



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Guilberto Chaplin Savedra Junior

UMA PROPOSTA PARA A GERAÇÃO DE COMPRIMENTOS DE REFERÊNCIA
PARA A CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES ELETRÔNICOS DE DISTÂNCIA

JOINVILLE

2019

Guilberto Chaplin Savedra Junior

UMA PROPOSTA PARA A GERAÇÃO DE COMPRIMENTOS DE REFERÊNCIA
PARA A CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES ELETRÔNICOS DE DISTÂNCIA

Dissertação submetida ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas
da Universidade Federal de Santa Catarina para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia e
Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. Maurício de Campos Porath

Joinville

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Savedra Júnior, Gilberto Chaplin Savedra Junior
Uma proposta para a geração de comprimentos de
referência para a calibração de medidores eletrônicos de
distância / Gilberto Chaplin Savedra Junior Savedra Júnior
; orientador, Maurício de Campos Porath Porath, 2019.
59 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. medidores
eletrônicos de distância. 3. calibração. 4. comprimentos de
referência. 5. geodésia industrial. I. Porath, Maurício de
Campos Porath. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas.
III. Título.

Guilberto Chaplin Savedra Junior

Título: Uma proposta para a geração de comprimentos de referência para a calibração de medidores eletrônicos de distância

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Marcos Alves Rabelo, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Sueli Fischer Beckert, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Xisto Lucas Travassos Júnior, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Prof. Dr. Régis Kovacs Scalice
Coordenador do Programa

Prof. Dr. Maurício de Campos Porath
Orientador

Joinville, 30 de agosto de 2019.

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de classe e aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui minha gratidão a todos que estiveram comigo até a chegada deste momento, coroando uma trajetória de muito esforço e aprendizado:

Aos meus pais, por terem me educado com muita dedicação, além do amor depositado a mim em todos os momentos;

Aos meus irmãos, padrinhos e familiares, por terem me auxiliado nas conquistas, sempre dando importantes conselhos e ensinamentos;

Aos meus amigos, que compreenderam minhas ausências em diversas ocasiões, pois estava dedicado à conclusão deste trabalho;

À minha esposa, Ana Paula, que sempre me motivou na busca pelo crescimento pessoal e profissional;

Aos colegas de trabalho, que, em muitas situações, tiveram que suprir minha ausência enquanto estava atendendo às disciplinas do curso;

Aos Professores, que, com o maravilhoso dom de educar, puderam contribuir de forma fundamental ao meu crescimento como aluno e pessoa;

Ao Professor Dr. Maurício, por ter me auxiliado, com muita paciência e atenção, no desenvolvimento deste trabalho, além de ter compartilhado grandes ensinamentos na área da metrologia;

E, finalmente, a Deus, por ter me conduzido no caminho da ciência e ter me dado forças para seguir na busca pelo aprendizado e educação.

RESUMO

Apesar da importância e da crescente demanda por calibração de medidores eletrônicos de distância, existe uma carência de laboratórios acreditados que ofereçam esse serviço atualmente. A grande dificuldade se encontra no alto custo da infraestrutura necessária para métodos tradicionais de calibração, acessíveis apenas a poucos laboratórios de calibração e institutos nacionais de metrologia. Em métodos de calibração direta, o maior custo se encontra na geração de comprimentos de referência com alta exatidão. Este trabalho propõe uma técnica para a geração de comprimentos de referência de alta exatidão, utilizando uma barra-padrão calibrada e técnica de *leapfrogging*. O objetivo deste trabalho é desenvolver um método que possa ser aplicado na construção de linhas de base para a calibração de medidores eletrônicos de distância. Para isso, foram realizados experimentos a fim de se estudar as fontes de incerteza associadas ao método proposto e avaliar o desempenho do método com um sistema de medição de referência. Foi possível materializar um comprimento de aproximadamente 50 m com incerteza expandida de 0,0028 m.

Palavras-chave: Calibração. Medidor eletrônico de distância. Comprimentos de referência.

