 10, tem-se o seguinte resultado:

$$Z_0 = 222,781 - 70,866 - 151,915 = 0\text{m}$$

Portanto, verifica-se que a estação total TC 2003 apresenta o Erro de Zero igual a 0m. Cabe salientar que as distâncias envolvidas neste processo devem ser as horizontais. Também é importante estar atento ao tipo de prisma utilizado no momento da coleta desses dados, sempre dando atenção se há necessidade do uso de alguma constante aditiva.

2.1.2.2 Fator de Escala

O fator de escala é causado pela diferença entre frequência nominal do equipamento (determinada em fábrica) e a frequência que ele emite no momento da realização da medida. A maior causa da sua ocorrência é a variação da temperatura

e desgaste do cristal oscilador. Tal diferença pode ser determinada no processo de calibração (FAGGION, 2001).

Existem compensadores de temperatura em quase toda a totalidade dos MEDs de curta distância que garantem uma precisão de 1 ppm para temperaturas entre 0° e +50°C e uma precisão de 3 ppm quando trabalham com temperaturas entre -20° e +50°C. Essa compensação é possível utilizando-se um circuito com capacitores transmissores e/ou resistores sensíveis à temperatura (RÜEGER, 1996).

Outros efeitos externos que agem no fator de escala são mostrados por Faggion (2001):

- Utilização de valor incorreto para velocidade da luz;
- Erros na determinação da correção da primeira velocidade¹;
- Erro na medida da temperatura e pressão atmosférica;
- Reduções geométricas incorretas;
- Omissão da correção da umidade.

Considerando que os erros de frequência ocorrem principalmente por desgaste do cristal modulador do sinal de medida provocando um acréscimo de até 1 ppm por ano de uso, dependendo do tipo de compensador utilizado, e também que os erros influenciados pela temperatura podem ser muito significativos, é necessário que periodicamente seja realizada uma calibração da frequência dos instrumentos (FAGGION, 2001).

¹ Primeira Velocidade segundo BARNES (2007) é a velocidade da onda determinada no momento que o instrumento é construído, com um índice de refração atmosférico específico para valores padrão de umidade, temperatura e pressão. Para cada variação de pressão de 3,5 mbar e de temperatura de 1 °C em relação aos valores padrão, acarreta um erro de 1ppm às distâncias.

2.1.2.3 Erro Cíclico

O Erro Cíclico está relacionado com a medição interna da fase do sinal e é causado por um salto de fase no momento do envio e recepção do sinal. Este erro ocorre apenas em equipamentos que utilizam comparador de fase para determinar o tempo de deslocamento entre o envio, reflexão e retorno do sinal na medida da distância (GRIPP, 1986; PACILÉO NETTO, 1990; FAGGION, 2001).

Seu comportamento pode ser representado por uma função senoidal, e seu comprimento de onda é igual a unidade de comprimento² do MED. Nos equipamentos modernos, é geralmente inferior a 2mm (ACT, 2009).

Os fabricantes alegam que as componentes do erro cíclico nos equipamentos atuais são desprezíveis. Tal fato foi comprovado com a calibração realizada na Austrália, por Brown *et al* (1998), no qual o erro cíclico é obtido de forma bastante rigorosa, pois, além de variar as distâncias com o prisma ocupando os pilares da base linear (Figura 7), a estação total também tem sua posição alterada, pois se encontra instalada sobre trilhos de um interferômetro (Figura 8), o qual determina tais deslocamentos com precisão sub-milimétrica.

² Unidade de comprimento é a escala em que o MED realiza a medida da distância. Varia em função da frequência de medição do MED (ACT, 2009).

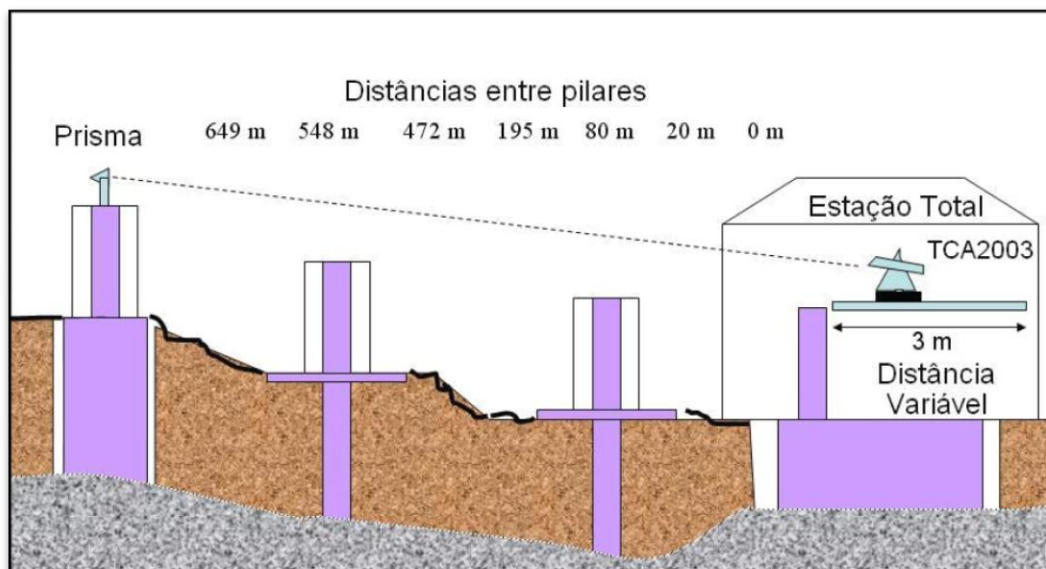


Figura 7 - Esquema da base de calibração de NML, Austrália
 FONTE: ADAPTADO DE BROWN et al (1998)

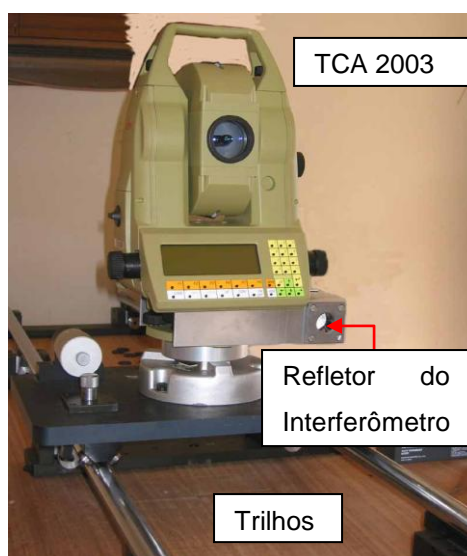


Figura 8 - Estação Total sobre os trilhos do interferômetro
 FONTE: ADAPTADO DE BROWN et al (1998)

Na Figura 9 é apresentado um gráfico com os valores do erro cíclico em função de frações de comprimento de onda. As duas linhas representam os pilares 4 e 7, ocupados pelo prisma no momento da calibração, cujas distâncias em relação a origem da base são de 195 e 649 metros, respectivamente. Nota-se que mesmo

levando em conta o desvio-padrão de cada valor, este não passa de $\pm 0,2$ milímetros. A estação total utilizada foi uma Leica TCA 2003.

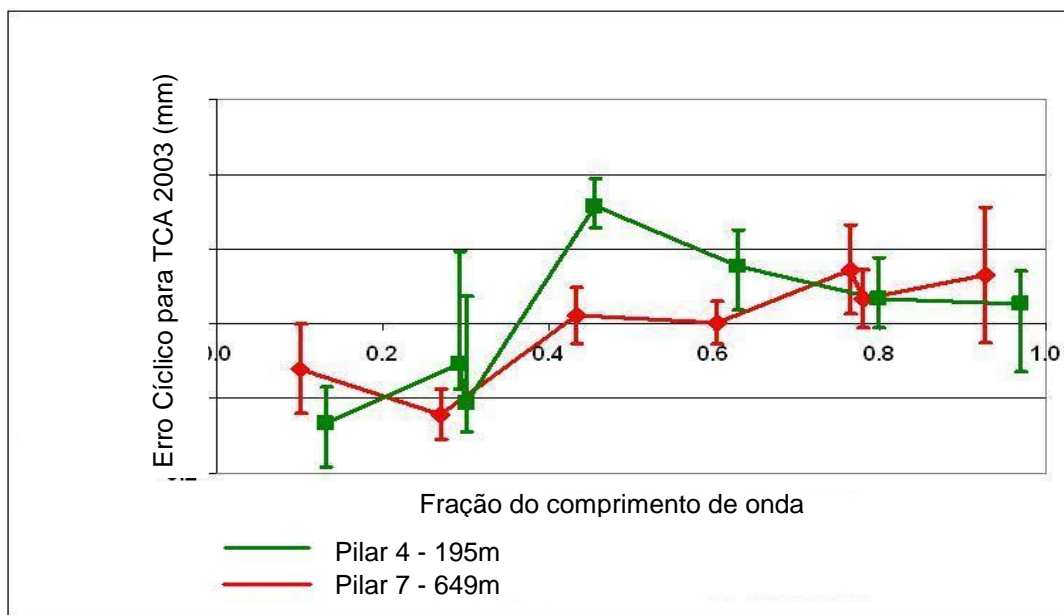


Figura 9 - Gráfico com os valores do erro cíclico
 FONTE: ADAPTADO DE BROWN et al (1998)

Em contrapartida, estudos realizados por vários pesquisadores indicam a existência desse erro com o passar do tempo e o envelhecimento dos equipamentos (RÜEGER, 1996; ACT, 2009).

2.2 BASE PARA CALIBRAÇÃO EM CAMPO

Para uma calibração precisa no que diz respeito ao erro de zero, é necessário um número superabundante de observações ou um número de graus de liberdade maior que zero para realizar o ajustamento envolvido no processo.

Rüeger (1977) propôs para calibração de MEDs produzidos naquela época, três tipos de bases que podem ser construídas para calibração em campo:

- Radial (Figura 10);
- Linear (Figura 11);
- Em Rede (Figura 12).

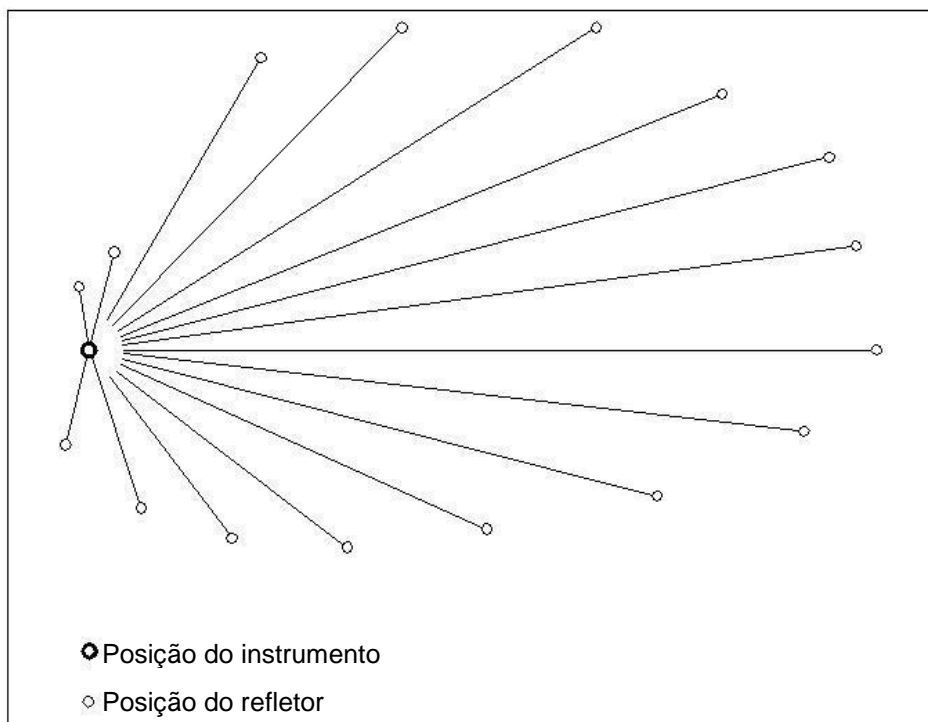


Figura 10 - Base Radial
FONTE: ADAPTADO DE RÜEGER, 1977



Figura 11 – Base Linear de Tai Po, China
FONTE: ESCRITÓRIO DE LEVANTAMENTO E MAPEAMENTO DE HONG KONG (2009)

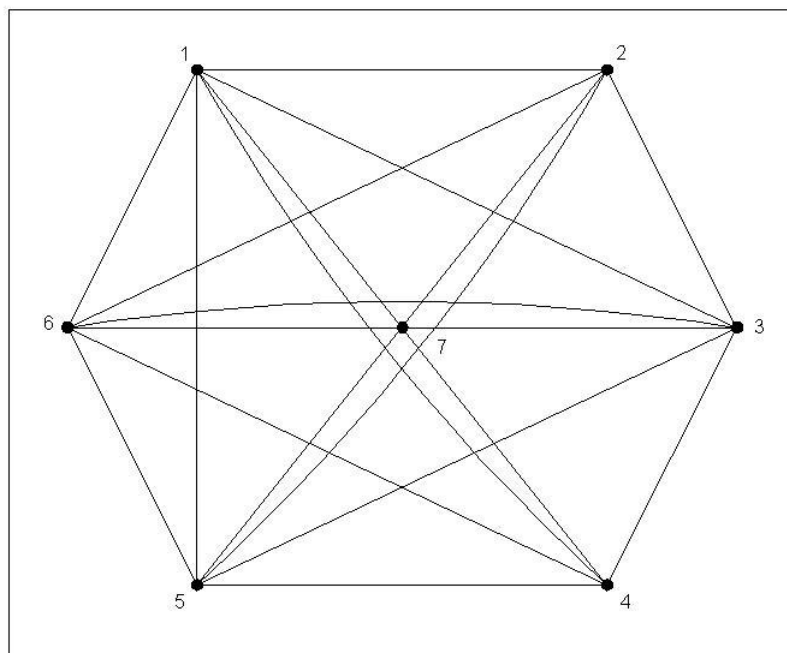


Figura 12 – Base configurada como rede
FONTE: ADAPTADO DE RÜEGER, 1977

Comparando as três, Rüeger (1977) aponta a base linear como a mais vantajosa, pelos seguintes motivos:

- Baixo custo de instalação;
- Poucas estações geram muitas observações;
- Por ser linear, necessita de uma área relativamente pequena;
- Alta precisão na determinação do erro de zero;

A configuração radial, como observado na Figura 10, ocupa pouco espaço, mas devido ao grande trabalho para determinar a posição dos pilares, é aconselhada para ser construída em ambientes fechados, para controle da construção de MEDs. Já a configuração de rede (Figura 12) requer um espaço muito grande e gera menos graus de liberdade no momento do ajustamento para a determinação dos elementos de calibração. Por estes motivos deve ser utilizada somente para testes com pequenas séries de medidas (RÜEGER, 1977).

Existem no Brasil algumas bases lineares multipilares em locais como, por exemplo, USP e UFPR, cujo espaçamento entre os pilares foi determinado conforme descrito por Rüeger (1977) na sequência:

- Inicialmente é determinado o parâmetro E, que é a unidade da base. Este parâmetro é inicial para o cálculo do espaçamento entre os pilares. Por definição, seu valor deve ser igual a meio comprimento de onda da moduladora do MED ou múltiplo deste valor.

- Determina-se o parâmetro A, que corresponderá à menor distância entre os pilares e é igual ou múltiplo de E;

- O parâmetro C_0 é o comprimento máximo disponível para a base desejada.

Segue-se então com o cálculo de B_0 em função de A e C_0 (RÜEGER, 1977):

$$\text{Base com 6 estações: } B_0 = \frac{1}{10}(C_0 - 5A) \quad (11)$$

$$\text{Base com 7 estações: } B_0 = \frac{1}{15}(C_0 - 6A) \quad (12)$$

$$\text{Base com 8 estações: } B_0 = \frac{1}{21}(C_0 - 7A) \quad (13)$$

Calculado B_0 , seu valor é arredondado ao múltiplo mais próximo de E para obter o valor de B, que por ser tratar de um parâmetro, é adimensional. Os comprimentos das seções da base linear podem ser calculados de acordo com o quadro a seguir (QUADRO 3), onde C é o comprimento final da base linear (múltiplo de E).

Seção	6 estações	7 estações	8 estações
1 ^a	A+B	A+B	A+B
2 ^a	A+3B	A+3B	A+3B
3 ^a	A+4B	A+5B	A+5B
4 ^a	A+2B	A+4B	A+6B
5 ^a	A	A+2B	A+4B
6 ^a	-	A	A+2B
7 ^a	-	-	A
C	5A+10B	6A+15B	7A+21B

QUADRO 3 - COMPRIMENTO DAS SEÇÕES DA BASE LINEAR
FONTE: RÜEGER, 1977

Uma boa distribuição das distâncias sobre a extensão da base linear é obtida se B for escolhido para ser o dobro do valor de A. Além disso, A não deve ser igual ou múltiplo de B, para evitar que certas distâncias ocorram mais de uma vez.

Cabe salientar que a formulação apresentada refere-se a uma base linear com comprimento conhecido (escala da base). Caso seu comprimento seja desconhecido, é necessário utilizar outras fórmulas e considerar que não será possível a determinação do fator de escala do equipamento.

A base que será utilizada neste trabalho é a base linear da Universidade Federal do Paraná que possui 7 estações. A seção 3.1.1 apresentará uma descrição mais detalhada desta base, bem como os cálculos para determinação das suas distâncias.

3 METODOLOGIA

3.1 CALIBRAÇÃO COM OBSERVAÇÕES DE CAMPO

Será utilizada neste trabalho a metodologia de calibração em campo proposta por Rüeger (1996) e aplicada por Faggion (2001), que possibilita a obtenção dos três elementos de calibração já citados anteriormente: Fator de escala, erro de zero e erro cíclico.

3.1.1 Descrição da Base de Calibração da UFPR

A escolha do local para implantação de uma base linear de calibração deve ser feita de maneira a respeitar alguns critérios, citados por autores como Rüeger (1977), Paciléo Netto (1990) e Faggion (1999), e mostrados a seguir:

- 1 – O terreno deve ser plano ou ligeiramente côncavo, para possibilitar a intervisibilidade entre os pilares;
- 2 – A insolação da base deve ser a mesma em todos os pilares ao longo do dia;
- 3 – Deve estar orientada no sentido Norte-Sul, para permitir leituras com ou sem Sol, durante o dia ou a noite;
- 4 – A vegetação deve ser rasteira ou de pequeno porte;
- 5 – Não deve haver acesso ao público ou este deve ser controlado, a fim de evitar ações de vandalismo;
- 6 – Localização de fácil acesso;
- 7 – Preferencialmente estar margeada por uma via para facilitar o transporte dos refletores e outros equipamentos;

8 – O proprietário do local deve estar disposto a colaborar totalmente, para que seja possível a utilização sempre que houver necessidade.

O local escolhido, em meados dos anos 80, para a implantação da base foi a fazenda experimental da UFPR, Fazenda Canguiri, localizada na região metropolitana de Curitiba, e que atende aos critérios numerados anteriormente (Figura 13). Algumas das primeiras medições desta base foram realizadas por Gripp em 1986, utilizando o distanciômetro Elta 2, da Zeiss e o telurômetro MA100. O distanciômetro Elta 2 tinha o comprimento de onda de 20m (frequência igual a 15MHz) e precisão nominal de $\pm (5\text{mm} + 2\text{ppm})$. O telurômetro MA100 tinha precisão nominal de $\pm (1,5\text{mm} + 2\text{ppm})$, mas o valor de seu comprimento de onda não foi informado (GRIPP, 1986).

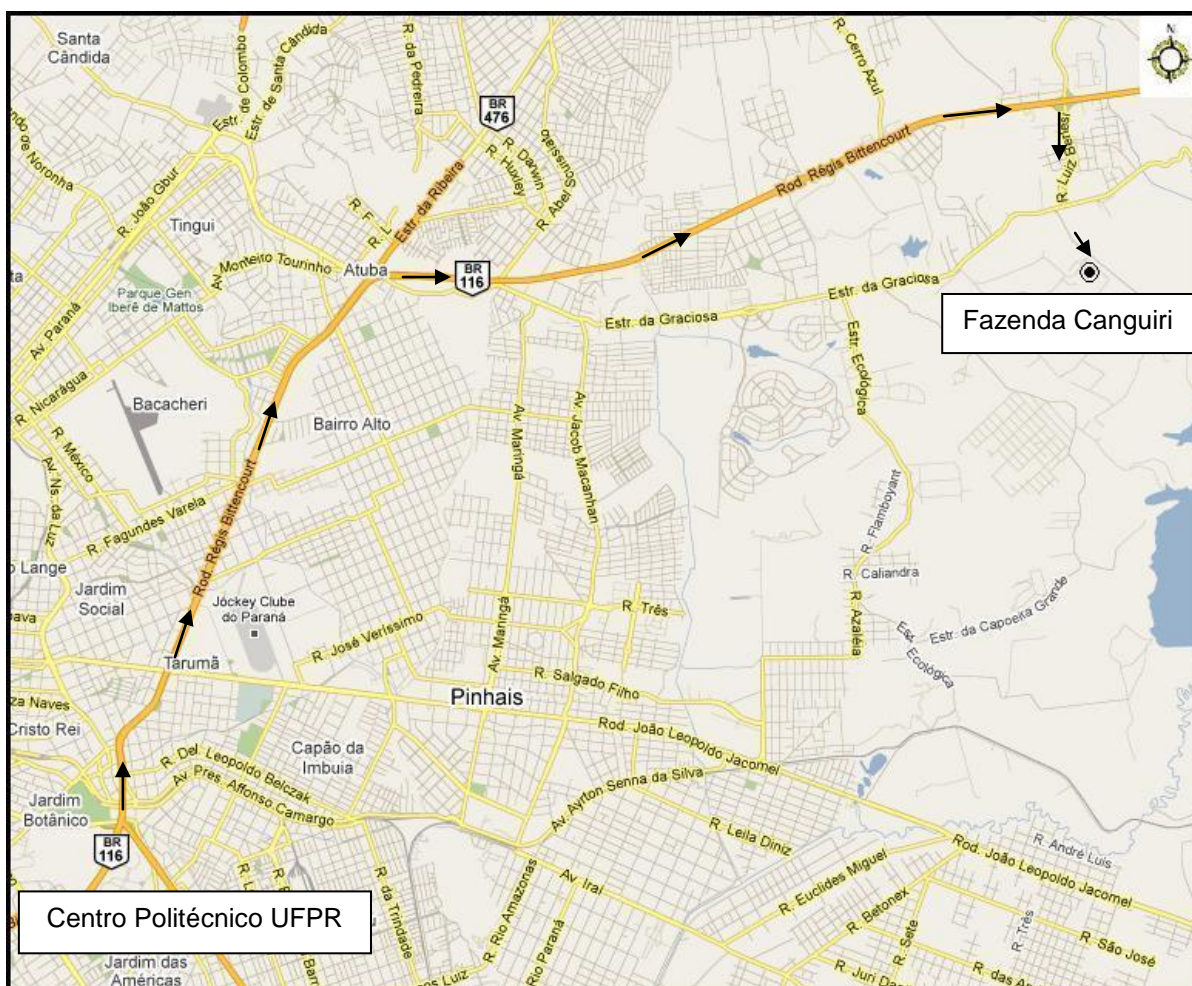


Figura 13 – Localização da Base Linear de Calibração
FONTE: ADAPTADO DE Google maps

A seguir podem-se observar os cálculos para determinação de tal espaçamento:

Inicialmente determinou-se o menor espaçamento entre os pilares (parâmetro A, de valor igual ou múltiplo de meio comprimento de onda disponível) como 30m. O comprimento total desejado da base C_0 , foi definido como 800m. Então, aplicando esses parâmetros na equação 12, tem-se o seguinte resultado:

$$B_0 = \frac{1}{15}(C_0 - 6A) = \frac{1}{15}(800 - 6 \times 30) = 41,3333$$

Arredondando então o valor de B_0 para um valor múltiplo de meio comprimento de onda dos moduladores utilizados na época da implantação da base, tem-se $B = 40$.

Aplicando os valores de A e B no quadro a seguir, chega-se então aos valores procurados para o espaçamento entre os pilares (QUADRO 4):

Seção	Pilares	7 estações	Distâncias (m)
1ª	P1 - P2	A+B	30+40 = 70
2ª	P2 - P3	A+3B	30+120 = 150
3ª	P3 - P4	A+5B	30+200 = 230
4ª	P4 - P5	A+4B	30+160 = 190
5ª	P5 - P6	A+2B	30+80 = 110
6ª	P6 - P7	A	30
C	Comprimento Final	6A+15B	180+600 = 780

QUADRO 4 - CÁLCULO DO ESPAÇAMENTO ENTRE OS PILARES
FONTE: ADAPTADO DE RÜEGER (1977)

Na Figura 15, pode-se observar a configuração calculada dos pilares 1 a 7. A posição em que o pilar P4 (calculado) deveria ser construído está localizada em um córrego (Figura 14), por este motivo ele foi deslocado para um local alternativo causando uma mudança no espaçamento calculado. Apesar desta modificação, a combinação das distâncias não afetou a determinação dos elementos de calibração,

pois continuou a atender a recomendação de cobrir meio comprimento de onda ou seus múltiplos. O local onde o pilar P4 foi construído está indicado na Figura 15.