ABSTRACT

Although the calibration of electronic distance meters is of great importance and it has been found a growing demand for it, there is a lack of accredited laboratories offering this service. The main obstacle lies on the need of great investments for the equipment required by conventional calibration methods, which are accessible only to few calibration laboratories and national metrology institutes. In direct calibration methods most part of the costs lies on high accuracy systems used to calibrate the reference lengths. This work proposes a technique for generating accurate reference lengths using a short length standard and a leapfrogging approach. The main goal is to develop a technique to be applied in the construction of baselines for the calibration of electronic distance meters. To reach this main goal the technique was tested in order to estimate the main sources of uncertainty related to the proposed method and to compare its performance with a reference measurement system. It was possible to materialize a length of approximately 50 m with an expanded uncertainty of 0.0028 m.

Keywords: Calibration. Electronic distance meter. Reference lengths.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Princípio de funcionamento de um MED a partir da diferença de fases. | 18 |
| Figura 2 – Procedimento Simplificado | 22 |
| Figura 3 – Linha de teste do procedimento completo | 22 |
| Figura 4 – Linha de base para verificação de MED conforme ISO 16331-1. | 23 |
| Figura 5 – Estrutura de uma linha de base para calibração direta de MED. | 24 |
| Figura 6– Bancada interferométrica..... | 25 |
| Figura 7 – Como tratar os erros de medição. | 27 |
| Figura 8 – Brincadeira de <i>Leapfrogging</i> | 32 |
| Figura 9– Técnica de concatenação de medidas no século XIX. | 33 |
| Figura 10– Técnica proposta para geração de comprimentos de referência. | 34 |
| Figura 11 – Diagrama de Ishikawa para as fontes de erro de medição. | 35 |
| Figura 12 – Protótipos para o teste de conceito..... | 40 |
| Figura 13 – Realização do Experimento | 42 |
| Figura 14– Imagem do experimento ao final da Rodada 3. | 45 |
| Figura 15 – Calibração do conjunto barra-padrão, ninhos e esfera. | 46 |
| Figura 16– Avaliação da repetibilidade da transferência de comprimento. | 48 |
| Figura 17– Resultado da comparação do <i>leapfrogging</i> e as medições da estação total | 53 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Critérios de classificação de medidores eletrônicos de distância conforme Rüeger (1994). | 17 |
| Tabela 2 – Laboratórios de calibração de trena a laser e estação total acreditados pela RBC. | 19 |
| Tabela 3 – Modelos de distribuição de probabilidade para o cálculo da incerteza-padrão | 30 |
| Tabela 4 – Fontes de incerteza do processo de medição | 36 |
| Tabela 5 – Informações acerca das rodadas de medição | 45 |
| Tabela 6 – Média e desvio padrão das medições realizadas..... | 47 |
| Tabela 7– Resultados do teste de transferência de comprimento | 49 |
| Tabela 8 – Balanço de incertezas do experimento | 52 |
| Tabela 9 – Comprimento final após 45 concatenações | 54 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