Figura 14 - Detalhe do córrego na posição calculada de P4

FONTE: O autor



Figura 15 – Configuração dos pilares para os valores calculados

FONTE: GOOGLE EARTH

Em levantamento, descrito por Faggion (2001) com uma estação total Wild TC 2002, cuja precisão angular é de 0,5" e linear de \pm (1mm + 1ppm), foram determinadas as distâncias da base da Fazenda Canguiri. No QUADRO 5 é possível observar as distâncias calculadas e as distâncias medidas, bem como seus desvios padrões. Os dados utilizados por FAGGION (2001) para determinação da base de calibração foram coletados em campanhas entre os meses de maio/2000 e julho/2001.

Seção	Distância Calculada (m)	Distância Medida (m)	Desvio Padrão (mm)
P1 – P2	70	70.8725	0,62
P2 – P3	150	151.9268	0,66
P3 – P4	230	163.0611	0,67
P4 – P5	190	262.4095	0,73
P5 – P6	110	111.4317	0,64
P6 – P7	30	30.2328	0,59
Distância Total (P1-P7)	780	789.9196	1,03

QUADRO 5 - DISTÂNCIAS DOS PILARES DA BASE DA UFPR
 FONTE: ADAPTADO DE FAGGION, 2001

Utilizando a Equação 12 e o QUADRO 3, verifica-se que a configuração atende as frequências de aproximadamente 100 MHz dos equipamentos atuais, que têm valores da unidade de medida múltiplos da unidade da base.

3.1.2 Determinação da escala da base

Inicialmente será determinada a escala da base, que é a distância precisa entre todos os pilares, pois sem esses valores determinados com precisão melhor que a do equipamento a ser calibrado, não é possível a determinação do fator de escala.

Esta escala será determinada com a utilização da estação total Leica TC 2003, com precisão linear de \pm (1mm + 1ppm) e angular de 0,5". Por se tratar de um

equipamento de alta precisão, será utilizada como padrão de referência³. Apesar de definida e descrita em Faggion (2001), será refeita sua determinação, bem como novo nivelamento, pois a centragem forçada de alguns pilares apresentou sinais de avaria. Um exemplo pode ser visto na Figura 16.



Figura 16 - Avaria na base do pilar P5
FONTE: O autor

Durante a realização deste trabalho, foi realizada uma reforma em todos os pilares. O mesmo pilar P5 visto na figura anterior, pode agora ser observado após sua recuperação (Figura 17).



Figura 17 - Pilar P5 após recuperação
FONTE: O autor

³ Padrão geralmente tendo a mais alta qualidade metrológica disponível em um dado local ou em uma dada organização, a partir do qual as medições lá executadas são derivadas (SISMETRA, 2010). Neste caso, os outros equipamentos calibrados possuem precisão linear inferior.

Para o ajustamento das distâncias, as observações devem ser superabundantes, gerando a partir de 7 pilares o número total de 21 observações (Figura 18).

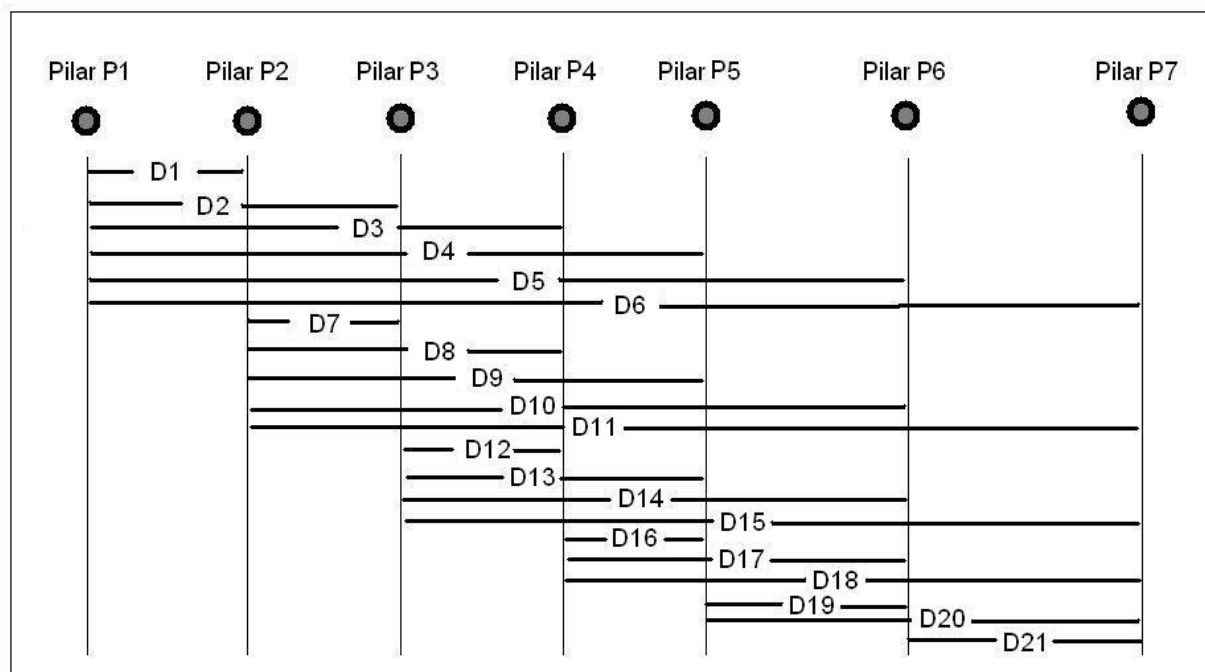


Figura 18 – Superabundância de medidas
 FONTE: ADAPTADO DE FAGGION, 2001

onde:

D_n = número da observação (distância) medida.

$n = 1$ até 21.

No caso da configuração de pilares existente (7 pilares) forma-se um sistema a ser resolvido com 21 equações e 6 incógnitas (distâncias entre os pilares).

Pelo fato de que os pilares encontram-se em desnível para possibilitar a intervisibilidade, deve ser feita a horizontalização das distâncias. Isto é possível utilizando o valor dos desníveis entre cada pilar e a respectiva distância inclinada.

3.1.3 Determinação do fator de escala e erro de zero

Seguindo a metodologia utilizada por Faggion (2001), descreve-se a formulação matemática para determinação do fator de escala e erro de zero. Cabe salientar que tal formulação será também utilizada em fase posterior para determinação dos elementos do erro cíclico.

$$Dp_{ij} - do_{ij} = V_{ij} + m \cdot do_{ij} + Z_0 \quad (17)$$

sendo:

$i = 1, 2, \dots, 6$ e $j = 2, 3, \dots, 7$ para $i > j$ e $i \neq j$.

onde:

m = Fator de escala

do_{ij} = Distancias medidas com equipamento que será calibrado;

Z_0 = Erro de zero;

Dp_{ij} = Escala da base⁴;

V_{ij} = Resíduos.

Aplicando os valores de $i=1$ e $j=2$ na equação 17 chega-se à seguinte fórmula para o primeiro intervalo (FAGGION, 2001):

$$Dp_{12} - do_{12} = V_{12} + m \cdot do_{12} + Z_0 \quad (18)$$

⁴ Trata-se por escala da base as distâncias entre cada pilar.

Os valores desta primeira etapa são encontrados resolvendo o sistema de equações pelo método paramétrico. Porém, havendo necessidade de revisá-lo, pode-se ter acesso ao seu desenvolvimento em Gemael (1994).

Depois de encontrados os valores do fator de escala e erro de zero, estes são aplicados na equação 17 e calcula-se novamente, agora comparando as distâncias medidas com as distâncias determinadas como padrão. Desse cálculo, também realizado pelo método paramétrico, é gerada nova matriz de resíduos V , na qual estão contidos somente os erros aleatórios e elementos do erro cíclico.

3.1.4 Determinação das componentes do erro cíclico

Segundo Paciléo Netto (1990), os elementos do erro cíclico podem ser obtidos conforme descrição a seguir (Figura 19):

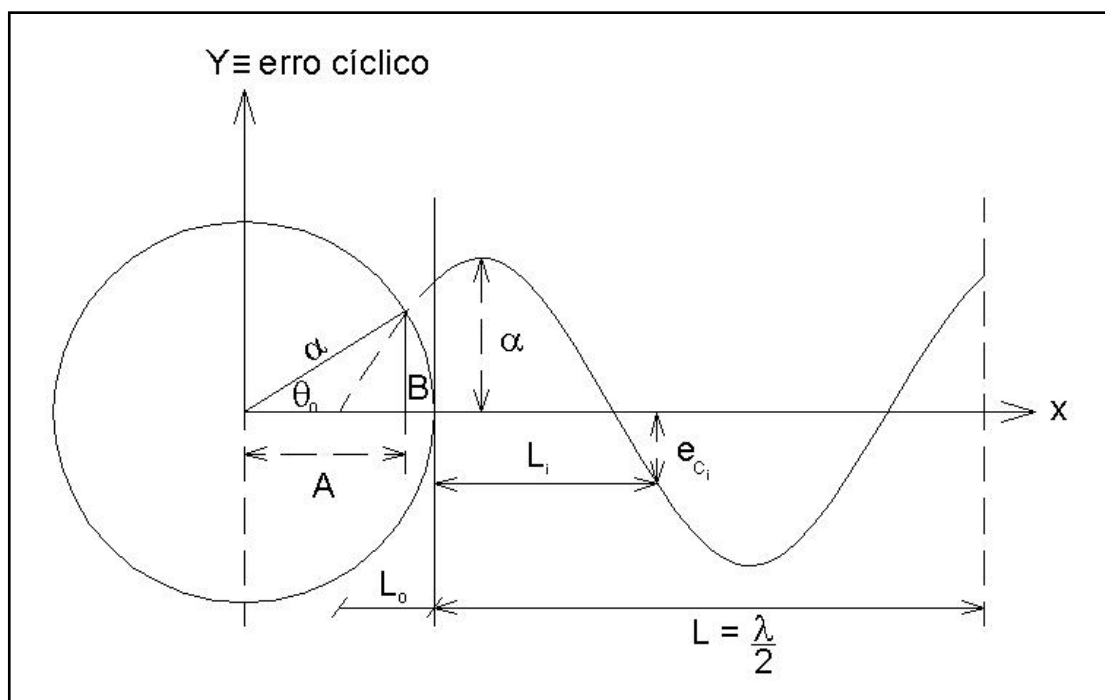


Figura 19 - Erro cíclico em função da distância
 FONTE: ADAPTADO DE PACILÉO NETTO (1990)

onde:

$\alpha = A =$ amplitude do erro cíclico;

$B =$ Ângulo de fase inicial;

$\theta =$ ângulo de fase ou diferença de fase correspondente a uma distância L_i ;

$\theta_0 =$ diferença de fase correspondente a distância L_0 ;

$ec_{ij} =$ Erro cíclico relativo a distância i ;

$L = \lambda' = \lambda/2 =$ meio comprimento de onda de modulação;

Para realizar a determinação das componentes do erro cíclico, utiliza-se outro modelo matemático citado por vários autores e também utilizado por Faggion (2001). A porção W (erros aleatórios) da equação (19) não é definida neste processo de calibração, por isso não é considerada nos cálculos.

$$Ec_{ij} = V_{ij} + W_{ij} = A \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi}{\lambda' (Dp_{ij} + B)} \right) \quad (19)$$

$$Ec_{ij} = V_i = A \cdot \text{sen} \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda'} \right) \cdot Dp_{ij} + \left(\frac{2\pi}{\lambda'} \right) \cdot B \right] \quad (20)$$

$$\theta = \left(\frac{2\pi}{\lambda'} \right) \cdot B \quad (21)$$

$$\theta_0 = \left(\frac{2\pi}{\lambda'} \right) \cdot Dp_{ij} \quad (22)$$

$$Ec_{ij} \cdot A \cdot \text{sen}(\theta + \theta_0) = A \cdot \text{sen}\theta \cdot \cos\theta_0 + A \cdot \cos\theta \cdot \text{sen}\theta_0 \quad (23)$$

$$Ec_{ij} = \text{sen}\theta \cdot A \cdot \cos\theta_0 + \cos\theta \cdot A \cdot \text{sen}\theta_0 \quad (24)$$

Onde:

$Dp_{ij} =$ Distância conhecida (escala da base)

Linearizando o modelo representado pela equação 24 tem-se:

$$E_i = P_i X + Q_i Y \quad (25)$$

Onde:

$$P_i = \text{sen}(\theta);$$

$$Q_i = \text{cos}(\theta);$$

$$X = A.\text{cos}(\theta_i);$$

$$Y = A.\text{sen}(\theta_i).$$

A amplitude do erro cíclico, em milímetros, é dada por:

$$A^2 = X^2 + Y^2 \quad (26)$$

e o ângulo de fase do erro cíclico, em radianos, é dado por:

$$B = \theta = \text{arc tan} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (27)$$

3.2 CALIBRAÇÃO COM OBSERVAÇÕES EM LABORATÓRIO

O Laboratório de Instrumentação Geodésica da UFPR, LAIG, será utilizado para calibração dos mesmos instrumentos calibrados em campo por possuir os equipamentos adequados para determinação dos deslocamentos (interferômetro) e para medição da frequência de operação dos MEDs (frequencímetro e sensor). Também um sistema de ar condicionado, indispensável para o controle rigoroso das condições do ambiente, conforme indicado em metodologia proposta por Faggion (2001) e Rüeger (1996).

3.2.1 Determinação do fator de escala

Para o desenvolvimento deste trabalho foi adquirido um frequencímetro com resolução na ordem do décimo do hertz e capacidade para medir frequências de até

250 MHz. Está disponível no laboratório um detector para captar o sinal de medida e permitir a medida da frequência.

Antes de iniciar qualquer procedimento de calibração, o laboratório deve estar climatizado conforme recomendação da normatização em temperatura constante de 20 °C (FAGGION, 2001). O MED a ser calibrado deve estar ligado por cerca de 60 minutos para que o mesmo atinja a temperatura de equilíbrio com o ambiente.

Utilizando um frequencímetro e um sensor de frequência realiza-se a determinação da frequência de operação do instrumento. O sensor de frequência, conectado ao frequencímetro, é posicionado de tal forma a captar o sinal emitido pelo MED, possibilitando assim a leitura do valor da frequência no visor do frequencímetro. Alguns modelos de equipamentos já possuem um medidor interno de frequência, sendo possível verificar seu valor acessando a respectiva função.

De posse do valor da frequência de operação e da frequência nominal do equipamento, aquela informada pelo fabricante, aplica-se a equação 28 e determina-se o valor da correção da variação da frequência em ppm. Então, com a equação 29 é possível corrigir a distância medida pelo equipamento do efeito da variação da frequência (FAGGION, 2001).

$$C = \frac{(f_n - f_m)}{f_m} \quad (28)$$

$$d_c = d_m + Cd_m \quad (29)$$

Onde:

C = Correção em ppm;

f_n = Frequência nominal;

f_m = Frequência de operação medida;

d_c = Distância corrigida do erro de escala;

d_m = Distância medida.

3.2.2 Determinação das componentes do erro cíclico

Para a determinação das componentes do erro cíclico em laboratório, medem-se deslocamentos com o instrumento a ser calibrado e com instrumento de precisão (PACILÉO NETTO, 1990; RÜEGER, 1996; FAGGION, 2001). Neste trabalho, o instrumento de precisão utilizado será o Interferômetro Laser, montado no LAIG, sobre trilhos de aproximadamente 4,2 metros de comprimento. Os deslocamentos medidos devem estar ao longo de uma distância igual a meio comprimento de onda da onda moduladora, e dividido de tal forma que seja suficiente para gerar uma população normal de resíduos (PACILÉO NETTO, 1990). Com base nisto, foi definido que o deslocamento total a ser medido deve ser de 1,5 m, porque os equipamentos que utilizam frequência de 100 MHz têm comprimento de onda igual a 3 m (conforme mostrado no QUADRO 2). Visando gerar a população normal de resíduos, definiu-se que o deslocamento total deveria ser dividido em 20 trechos, o que resulta em medidas de 75 mm.

Como esses deslocamentos devem ser medidos a partir de uma distância inicial⁵ de 100m, foi utilizado um sistema de espelhos, dispostos no corredor de acesso ao laboratório e no seu interior, permitindo medir distâncias acima de 100m. Para maior detalhamento deste sistema recomenda-se Faggion (2001).

É possível observar algumas situações deste procedimento na Figura 20. Inicialmente utiliza-se um suporte para instalação de um espelho (Figura 20-A). Então, este suporte é fixado em pontos determinados que possibilitam sua intervisibilidade (Figura 20-B e C). Com o equipamento instalado na base e visando o espelho 1 (Figura 20-D), realiza-se a orientação de todos os espelhos a fim de conseguir visada ao prisma (Figura 20-F). Na Figura 20-E observa-se a orientação do espelho 4.

⁵ O valor do erro cíclico é inversamente proporcional à intensidade do sinal refletido, assim, seus efeitos serão maximizados com o aumento da distância medida (KHALIL, 2005). Para distâncias menores que 100m, seu efeito pode ser desconsiderado.

Em seguida (Figura 21), nota-se o prisma sobre a base móvel do interferômetro. Tal base será deslocada sobre os trilhos juntamente com o prisma e estacionada em intervalos determinados anteriormente.

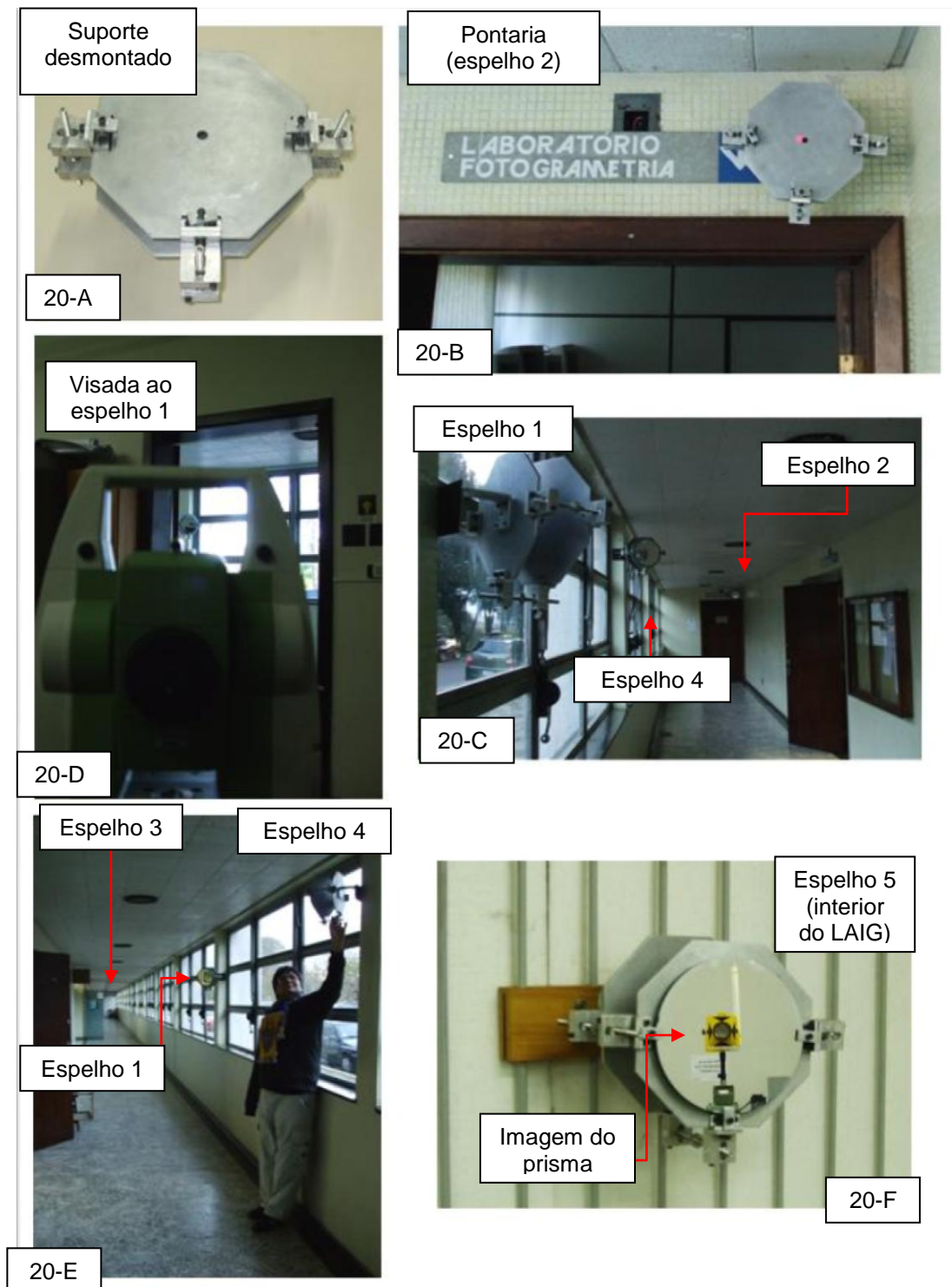


Figura 20 - Montagem dos espelhos
 FONTE: O autor



Figura 21 - Prisma sobre base móvel do interferômetro
FONTE: O autor

O sentido de deslocamento utilizado foi o de afastamento do interferômetro, conforme representado pelas posições A e B na Figura 22. Tais deslocamentos serão utilizados na determinação dos elementos do erro cíclico.

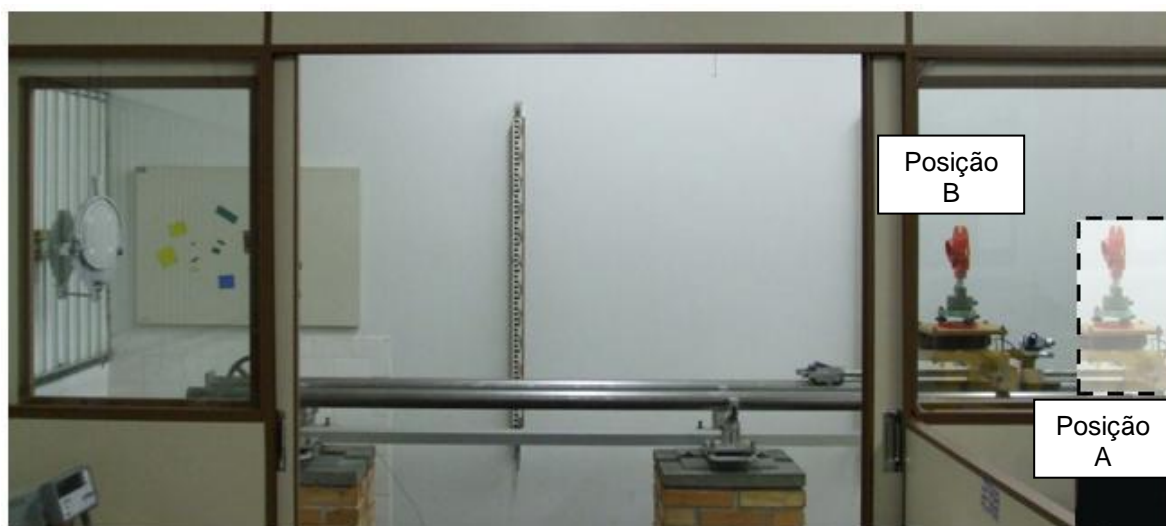


Figura 22 - Deslocamento do prisma
FONTE: O autor

Depois de corrigidas as distâncias em relação ao não horizontalismo dos trilhos do interferômetro, tratado no item 3.2.2.1, utiliza-se a formulação matemática citada por Gripp (1986), Paciléo Netto (1990), Cordini (1991), Rüeger (1996), Faggion (2001) entre outros:

$$D_i = D_0 + d_i + E_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (30)$$

Onde:

d_i = Deslocamento do refletor medido com o interferômetro;

D_i = Distâncias obtidas com o instrumento a ser calibrado;

n = Número de posições ocupadas pelo instrumento que está sendo calibrado;

D_0 = Distância medida com o MED na origem do sistema. Neste ponto não existe deslocamento registrado pelo interferômetro;

E_i = Erro cíclico correspondente a distância D_i .

Para a obtenção da equação final do cálculo dos elementos do erro cíclico, substitui-se a equação 19 na equação 30.

$$D_i = D_0 + d_i + A \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi d_{ij}}{\lambda'} \right) + \left(\frac{4\pi l_0}{\lambda'} \right) \quad (31)$$

Aplicando transformações, de forma semelhante a apresentada no item 3.1.4, ao modelo acima, chega-se à seguinte equação:

$$E_i = P_i X + Q_i Y \quad (32)$$

Considerando estas transformações, a equação (30) toma a seguinte configuração:

$$D_i = D_0 + d_i + P_i X + Q_i Y \quad (33)$$

Os parâmetros X e Y são determinados pelo método paramétrico e os elementos do erro cíclico são obtidos aplicando os valores de X e Y nas equações 26 e 27.

3.2.2.1 Nivelamento dos trilhos do Interferômetro

O LAIG da Universidade Federal do Paraná possui um sistema para calibração de miras verticais de ínvar. Este é constituído por um Interferômetro Laser e um par de trilhos por onde se desloca o refletor móvel do interferômetro. Tal conjunto será utilizado em parte do processo de calibração em laboratório como padrão⁶ para medição de deslocamentos.