CMC Capacidade de Medição e Calibração

ISO International Organization for Standardization

GUM Guide to the expression of uncertainty in measurement

MED Medidor Eletrônico de Distância

MMC Máquina de Medir por Coordenadas

NBR Norma Brasileira Regulamentadora

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1. OBJETIVOS | 16 |
| 1.1.1. Objetivo Geral..... | 16 |
| 1.1.2. Objetivos específicos | 16 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 17 |
| 2.1. MEDIDORES ELETRÔNICOS DE DISTÂNCIA..... | 17 |
| 2.2. CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES ELETRÔNICOS DE DISTÂNCIA..... | 19 |
| 2.2.1. ISO 17123-4 (2012) | 20 |
| 2.2.2. ISO 16331-1 | 23 |
| 2.2.3. Calibração direta (linhas de base) e indireta (bancadas interferométricas) | 24 |
| 2.3. INCERTEZA DE MEDIÇÃO..... | 26 |
| 2.3.1. Métodos para estimativa de incerteza | 27 |
| 2.3.2. Procedimento para estimativa de incerteza de medição | 29 |
| 2.4. RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 31 |
| 3. MÉTODO PARA A GERAÇÃO DE COMPRIMENTOS DE REFERÊNCIA | 32 |
| 3.1. LEAPFROGGING COM MEDIDAS MATERIALIZADAS DE COMPRIMENTO | 32 |
| 3.2. TÉCNICA PROPOSTA | 33 |
| 3.3. MODELO MATEMÁTICO E FONTES DE INCERTEZA | 34 |
| 3.3.1. Descrição das fontes de incertezas | 35 |
| 3.3.2. Modelo matemático do processo de medição e coeficientes de sensibilidade..... | 36 |
| 4. TESTE DE CONCEITO | 39 |
| 4.1. EQUIPAMENTOS..... | 39 |
| 4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 41 |
| 4.3. REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO | 45 |
| 4.4. QUANTIFICAÇÃO DAS GRANDEZAS DE ENTRADA DO PROCESSO DE MEDIÇÃO E BALANÇO DE INCERTEZAS | 46 |
| 4.4.1. Calibração da barra-padrão | 46 |
| 4.4.2. Erros do processo de transferência de comprimento | 48 |
| 4.4.3. Incerteza do coeficiente de dilatação térmica..... | 49 |
| 4.4.4. Incerteza da medição de temperatura | 50 |
| 4.4.5. Erros decorrentes da estabilidade dos dispositivos de transferência | 50 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.4.6. | Erros decorrentes do alinhamento dos pontos | 51 |
| 4.4.7. | Balanço de incertezas e incerteza expandida..... | 51 |
| 4.5. | RESULTADOS..... | 52 |
| 4.6. | DISCUSSÃO | 54 |
| 5. | CONCLUSÃO | 56 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 57 |

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento de novas tecnologias, como o surgimento de materiais e produtos de alto desempenho, há necessidade de cada vez mais exatidão nos processos de fabricação e controle de qualidade. Desde o controle volumétrico de resina aplicada na obtenção de um material compósito, como na medição da massa de um composto químico na formulação de um produto medicinal ou, até mesmo, na cronometragem do tempo de acionamento de um airbag após a colisão do veículo, a metrologia tem desenvolvido técnicas e ferramentas capazes de produzir resultados com exatidão que outrora era tecnicamente inviável.

Dentro dessa área da ciência, a metrologia dimensional é um dos ramos mais importantes, pois impacta diretamente os processos produtivos de grande parte dos segmentos industriais, tanto para pequenas dimensões, como no setor de robótica e peças automotivas, como também para longas distâncias, como nas indústrias naval, aeroespacial, da construção civil e na agricultura. Apesar das diferentes aplicações existentes, é possível identificar algo em comum entre essas indústrias, que é a realização das medições atendendo a todas as especificações e no menor tempo e custo possível. Portanto, de acordo com Lindfors, Chang e Stones (1999), novas tecnologias de medição de distâncias têm sido desenvolvidas, principalmente desde a segunda metade do século passado, promovendo, principalmente, maior eficiência no processo de medição.

Essas indústrias vêm dando preferência para instrumentos de medições de distâncias que não requerem contato com a superfície a ser medida, permitindo que os mesmos sejam instalados em posições fixas, como numa linha de produção de alta capacidade, e que realizem as medições automaticamente, sem necessidade constante de recursos humanos. Para realizar a medição de distâncias longas, por sua vez, a preferência por instrumentos que não requerem contato se deve à praticidade, encurtando o tempo necessário para a realização das medições.

Dentre o universo dos instrumentos da metrologia dimensional para longas distâncias, os mais importantes que se enquadram nesses requisitos são os medidores eletrônicos de distância (MED). Fontes (2001) afirma que o desenvolvimento desse equipamento se tratou de uma grande inovação tecnológica da metrologia, pois retirou a necessidade de medição de distâncias através da medição direta por trenas, ou indireta por taqueometria, facilitando o procedimento e permitindo resultados a uma exatidão sub-milimétrica. O primeiro MED

surgiu na década de 1940, criado pelo cientista Erik Bergstrand, passando a ser comercializado somente na década seguinte (WHITTEN, 1986).

Apesar de o primeiro MED ser um instrumento grande e pesado, a evolução tecnológica deu origem a outros modelos mais convenientes. Assim, com o avançar das décadas, os MED passaram a ser acoplados a teodolitos, dando origem às estações totais, tornando-se equipamentos muito populares, permitindo realizar as medições e o transporte do mesmo de forma mais simples e eficiente.