Tendo em vista a precisão desejada para a realização das medições, milésima parte do milímetro, estes trilhos devem estar perfeitamente alinhados e nivelados. Apesar de todo o cuidado tomado no momento do posicionamento dos trilhos, que estão apoiados sobre pilares engastados na laje do laboratório, permaneceram algumas irregularidades que provocam variações no deslocamento do refletor móvel causando variações nas distâncias (FAGGION, 2001) que, por sua vez, devem ser corrigidas da seguinte forma (Equação 34):

$$Dh = Di \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (34)$$

Onde:

Dh = distância horizontal;

Di = Distância inclinada;

α = inclinação entre pontos A e B

⁶ Padrão: Medida materializada, instrumento de medição, material de referência ou sistema de medição destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza para servir como referência (VIM, 1995).

Outra forma de obter a distância horizontal seria:

$$Dh = \sqrt{Di^2 - \Delta h^2} \quad (35)$$

Onde:

Dh = distância horizontal;

Di = Distância inclinada;

Δh = desnível entre pontos A e B em milímetros.

Como o desnível Δh não é conhecido, recomenda-se a utilização do nivelamento geométrico. Aos interessados recomenda-se Faggion (1993).

Neste trabalho foi utilizado o nível eletrônico Talyvel 3, do fabricante Taylor Robson para realizar o nivelamento do trilho. Este equipamento, com o sensor posicionado em um suporte sobre o refletor móvel do interferômetro, fornece a inclinação para cada posição ocupada. Os valores apresentados no exemplo a seguir são as inclinações para Posição 1 e para Posição 2, em segundos de arco (Figura 23). Cabe salientar a orientação considerando o cabo de comunicação como referência para definir a frente do sensor.

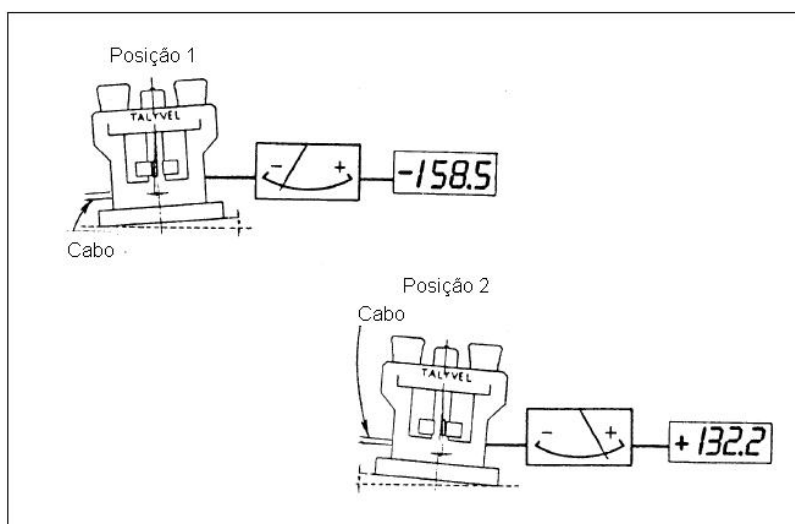


Figura 23 – Funcionamento do nível eletrônico
 FONTE: ADAPTADO DE TALYVEL 3

Para realização deste nivelamento, o nível deve estar configurado para leitura em segundos de arco (Figura 24), o que permite obtenção do valor de α diretamente, pois:

$$\alpha_{(i)} = Ls_{(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (36)$$

onde:

Ls = Leitura realizada no nível (em segundos de arco);

i = posição ocupada pelo refletor móvel;

n = número de posições ocupadas pelo refletor móvel.

O valor de $i = 1$ indica a posição inicial do refletor, na qual o interferômetro marca deslocamento igual a zero.



Figura 24 – Unidade de leitura dos valores medidos
FONTE: O autor

Observa-se a unidade que realiza efetivamente a medida do desnível, posicionada paralelamente aos trilhos, sobre o carrinho que transporta o refletor do interferômetro (Figura 25). Na Figura 26 é possível verificar o nível e ao fundo o Interferômetro.

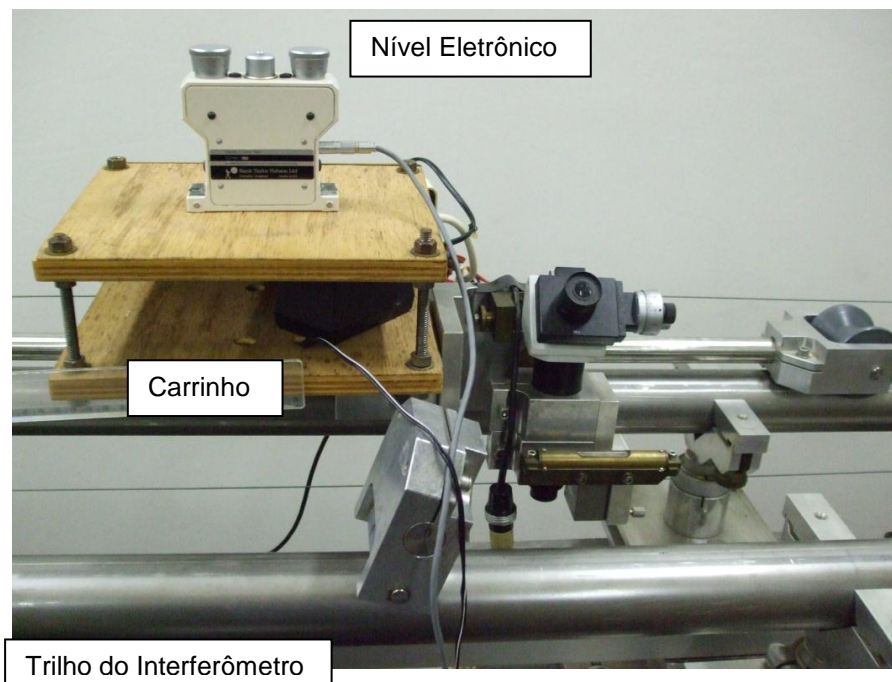


Figura 25 – Nível eletrônico sobre o carrinho do interferômetro
FONTE: O autor

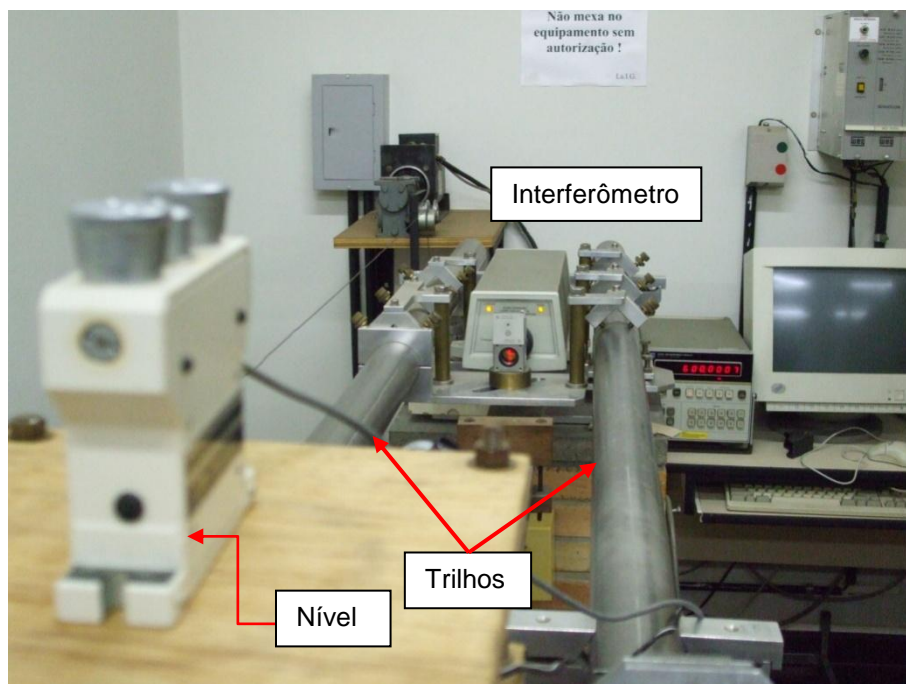


Figura 26 – Nível e interferômetro
FONTE: O autor

4 RESULTADOS

Foi realizado o processo de calibração para os instrumentos disponíveis no LAIG e LABTOPO, modelos TCR 407 POWER e TCRA 1205 da marca Leica, pois permitem a medição de distâncias sem utilização de prismas. Cabe salientar que ao início de cada procedimento de calibração, os equipamentos estiveram fora de suas caixas por um período superior a 50 minutos, para atingirem o equilíbrio térmico com o ambiente e a estabilidade do MED. Para o procedimento de calibração em campo, o equipamento utilizado como padrão foi a ET Leica TC 2003, por possuir melhor precisão que os demais equipamentos. No quadro a seguir estão discriminadas as precisões nominais de cada equipamento, obtidas em seus respectivos manuais de instrução (QUADRO 6).

ET	Linear	Angular
TC 2003	$\pm 1\text{mm} + 1\text{ppm}$	0,5"
TCRA 1205	$\pm 1\text{mm} + 1,5\text{ppm}$	5"
TCR 407 Power	$\pm 2\text{mm} + 2\text{ppm}$	7"

QUADRO 6 - PRECISÃO DAS ET UTILIZADAS
 FONTE: O autor

4.1 CALIBRAÇÃO EM CAMPO

4.1.1 Nivelamento da Base Linear

Iniciaram-se os procedimentos de aquisição de dados para a calibração em campo realizando-se o nivelamento entre os pilares. O método utilizado para o intervalo compreendido entre os pilares P1 e P2 foi o nivelamento trigonométrico (Figura 27), devido ao desnível acentuado entre eles, pois existe grande dificuldade de se posicionar o nível para realizar as visadas. Este método de determinação de desnível foi amplamente discutido em outras dissertações, por exemplo, Gomes (2006) e Santos (2009).

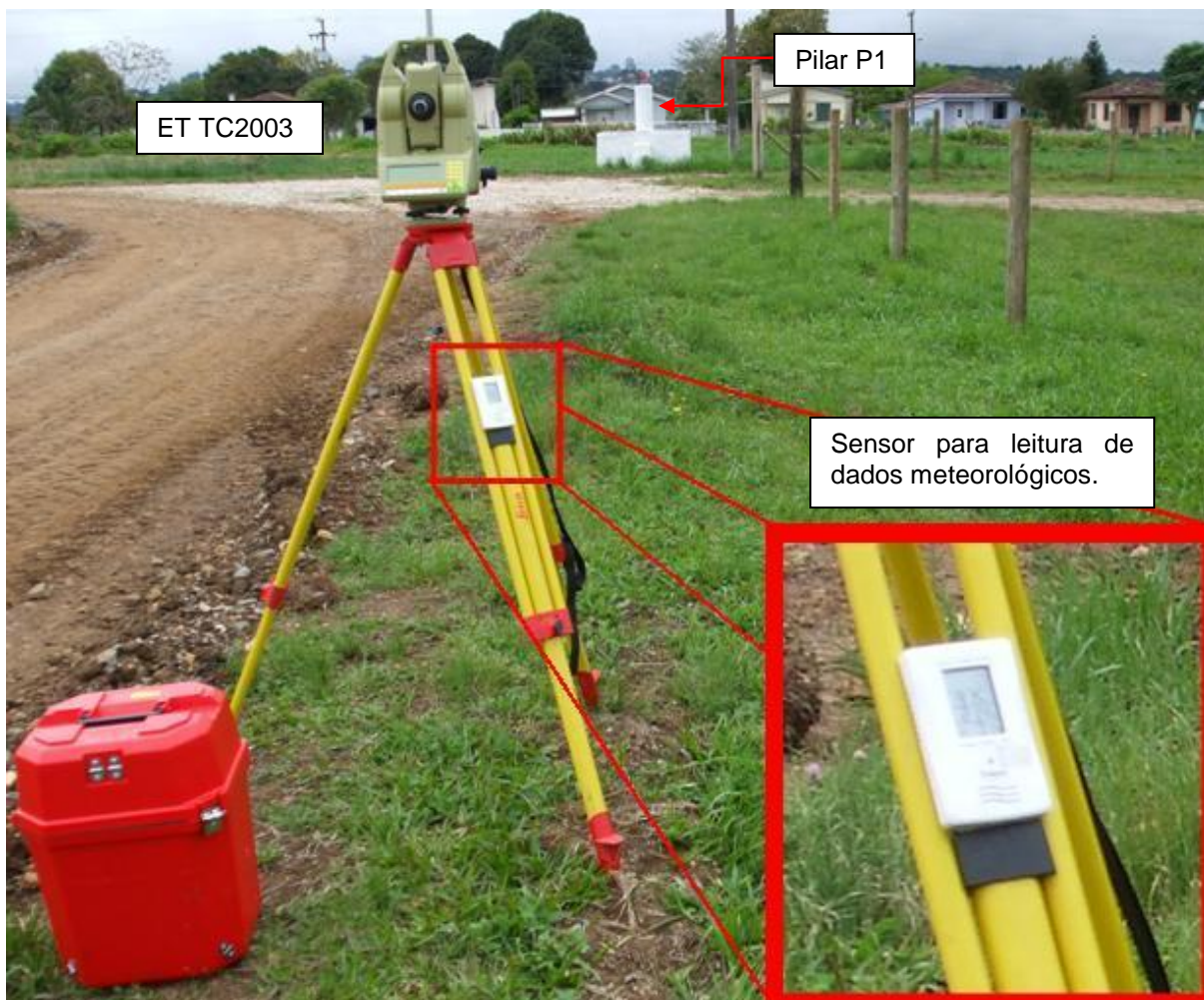


Figura 27 - Nivelamento trigonométrico (TC 2003)
FONTE: O autor

Para garantir a precisão na determinação de tal desnível, foi tomado o cuidado de utilizar a ET 2003, em virtude de sua precisão nominal, a qual foi posicionada de forma equidistante aos dois pilares para minimizar os efeitos de curvatura e refração. Também as distâncias medidas foram corrigidas das variações ambientais de umidade, pressão e temperatura.