Contudo, junto com a evolução dos MED ao longo do tempo, os usuários também evoluíram seus processos, requerendo instrumentos que gerem resultados cada vez mais exatos. Dessa forma, a incerteza de medição aceitável é cada vez menor. Quando anteriormente era aceitável assumir incertezas na ordem milimétrica, é muito comum encontrar hoje resultados especificados na ordem sub-milimétrica, dependendo da aplicação. Por isso, compreender os fatores que levam às incertezas de medição é fundamental na metrologia, visando garantir que as condições necessárias sejam atendidas.

Com o objetivo de garantir que essas condições sejam respeitadas, organizações de diferentes países possuem suas próprias regulamentações publicadas, padronizando os processos de medição. É fundamental que essas publicações sejam seguidas, pois normatiza o processo e garante a qualidade do resultado, além de promover a segurança para o usuário final da cadeia produtiva. Portanto, caso não sejam seguidas na prática, uma medição malfeita pode apresentar seu resultado fora da incerteza especificada em relação ao comprimento real, havendo chances de comprometer um projeto que, em indústrias como a aeronáutica ou de construção civil, ocasionam numa estrutura que careça da segurança necessária e, possivelmente, resulte num acidente fatal.

Assim, considerando a importância das normas existentes, as que tratam do processo de calibração dos instrumentos de medição estão entre as principais. Devido à importância em operar com instrumentos nas condições especificadas, existem normas que tratam exclusivamente da calibração de instrumentos, como no caso dos medidores eletrônicos de distância.

Embora seja fundamental que se realize periodicamente a calibração dos instrumentos de medição, no Brasil ainda existem poucos laboratórios acreditados pela Rede Brasileira de Calibração para a calibração de MED. Apesar de ser um país com forte presença industrial, entre as maiores economias do mundo e que requer a utilização de MED para diversas finalidades, as empresas, por vezes, necessitam enviar seus medidores eletrônicos de distância para realizar calibrações no exterior a fim de obter certificados reconhecidos

internacionalmente. Como o envio de MED para calibração em outros países incide em altos custos de transporte e do serviço de calibração, assim como existe uma grande complexidade burocrática e alfandegária, além de que o equipamento pode sofrer danos no transporte durante o retorno (LIMA; SILVA, 2017), não é incomum que algumas empresas posterguem a calibração de seus MED e utilizem os equipamentos quando os mesmos já não operam nas condições especificadas, reduzindo a qualidade das medições.

Portanto, considerando todos os fatores levantados, foi identificada a necessidade da implantação de laboratórios capazes de calibrar medidores eletrônicos de distância no Brasil, permitindo que as indústrias nacionais tenham acesso à calibração mais acessível e que requeira menos deslocamento. Assim, trata-se dessa necessidade como a justificativa central desta pesquisa, buscando contribuir para o desenvolvimento da metrologia do país com uma solução de baixo custo e com alto grau de confiabilidade.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Propor e validar uma solução de baixo custo para geração de comprimentos de referência para a calibração de medidores eletrônicos de distância.

1.1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos que guiarão este trabalho no alcance do objetivo geral são:

- Detalhar a revisão bibliográfica sobre métodos de calibração de MED;
- Propor uma técnica para a geração de comprimentos de referência de até 50 metros utilizando uma barra padrão calibrada e técnica de concatenação;
- Estimar a incerteza de medição;
- Testar o procedimento experimentalmente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MEDIDORES ELETRÔNICOS DE DISTÂNCIA

Medidores eletrônicos de distância (MED) são instrumentos amplamente utilizados na metrologia para realizar a medição de comprimentos. Esses instrumentos podem ser acoplados a outros equipamentos, como em estações totais, ou utilizados de forma independente, como no caso de trenas laser. Sua característica principal é obter as medições sem contato.

De acordo com Fontes (2001), os primeiros medidores eletrônicos de distância eram utilizados de forma independente, devido ao seu tamanho e peso. Após a redução de suas dimensões, os MED começaram a ser acoplados a teodolitos. Esses sistemas teodolito-MED são denominados estações totais. Além do grau de integração com o teodolito, Rüeger (1994) também classifica os MED de acordo com o alcance e a precisão de cada instrumento. Esses critérios de classificações são listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Critérios de classificação de medidores eletrônicos de distância conforme Rüeger (1994).

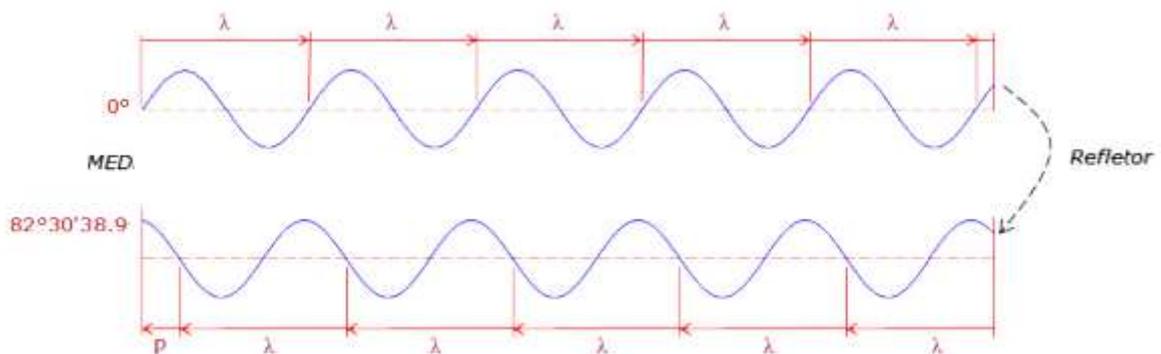
| Critério | Classificação | Valor |
|-----------------------------------|-----------------------|--|
| Alcance | Curto alcance | 0,1 m – 1000 m |
| | Médio alcance | 10 m – 10000 m |
| | Longo alcance | Até 120 km |
| Faixas de precisão | Desvio padrão | $\pm (5 \text{ mm} + 5 \text{ ppm})$ |
| | Desvio padrão | $\pm (1 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$ |
| | Desvio padrão | $\pm (0,2 \text{ mm} + 0,2 \text{ ppm})$ |
| Grau de integração com teodolitos | Totalmente eletrônico | - |
| | Modular eletrônico | - |
| | Semi-eletrônico | - |
| | Acoplado a telescópio | - |
| | Acoplado teodolito | - |
| | MED separados | - |

Fonte: Autor (2019).

Existem muitos princípios de funcionamento para a medição eletrônica de distância (RÜEGER, 1994). O método de pulso, presente em satélites lançados no espaço e equipamentos militares, consiste na emissão de um forte sinal, que viaja ao alvo e retorna até um receptor, percorrendo a mesma distância duas vezes. O tempo transcorrido entre a emissão e a recepção do sinal é utilizado para calcular a distância percorrida. Os métodos de Doppler, por sua vez, utilizam a frequência de micro-ondas para calcular a distância de instrumentos em movimento, como em sistemas de navegação via satélite. Outro princípio, o da interferometria, também é muito utilizado em instrumentos MED. Nesse método, um laser produzido a partir de uma fonte de luz passa por um separador, que desvia parte do feixe para um refletor móvel e a outra parte num refletor fixo. Os raios divididos retornam dos refletores e se encontram novamente no divisor, produzindo um padrão de interferência, que é recebido por um fotodetector. A análise do padrão de interferência ao longo do tempo permite a determinação da distância percorrida pelo refletor móvel

Contudo, o princípio de funcionamento mais comum em medidores eletrônicos de distância de médio alcance é o método da diferença de fases. Esse método consiste na medição da diferença entre a fase de uma onda contínua emitida e a fase da onda recebida após viajar até o refletor e ser recebida pelo receptor do instrumento. O método pode ser aplicado em ondas de luz, infravermelho e micro-ondas. A Figura 1 ilustra o princípio de funcionamento de um MED a partir da diferença de fases.

Figura 1 – Princípio de funcionamento de um MED a partir da diferença de fases.



Fonte: Pescod (2015).

O comprimento de onda λ emitido pelo MED é conhecido e sai do instrumento a um ângulo de fase 0° . Depois de viajar até o refletor, a onda retorna ao receptor a um ângulo entre 0° e 360° , produzindo um comprimento de onda parcial p , após percorrer o comprimento total

de $(n \lambda + p)$, sendo n o número de comprimentos de onda completados até retornar ao receptor (PESCOD, 2015). A partir de então, a informação é tratada e transformada no valor do comprimento até o refletor.