Para os demais intervalos, do P2 ao P7, foi realizado o nivelamento geométrico com o nível Leica DNA 03, com precisão de 0,3mm de duplo nivelamento. Inclusive como experiência, sobre os pilares foi utilizada a mira de 1 metro para facilitar o posicionamento da mesma e minimizar possíveis erros de verticalização (Figura 28).

Apesar do uso de três miras neste levantamento, tomaram-se todos os cuidados recomendados para um nivelamento de primeira ordem, inclusive a realização de lances pares. Nos pontos auxiliares, utilizaram-se sapatas as miras de 3 m (Figura 29).

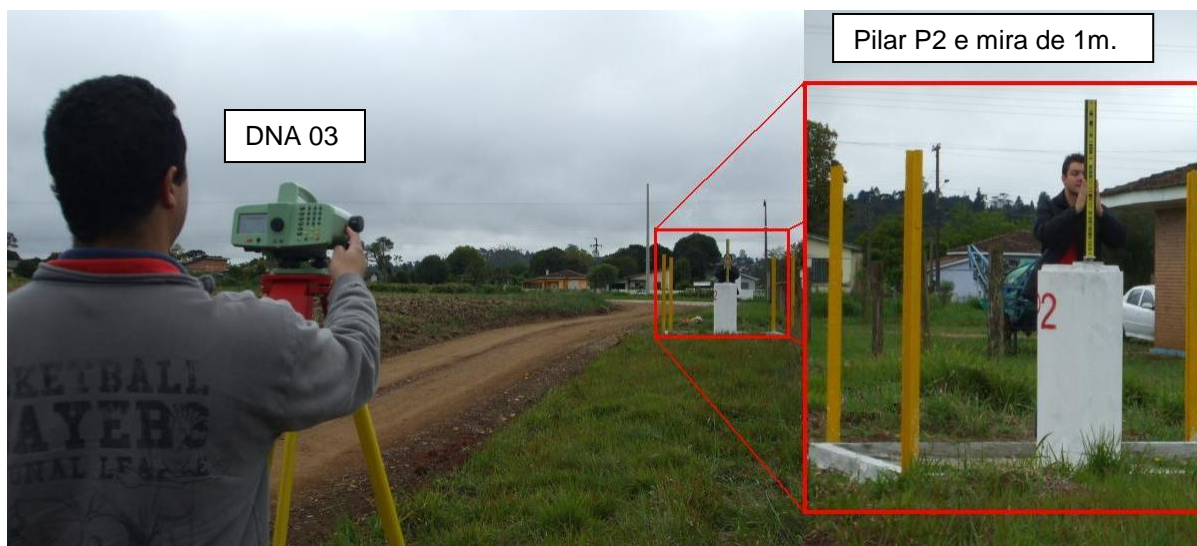


Figura 28 - Nivelamento Geométrico
FONTE: O autor



Figura 29 - Nivelamento Geométrico - pontos auxiliares
FONTE: O autor

Os desníveis obtidos neste trabalho são mostrados a seguir e comparados aos desníveis obtidos por Gripp (1986) e Faggion (2001) (QUADRO 7).

Seção	Desníveis (m)			Diferenças (mm) (2001-2010)
	Joel Gripp Jr. (1986)	Pedro L. Faggion. (2001)	Atual (2010)	
P1-P2	-0,918	-0,9244	-0,9231	-1,3
P2-P3	-2,004	-2,0036	-2,0063	2,7
P3-P4	0,598	0,606	0,6073	-1,3
P4-P5	0,485	0,4887	0,4883	0,4
P5-P6	1,436	1,4338	1,4342	-0,4
P6-P7	0,608	0,6107	0,6102	0,5

QUADRO 7- DESNÍVEIS EM DIFERENTES ÉPOCAS

FONTE: O autor

Esta comparação tornou-se necessária pois o levantamento feito por Faggion em 2001 apresentou diferenças em relação ao levantamento feito por Gripp em 1986. Assim, para saber se existiria diferença em relação a Faggion, realizou-se novo levantamento em 2010. Como mostra a coluna relacionada aos desníveis obtidos em 2010, houve discrepâncias principalmente nos três primeiros intervalos, sendo que o intervalo p2-p3 apresentou a maior divergência (3mm). Os demais apresentam desníveis na ordem da precisão do método. Em virtude dos primeiros resultados muito divergentes, houve a necessidade de uma atualização no software CALIBRACAO desenvolvido por Faggion, considerando agora os valores obtidos no levantamento de 2010.

Na Figura 30, a seguir, é possível observar o croqui do perfil entre os pilares da Base da Fazenda Canguiri. Cabe salientar que as escalas nos eixos X e Z não são as mesmas para facilitar a observação dos desníveis. Em X e Z temos as escalas aproximadas 1:4000 e 1:100 respectivamente.

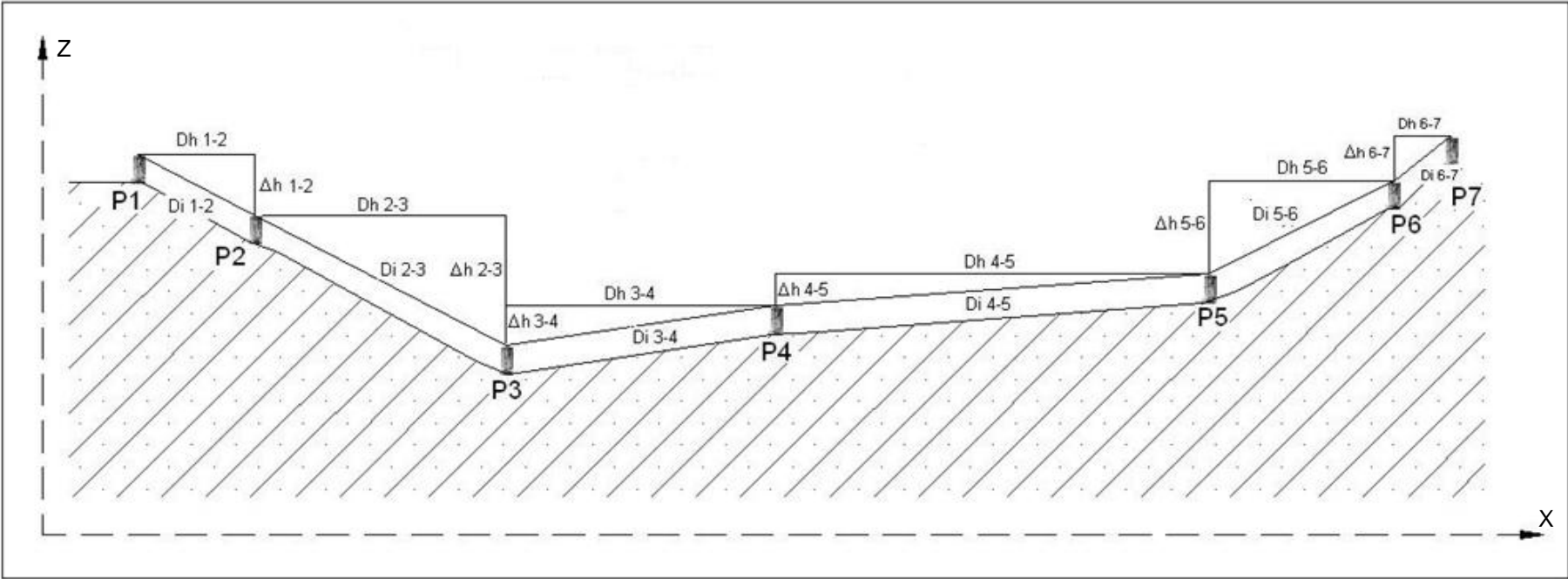


Figura 30 - Croqui dos desníveis entre os pilares da Fazenda Canguiri
FONTE: O autor

4.1.2 Determinação da escala da Base

Foi utilizada, como explicado anteriormente, a ET TC 2003 devido a sua precisão. Os levantamentos foram realizados em vários períodos do dia, inclusive à noite, para tentar contemplar maiores variações nas condições ambientais, como pode ser visto na Figura 31.

Campanha matutina



Campanha vespertina



Campanha noturna



Figura 31 - Momentos da medição da base
FONTE: O autor

Os valores obtidos para a escala da base, que são as distâncias entre os pilares medidas em vários períodos do dia, corrigidas de efeitos atmosféricos e horizontalizadas podem ser vistas no QUADRO 8. Os desvios-padrão estão abaixo da precisão nominal do equipamento descrito no QUADRO 5, o que demonstra uma estabilidade do padrão de medição do equipamento utilizado como referência.

Pilares	Distâncias entre pilares (m)	Desvio-Padrão (mm)
p1 p2	70,8673	0,2402
p1 p3	222,7893	0,2019
p1 p4	385,8451	0,2961
p1 p5	648,2507	0,4170
p1 p6	759,6807	0,4555
p1 p7	789,9208	0,5792
p2 p3	151,9208	0,3299
p2 p4	314,9764	0,2836
p2 p5	577,3827	0,6201
p2 p6	688,8129	0,9503
p2 p7	719,0514	0,8322
p3 p4	163,0551	0,3141
p3 p5	425,4611	0,6172
p3 p6	536,8903	0,5358
p3 p7	567,1302	0,4171
p4 p5	262,4052	0,2561
p4 p6	373,8358	0,5418
p4 p7	404,0753	0,7445
p5 p6	111,4293	0,4366
p5 p7	141,6692	0,7465
p6 p7	30,2404	0,7296

QUADRO 8 - ESCALA DA BASE

FONTE: O autor

No QUADRO 9 abaixo, é possível observar as diferenças entre as distâncias medidas neste trabalho e as mesmas distâncias medidas por Faggion (2001). Comparando estes resultados, é possível notar que as maiores discrepâncias de cada ocupação ocorrem em: p1p6, p2p6, p3p6, p4p6, p5p7. Estas diferenças foram

causa de nova atualização no programa CALIBRACAO, além daquela já mencionada anteriormente.

Pilares	Distâncias (atual)	Distâncias (Faggion, 2001)	Diferença em relação a Faggion (mm)
p1 p2	70,8673	70,8686	1,3
p1 p3	222,7893	222,789	-0,3
p1 p4	385,8451	385,8444	-0,7
p1 p5	648,2507	648,2498	-0,9
p1 p6	759,6807	759,6788	-1,9
p1 p7	789,9208	789,9196	-1,2
p2 p3	151,9208	151,92	-0,8
p2 p4	314,9764	314,9758	-0,6
p2 p5	577,3827	577,3808	-1,9
p2 p6	688,8129	688,8104	-2,5
p2 p7	719,0514	719,0506	-0,8
p3 p4	163,0551	163,0546	-0,5
p3 p5	425,4611	425,4598	-1,3
p3 p6	536,8903	536,889	-1,3
p3 p7	567,1302	567,1298	-0,4
p4 p5	262,4052	262,4048	-0,4
p4 p6	373,8358	373,834	-1,8
p4 p7	404,0753	404,0744	-0,9
p5 p6	111,4293	111,429	-0,3
p5 p7	141,6692	141,6698	0,6
p6 p7	30,2404	30,2404	0,0

QUADRO 9 - DISTÂNCIAS OBTIDAS EM DIFERENTES ÉPOCAS

FONTE: O autor

Estas diferenças podem ter ocorrido pelo fato de existir grande movimentação de máquinas agrícolas nas proximidades dos pilares, causando deslocamentos nos mesmos na ordem de milímetros.

4.1.3 Calibração das estações totais

Conforme é possível observar nos quadros 7 e 9, ocorreram variações nos desníveis e na escala da base desde a última campanha realizada, portanto houve necessidade de uma atualização no programa utilizado para o processamento dos dados da calibração, o CALIBRACAO.EXE, na função “Campo” (Figura 32).



Figura 32 - Interface para escolha do local de calibração – CAMPO
FONTE: O autor

Tal função é responsável pelos cálculos dos elementos de calibração a partir dos dados obtidos em campo. Então, realizou-se o processamento dos dados coletados. Na Figura 33, é possível ver a interface de entrada dos dados e o resultado mostrando os elementos de calibração da estação total TCRA 1205.

Vetor das Distâncias Medidas

1-2	70,8680948
1-3	222,7894382
1-4	385,8447255
1-5	648,2519028
1-6	759,6800295
1-7	789,9220985
2-3	151,9207309
2-4	314,9758598
2-5	577,3826737
2-6	688,8116241
2-7	719,0532947
3-4	163,0550442
3-5	425,4605079
3-6	536,8895247
3-7	567,1306229
4-5	262,4058349
4-6	373,8339085
4-7	404,0760905
5-6	111,4290137
5-7	141,6705858
6-7	30,24149032

Especificações do Instrumento

Fabricante: Leica
 Modelo: TCRA 1205
 Número de Série: LAIG

Elementos de Calibração dos "MED"

Fator de Escala: 1,246 ppm σ 2,256 ppm
 Cost. Aditiva: -0,628 mm σ 0,881 mm
 Amplitude: 0,815 mm σ 0,563 mm
 Ângulo de Fase: 0,668 rd σ 0,573 rd

Dados de Campo Reduções Calcular

Figura 33 - Programa CALIBRACAO com o resultado referente a ET TCRA – Campo
 FONTE: O autor

A seguir, são apresentados os resultados da calibração das ETs utilizadas, TCRA 1205, TCR 407 Power (QUADRO 10).

Estação Total	Fator de Escala (ppm)	Constante Aditiva (mm)	Erro Cíclico Amplitude (mm)	Erro Cíclico Ângulo de fase (rd)
TCRA 1205	1,246 σ = 2,256	-0,628 σ = 0,881	0,815 σ = 0,563	0,668 σ = 0,573
TCR 407 Power	2,578 σ = 2,307	-0,439 σ = 0,901	0,928 σ = 0,533	0,445 σ = 0,542

QUADRO 10 - ELEMENTOS DE CALIBRAÇÃO OBTIDOS NA BASE LINEAR
 FONTE: O autor

Estes resultados são inseridos no certificado de calibração do MED. Nota-se que há casos em que o valor do desvio-padrão é maior que o valor do próprio elemento de calibração. Isto ocorre porque o valor do elemento de calibração é baixo por se tratar de um equipamento pouco utilizado e o modelo matemático não é capaz de modelar o desvio-padrão de forma satisfatória.

4.2 CALIBRAÇÃO EM LABORATÓRIO

4.2.1 Nivelamento dos trilhos do Interferômetro

Foram realizadas quatro sessões de nivelamento dos trilhos do interferômetro para buscar o melhor valor das distâncias horizontais. Além disso, a variação da distância medida foi alterada para possibilitar o aumento do número de comprimentos de onda sujeitos à calibração.

Conhecendo as distâncias inclinada e horizontal, é possível calcular o desnível entre os pontos. Observa-se na Figura 34, um gráfico com os valores dos desníveis para as sessões realizadas.

Desses valores foi gerada a média dos desníveis com as quatro sessões. Tais valores podem ser observados na Figura 35, na qual se constata que o valor máximo de desnível a 1,2 metros da origem do sistema é de aproximadamente -0,74mm.

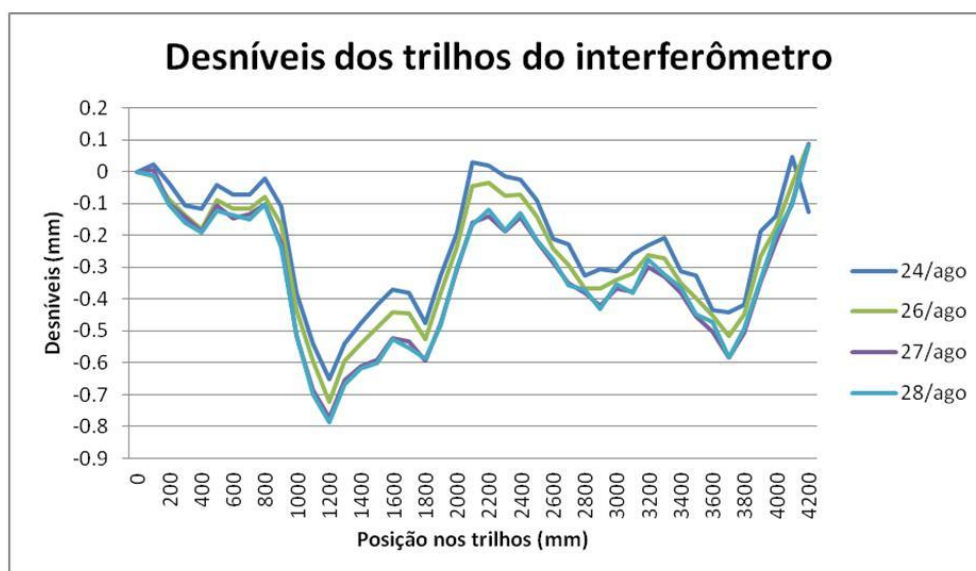


Figura 34 - Desníveis dos trilhos do interferômetro
FONTE: O autor



Figura 35 - Média dos desníveis dos trilhos
 FONTE: O autor

Na sequência, calculou-se as distâncias horizontais conforme equação 35. No QUADRO 11 é possível observar o valor da média para cada distância.

Média (mm)	Desvio Padrão. (mm)
0,00000	0,00000
99,99999	0,00001
199,99982	0,00010
299,99968	0,00010
399,99963	0,00013
499,99991	0,00005
599,99988	0,00006
699,99990	0,00005
799,99996	0,00003
899,99980	0,00011
999,99892	0,00030
1099,99818	0,00043
1199,99774	0,00037
1299,99854	0,00027
1399,99886	0,00026
1499,99907	0,00030
1599,99931	0,00021
1699,99931	0,00022
1799,99917	0,00016
1899,99953	0,00016

QUADRO 11 – DISTÂNCIAS DO INTERFERÔMETRO (CONTINUA)

1999,99983	0,00007
2099,99997	0,00004
2199,99998	0,00002
2299,99996	0,00004
2399,99998	0,00003
2499,99994	0,00007
2599,99987	0,00003
2699,99982	0,00007
2799,99977	0,00003
2899,99975	0,00007
2999,99980	0,00003
3099,99982	0,00006
3199,99989	0,00003
3299,99988	0,00005
3399,99982	0,00003
3499,99976	0,00007
3599,99970	0,00004
3699,99962	0,00010
3799,99971	0,00005
3899,99989	0,00005
3999,99996	0,00002
4100,00000	0,00001
4199,99999	0,00001

QUADRO 11 - DISTÂNCIAS DO INTERFERÔMETRO (CONCLUSÃO)
 FONTE: O autor

4.2.2 Determinação do fator de escala em laboratório

Realizou-se a determinação do fator de escala em laboratório utilizando-se o novo sensor de frequência e frequencímetro. Na Figura 36 é possível observar a montagem do procedimento de leitura da frequência de operação utilizando o sensor de frequência conectado ao frequencímetro, bem como o termo-higrômetro digital, utilizado para verificação da temperatura no interior do laboratório. Em seguida, frequencímetro e sensor de frequência em detalhe (Figura 37).

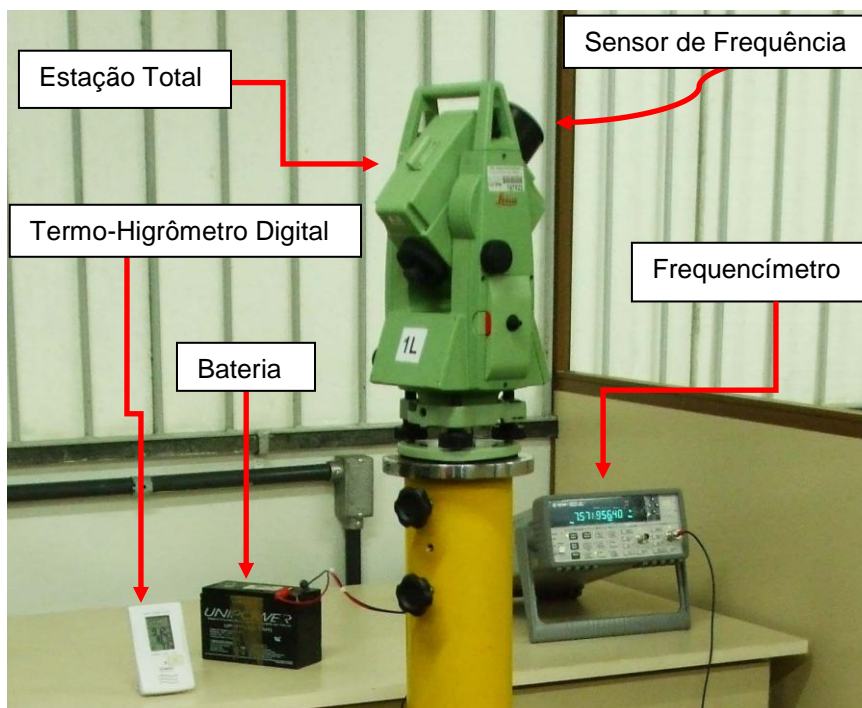


Figura 36 – Sensor de frequência/Estação Total/Frequencímetro
 FONTE: O autor



Figura 37 - Frequencímetro e Sensor de Frequência
 FONTE: O autor

As estações que apresentaram compatibilidade com este sensor de frequência foram as da marca Leica, modelos TCRA 1205 e TCR 407 Power, ambas com frequência nominal de 100 MHz.

A estação Leica TC 2003 não teve sua frequência detectada⁷, pois sua frequência nominal é de 50 MHz. Mas como esta estação também apresenta a possibilidade de fazer essa medida internamente de forma semelhante a da TCRA

⁷ Conforme visto na seção 3.2.3, o sensor foi desenvolvido para medir frequências próximas a 100 MHz.

1205, foram utilizados tais valores para determinar seu fator de escala. Os valores de correção do fator de escala podem ser vistos no QUADRO 12.

Estação Total	Frequência Medida (Hz)	Frequência Nominal adotada (Hz)	Fator de Escala (ppm)
TCR 407 Power 1L	100389756,4	100389771	0,145
TCR 407 Power 2L	100389511,4	100389489	-0,223
TCRA 1205	99998381,9	99998397	0,151
TC 2003	49999870,42	49999878	0,152

QUADRO 12 – FATOR DE ESCALA

FONTE: O autor

O valor da frequência indicado no manual de instruções de cada equipamento é aproximado. O valor real da frequência nominal somente é informado no certificado de calibração emitido pela fábrica ou pelo representante comercial. Como tal procedimento apresenta custo, a solução foi adotar o valor nominal como o primeiro valor medido no momento de cada coleta.

4.2.3 Determinação dos elementos do erro cíclico

Conforme descrito na seção 3.2.3 sobre os deslocamentos a serem medidos para determinação dos elementos do erro cíclico, observou-se que elas deveriam estar distribuídas ao longo de 1,5 m de comprimento, para observar o princípio de estarem ao longo de meio comprimento de onda da onda moduladora.

Tendo em vista que os equipamentos cuja onda moduladora tem frequência igual a 100 MHz (aproximadamente), seu comprimento de onda é igual a 3m. Daí se tem o valor de 1,5 m para a distância total deslocada no interferômetro na calibração destes MEDs. Para evitar o maior desnível no trilho, iniciaram-se os deslocamentos a partir da distância 2200 mm, contados do ponto mais próximo do emissor de laser do interferômetro.

Desta forma, de maneira semelhante a seção 4.3.1, também houve a necessidade de uma atualização no programa CALIBRACAO.EXE, pois o mesmo foi programado anteriormente para frequências de 50 MHz, e conseqüentemente

deslocamentos de 3 m. Nesta atualização, inseriu-se a opção de escolha da frequência a ser utilizada, conforme pode ser observado em indicação na Figura 38. Para utilização dos equipamentos nesta calibração, deve-se selecionar a opção 100 MHz. Aos interessados em maior aprofundamento sobre o programa CALIBRACAO.EXE, recomenda-se FAGGION (2001).



Figura 38 - Escolha da frequência do equipamento
FONTE: O autor

A seguir (Figura 39), pode-se observar a tela de entrada de dados já com os elementos do erro cíclico da estação total TCRA 1205, configurada na opção de medição com prisma.