2.2. CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES ELETRÔNICOS DE DISTÂNCIA

A calibração dos instrumentos de medição é fundamental e considerada condição base para a realização de qualquer medição. Atualmente, algumas empresas exigem o certificado de calibração ao contratar um serviço de medição, visando atender aos altos padrões internacionais e garantindo a confiabilidade nos processos. A forma como essa exigência se dá pode variar conforme a legislação do país ou do instituto de certificação referenciado como padrão.

No Brasil, contudo, há uma carência por instituições de calibração de MED acreditadas. Em uma busca pela base de instituições acreditadas pela Rede Brasileira de Calibração (RBC), foram encontrados apenas seis laboratórios de calibração de estação total e trena a laser, ao inserir o nome do instrumento no campo “Serviço” da página de consulta de laboratórios. Os resultados da busca foram listados na Tabela 2. A coluna “CMC” apresenta os valores da “Capacidade de Medição e Calibração”, que corresponde à menor incerteza de medição que pode ser alcançada pelo laboratório para esse serviço de calibração.

Tabela 2 – Laboratórios de calibração de trena a laser e estação total acreditados pela RBC.

| Laboratório | Intervalo de Medição | CMC |
|--------------------|-----------------------------|------------|
| A | 1,00 m - 18,00 m | 3,0 mm |
| B | Até 10,00 m | 0,8 mm |
| C | Até 3,00 m | 0,5 mm |
| | 3,00 m - 25,00 m | 3,0 mm |
| D | Até 10,00 m | 0,65 mm |
| | 10,00 m - 100,00 m | 2,5 mm |
| E | Até 3,00 m | 3,0 mm |
| | 3,00 m - 10,00 m | 4,0 mm |
| F | Até 5,00 m | 0,65 mm |

Fonte: Autor (2019).

Em relação à frequência da calibração, não há um consenso entre as normas, pois muitas, como a ABNT NBR ISO/IEC 17025, não especificam a periodicidade em que deve

ser realizada a calibração. No entanto, os institutos reguladores reforçam que é necessário que seja feita uma verificação das condições dos instrumentos frequentemente, devido a diversos fatores que podem levar à deterioração do desempenho metrológico do mesmo.

Lima e Silva (2017) citam as condições climáticas e o transporte como os principais fatores que causam essa deterioração em MED. Por isso, há uma forte motivação para que a calibração dos instrumentos de medição seja realizada em laboratórios próximos ao local de utilização e em condições climáticas similares, como temperatura, velocidade do vento, umidade e pressão atmosférica, além da ausência de precipitação.

Suarez (2014) defende que a periodicidade da calibração não seja determinada de forma exata, pois depende de uma série de eventos, como se o equipamento sofreu alguma avaria ou forte impacto, se passou por alguma manutenção, se foi adquirido recentemente ou utilizado por um terceiro. Além disso, o tempo que o instrumento ficou armazenado entre uma utilização e outra e as recomendações dos fabricantes devem ser considerados (SILVA, 2008).

Apesar de também não afirmar a frequência exata em que uma calibração deve ser realizada, Rüeger (1994) sugere que medições para testar as condições dos instrumentos devem ser realizadas quando o MED é adquirido e em intervalos de seis meses a um ano. Essas medições para teste não se tratam do processo de calibração em si, mas apenas uma verificação se as condições de operação estão de acordo com o especificado, conforme procedimentos apresentados pela norma ISO 17123-4 e ISO 16331-1.

2.2.1. ISO 17123-4:2012

Apesar de existirem várias instituições que regem a normatização do processo de verificação e calibração de instrumentos de medição em diferentes países, destaca-se neste trabalho a série de normas ISO 17123, intitulada *Optics And Optical Instruments - Field Procedures For Testing Geodetic And Surveying Instruments*, que aborda os procedimentos de campo para a determinação da incerteza de medição de instrumentos óticos utilizados em ensaios topográficos. Essa norma é dividida em algumas partes, que abordam desde instrumentos de medições de ângulos até estações totais.

Dentre essas diferentes partes, a quarta delas (ISO 17123-4) se refere exclusivamente aos procedimentos de testes voltados para medidores eletrônicos de distâncias. O objetivo da ISO 17123-4 é fornecer uma maneira uniforme de se avaliar MED com o objetivo de garantir que os mesmos atendam aos requisitos dos usuários.

Antes de apresentar os procedimentos, no entanto, a ISO 17123-4 destaca alguns requisitos que devem ser respeitados pelos operadores do instrumento, que são:

- Verificar se o erro máximo especificado pelo fabricante do equipamento atende à tarefa a ser realizada;
- Confirmar que o instrumento está em boas condições funcionais, sem apresentar defeitos;
- Usar somente equipamentos de apoio, como o tripé e refletores, conforme recomendado pelo fabricante;
- Determinar as condições meteorológicas no momento em que se realiza o procedimento, de forma que essas condições sejam corrigidas no cálculo.

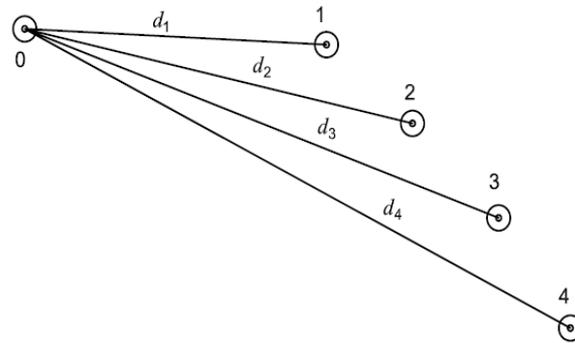
Após enumerar as condições fundamentais, a norma apresenta dois procedimentos para a avaliação da precisão dos MED: o “Procedimento de teste simplificado” e o “Procedimento de teste completo”.

O procedimento simplificado é recomendado para estimar se a precisão do MED está de acordo com o especificado. Por ser um procedimento mais simples, é indicado para que operadores realizem antes de iniciar novos levantamentos, após o equipamento ter passado por algum evento que pudesse comprometer sua funcionalidade, ou num intervalo de tempo de até um ano desde a última verificação.

O procedimento simplificado requer poucas medições. Portanto, uma das desvantagens desse procedimento está na impossibilidade de estimar valores significativos para a precisão.

De acordo com a norma, o procedimento deve ser realizado num campo de testes com pelo menos quatro refletores distribuídos ao longo da área, conforme demonstra a Figura 2. As distâncias entre os pontos devem ser conhecidas. Caso contrário, devem ser medidas a partir de uma referência de alta precisão. O MED a ser verificado é posicionado de forma fixa ao longo todo o procedimento na posição 0 e, a partir dali, são feitas as medições das distâncias até a posição de cada refletor (pontos 1 a 4). Cada medição deve ser realizada três vezes e a média obtida será utilizada para comparar com o valor da distância conhecida.

Figura 2 – Procedimento Simplificado



Fonte: ISO (2012).

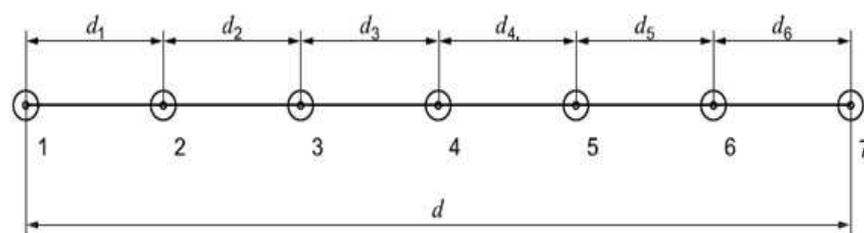
Os cálculos consistem na verificação se a média das medições indicadas está dentro dos valores conhecidos para cada distância (d_i), considerando a tolerância $\pm p$. Se as diferenças entre a indicação e o valor conhecido forem acima do requisitado pelo usuário, é necessária adotar o procedimento completo para uma investigação mais profunda para chegar a uma conclusão a respeito da precisão do MED.

Caso todas as diferenças entre as indicações e as distâncias conhecidas possuam o mesmo sinal (positivo ou negativo), a ISO recomenda a suspeita de que um erro sistemático esteja influenciando a performance do MED. Uma das suspeitas sugeridas é de erro de escala. Se nenhuma fonte de erro sistemática for reconhecida, deve-se realizar também o procedimento completo.