Figura 39 - Programa CALIBRACAO com o resultado referente a ET TCRA 1205 - Laboratório
 FONTE: O autor

No quadro a seguir (QUADRO 13), estão os elementos do erro cíclico das ETs TCRA 1205 e TCR 407 Power, utilizando as opções de medição com prisma (CP) e sem prisma (SP).

Estação Total	Modo	Amplitude (mm)	Ângulo de fase (rd)
TCRA 1205	CP	0,030 $\sigma = 0,000$	-1,571 $\sigma = 58,494$
	SP	0,120 $\sigma = 0,000$	-1,571 $\sigma = 0,205$
TCR 407 Power	CP	0,477 $\sigma = 91,761$	0 $\sigma = 0,149$
	SP	0,477 $\sigma = 137,641$	0 $\sigma = 0,223$

QUADRO 13 - ELEMENTOS DO ERRO CÍCLICO
 FONTE: O autor

No quadro abaixo (QUADRO 14), encontram-se os valores da constante aditiva (erro de zero) obtidos em campo. Tais valores não foram obtidos em laboratório, pois a metodologia utilizada não permite sua determinação de forma precisa em tal ambiente.

Estação Total	Constante Aditiva (mm) - Campo
TCRA 1205	-0,628 $\sigma = 0,881$
TCR 407 Power 1L	-0,439 $\sigma = 0,901$

QUADRO 14 - Constante Aditiva (Campo)
FONTE: O autor

Nos quadros abaixo (QUADRO 15 e 16) pode-se observar um comparativo entre os valores do Fator de Escala e Elementos do Erro Cíclico para calibração em campo e em laboratório:

Estação Total	Fator de Escala (ppm) - Campo	Fator de Escala (ppm) - Laboratório
TCRA 1205	2,578 $\sigma = 2,307$	0,151
TCR 407 Power 1L	1,246 $\sigma = 2,256$	0,145

QUADRO 15 - Fator de Escala
FONTE: O autor

Estação Total	Modo	Amplitude (mm)		Ângulo de fase (rd)	
		Campo	Laboratório	Campo	Laboratório
TCRA 1205	CP	0,928 $\sigma = 0,533$	0,030 $\sigma = 0,000$	0,445 $\sigma = 0,542$	-1,571 $\sigma = 58,494$
	SP	Não realizado	0,120 $\sigma = 0,000$	Não realizado	-1,571 $\sigma = 0,205$
TCR 407 Power	CP	0,815 $\sigma = 0,563$	0,477 $\sigma = 91,761$	0,668 $\sigma = 0,573$	0 $\sigma = 0,149$
	SP	Não realizado	0,477 $\sigma = 137,641$	Não realizado	0 $\sigma = 0,223$

QUADRO 16 - Elementos do Erro Cíclico
FONTE: O autor

Comparando-se os valores de laboratório e de campo, percebe-se uma diferença significativa, que pode ter sido provocada devido à variação do comprimento de onda quando dos testes em laboratório. A alteração do valor do comprimento do onda de 6m para 3m foi considerada para modificação dos intervalos medidos com o equipamento em calibração e o interferômetro simultaneamente. O valor da distância inicial não foi modificado, permanecendo o mesmo (100m) utilizado para a frequência de 50 MHz e de 100 MHz.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

O afastamento entre os pilares da base da Fazenda Canguiri, mesmo tendo sido construídos considerando frequências de até 50 MHz, atende às necessidades dos equipamentos atuais.

O sistema de centragem forçada foi recuperado e orientou-se a administração da fazenda no sentido de conscientizar os operadores das máquinas que circulam no local à preservarem os pilares.

O nivelamento realizado para determinar o desnível entre os pilares demonstrou que houve variações em relação aos desníveis determinados em 2001 para algumas seções. Devido a isso, alterou-se o software CALIBRACAO para que pudesse atender à nova demanda.

Na determinação da escala da base, comparando-se com Faggion (2001), observam-se variações nas distâncias de até 2,5 mm, ou seja, superiores ao dobro da precisão nominal da ET TC 2003. Isto também implicou em alteração na implementação do software CALIBRACAO. Esta divergência se deve, provavelmente, à movimentação de tratores na estrada ao lado da base, devido ao fato de que uma das atividades desenvolvidas na fazenda é o treinamento para utilização de máquinas agrícolas.

O nivelamento dos trilhos do interferômetro apresentou variações quando comparado com os valores obtidos por Faggion (1993). Atribui-se isso a uma obra realizada no subsolo, onde foram realizados furos no concreto para instalar um sistema de circulação de ar. Esta obra veio abalar os pilares onde estão apoiados os trilhos do sistema interferométrico.

A medida da frequência de operação dos instrumentos realizada em laboratório utilizando um sensor desenvolvido pela Leica difere da frequência

nominal dos instrumentos informada pelo fabricante, pois a mesma é fornecida no manual de operação de forma aproximada. O valor da frequência nominal foi, por este motivo, arbitrado, então é provável que seja diferente do valor nominal real, o que pode acarretar um erro no cálculo do valor do fator de escala.

Os resultados obtidos na calibração em campo e em laboratório mostraram-se coerentes porque os equipamentos têm uso restrito, sendo utilizado por poucas pessoas e estas possuem grande conhecimento técnico de operação e de cuidado com os mesmos. Logo, esperavam-se valores dos elementos de calibração menores que os nominais, constantes no manual de operação, como os que foram alcançados por meio deste trabalho.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Monitorar a escala da base em intervalos inferiores a um ano, para confirmar a influências das máquinas nas variações horizontais e verticais encontradas no desenvolvimento deste trabalho.

Continuar os estudos de calibração da frequência em laboratório, buscando sanar as diferenças encontradas neste experimento.

Continuar a atualizar a rotina computacional CALIBRACAO, implementando opções como, por exemplo, importação de dados de planilhas eletrônicas ou mesmo de arquivos de texto.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACT Planning & Land Authority. **EDM CALIBRATION HANDBOOK**. Surveying and Spatial Data. 7th ed. 2009. Disponível em <http://www.actpla.act.gov.au/__data/assets/pdf_file/0019/9451/edm-handbook.pdf>. Acesso: abril, 2010.

BARNES, G. **Project 2. SUR 350: Spatial Measurement Systems**. School of Forest Resources & Conservation. University of Florida. Spring. 2007. Disponível em : <<http://sfrc.ifas.ufl.edu/geomatics/courses/wwwusers/Sur3501/PROJECT%202.doc>>. Acesso: março, 2010.

BROWN, N.; VEUGEN, R.; VAN DER BEEK, G.; HUGERS, R. F. H. **Recent Network at NML to establish traceability for survey electronic distance measurement (EDM)**. CSIRO/ National Measurement Laboratory, Australia; Technical University of Eindhoven, Netherlands, 1998.

CHRZANOWSKI, A. **Design and Error Analysis of Surveying Projects**. Selected papers and lecture notes. Department of surveying Engineering. University of New Brunswick. Fredericton N.B. Canadá, 1977.

CORDINI, J. **Determinação do erro cíclico em distanciômetros eletrônicos**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1991.

DOUBEK, A. **Uma base de Aferição**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1974.

Escritório de Levantamento e Mapeamento de Hong Kong. Disponível em <http://www.geodetic.gov.hk/smo/gsi/data/calibration_edm_base/Plover_Cove_EDM_Calibration_Baseline.pdf>. Acesso: maio, 2009.

FAGGION, P. L. **Contribuição para a implantação de um sistema de aferição de miras de invar na UFPR**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1993.

FAGGION, P. L. **Determinação do fator de escala em estações totais e "MED" utilizando observações de campo e laboratório**. 45f. Seminário apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas na Disciplina Seminário II da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1999.

FAGGION, P. L. **Obtenção dos elementos de calibração e certificação de medidores eletrônicos de distância em campo e laboratório.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra. Curitiba, 2001.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas.** Editora UFPR, Curitiba, 1994.

GRIPP, J. Jr. **Calibração de Distanciômetros Eletrônicos com medidas de campo.** Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1986.

GOMES, J. P. **Determinação de desníveis de precisão utilizando estação total.** Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

IBGE. **Sistema Geodésico Brasileiro – Rede Planimétrica.** Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/planimetrica.shtm>>. Acesso em agosto, 2010.

INMETRO. **Vocabulário de Metrologia Legal.** 1998. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/infotec/publicacoes/MetrologiaLegal/met_legal.htm>. Acesso em: março, 2010.

KAHMEN, H. FAIG, W. **Surveying.** Ed. Walter de Gruyter & Co. New York, USA, 1988.

KENNIE, T. J. M.; PETRIE, G. **Engineering Surveying Technology.** 1st ed. Blackie Academic & Professional. Halsted Press. USA. 1993.

KHALIL, R. **New Compact Method for Laboratory Testing EDM Instruments.** FIG Working Week 2005 and GSDI-8. From Pharaohs to Geoinformatics, Cairo, Egypt. April 16-21, 2005. Disponível em: <kau.edu.sa/Files/0052473/Researches/30527_03_Testing_EDM.pdf>. Acesso em: março, 2010.

LANDGATE. **Calibration of Eletronic Distance Measurement Instruments.** Western Australian Land Information Authority. 2009. Disponível em: <[http://www.landgate.wa.gov.au/docvault.nsf/web/PS_Survey_EDM_Calibration_Software/\\$FILE/EDMCalibration.pdf](http://www.landgate.wa.gov.au/docvault.nsf/web/PS_Survey_EDM_Calibration_Software/$FILE/EDMCalibration.pdf)>. Acesso em: março, 2010.

LEICA TCRA 1205. **Manual do Usuário.** Heerbrunn, Suíça, 2004.

MARTINI, L. **Calibração de prismas de reflexão total em forma de fita adesiva, em acrílico e sua aplicação no controle de deslocamentos de estruturas.** Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

MIRANDA, F. A. **Metodologia para o monitoramento de pontos em áreas instáveis empregando-se estações totais**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

NBR 13.133. **Execução de Levantamentos Topográficos**. Rio de Janeiro, 1994.

NIEMEIER, W. **Statistical tests for deteting movements in repeatedly measured geodetic networks**. Tecnotophysics, Amsterdam, 1981.

OBSERVATÓRIO NACIONAL. **A radiação emitida ou refletida pelos corpos celeste**. Ensino a Distância. 2009. Disponível em: <http://www.on.br/site_edu_dist_2009/site/modulos/modulo_1/3-atmosferas/radiacao.html>. Acesso em: abril, 2010.

PACILÉO NETTO, N. **Calibração de medidores eletrônicos de distância, construção de uma base multipilar na USP e metodologia de aferição**. São Paulo, 1990. Tese de Doutorado, E. POLI/USP.

RÜEGER, J. M. **Electronic Distance Measurement**. 3th ed., Springer-Verlag, Berlin. 1996.

RÜEGER, J. M. **Design and use of base line for the calibration of EDM instruments**, Australian Surveyor Congress, 20th. p. 175-189. Darwin. 1977.

SANTOS, D. P. **Avaliação do uso do nivelamento trigonométrico no transporte de altitudes para regiões de difícil acesso**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

SILVA, I. da, **Novas Tecnologias em Equipamentos Geodésicos e Topográficos**. Curso de Pós-Graduação – STT – EESC – USP. São Paulo, 2006.

SISMETRA. **Sistema de Metrologia Aeroespacial**. Disponível em: <www.sismetra.cta.br/index.php?page=definicoes>. Acesso em: junho, 2010.

SMITH, J.; NASCARELLA, J. **EDM – Electromagnetic Distance Measurement**. Disponível em:<<http://www.geom.unimelb.edu.au/kealyal/edms/edm-intro.html>>. Acesso em: junho, 2010.

TALYVEL 3 – **Operator’s Instructions** – Rank Taylor Robson Limited.

TOPCON. **Service Manual (Technical Manual)**. Arquivo fornecido pela assistência técnica da empresa Santiago & Cintra. 2009.

UNSW. **Surveying Instrument Collection**. University of New South Wales. Sydney. Austrália. Disponível em <http://www.gmat.unsw.edu.au/currentstudents/ug/projects/f_pall/html/edm.html>. Acesso em agosto, 2010.

VIM. **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia**. Portaria Inmetro 029 de 1995. Disponível em: <<http://www.lit.inpe.br/vim.pdf>>. Acesso em: junho, 2010.

WILD TC2002. **User manual**. Heerbrugg, Suíça. 1994.

DOCUMENTOS CONSULTADOS

VEIGA, L. A. K.; ZANETTI, M. A. Z.; FAGGION, P. L. **Fundamentos de Topografia**. Curitiba, 2007.

WOLF, P. R.; GHILANI, C. D. **Elementary surveying: a introduction to Geomatics**. New Jersey: Prentice-Hall, 2002.