O procedimento de teste completo deve ser realizado quando se deseja avaliar a precisão de um MED em condições de campo. Através desse procedimento é possível estimar a incerteza padrão experimental do instrumento.

Diferentemente do procedimento simplificado, é necessário uma linha de base com sete pontos fixos distribuídos ao longo de um comprimento entre 300 e 600 metros, conforme ilustrado na Figura 3. As distâncias entre os pontos não necessitam ser conhecidas.

Figura 3 – Linha de teste do procedimento completo



Fonte: ISO (2012).

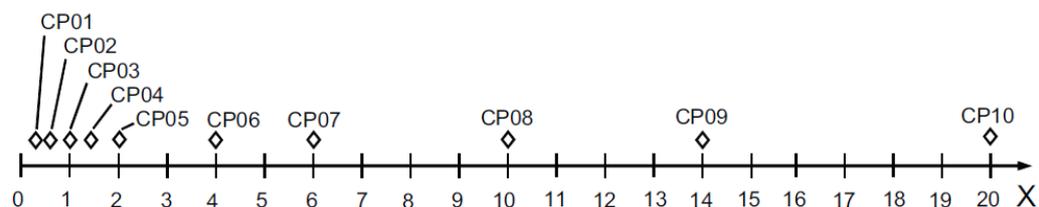
É possível verificar na Figura 3 que não existe um ponto de origem (“ponto zero”), pois o MED é posicionado em todos os pontos da linha. Deve-se medir todas as 21 combinações possíveis, de forma que cada medição represente distâncias diferentes, pois a norma requer que a distribuição dos pontos ao longo da linha de testes não seja uniforme.

2.2.2. ISO 16331-1:2017

A série de normas ISO 16331 foi criada para padronizar procedimentos de teste em laboratório para equipamento utilizados em topografia e geodésia. A primeira parte da norma trata da performance de medidores eletrônicos de distância a laser portáteis, como trenas laser. A diferença para a ISO 17123, que especifica métodos de checagem das especificações de MED sem utilização equipamentos adicionais, é que a ISO 16331-1 introduz em sua norma a utilização de instrumentos de laboratório que usuários tradicionais não possuem acesso. Dentre os equipamentos necessários, estão placas de alvo com medidas e índice de refletividade especificado, lâmpada de iluminação de fundo e câmara de temperatura.

Além disso, na ISO 16331-1 também é necessário que o sistema de medição de referência seja calibrado, com incerteza de no máximo 20% da incerteza de medição esperada do MED sendo testado. A linha de base apresentada é similar à linha de base do método de teste completo da ISO 17123-4, mas com dez pontos, ao invés de apenas sete da outra norma. A Figura 4 ilustra o modelo da linha de base apresentado na norma.

Figura 4 – Linha de base para verificação de MED conforme ISO 16331-1.



Fonte: ISO (2017).

Através da ISO 16331-1, além de verificar se o instrumento está dentro do especificado, é possível estimar as fontes de incerteza de principal influência e a incerteza expandida do processo de medição. Portanto, é possível afirmar que o procedimento apresentado nessa norma é mais robusto que os procedimentos propostos na ISO 17123-4.

Contudo, sua aplicação depende de equipamentos de acesso limitado, tornando a ISO 17123-4 uma opção para usuários tradicionais.

2.2.3. Calibração direta (linhas de base) e indireta (bancadas interferométricas)

Medidores eletrônicos de distância podem ser calibrados de forma direta ou indireta. Na forma direta, o MED é calibrado a partir da comparação com o comprimento de referência de linhas de base, composto normalmente por pilares, com distâncias conhecidas entre si. Encontra-se esse método em ambientes externos, com comprimentos que passam de 1 km, e também em laboratórios, com distâncias que variam entre 20 m – 50 m. Para a construção de uma linha de base para calibração direta, geralmente são construídos pilares com fundações robustas que evitam que a movimentação do solo desloque a posição de seu centro, onde é instalado o alvo, conforme ilustrado na Figura 5. A incerteza dos comprimentos de referência materializados varia entre 0,5 mm – 4,00 mm, podendo ser reduzida em aplicações laboratoriais (BRAUN; DVORACEK; ŠTRONER, 2014).

Figura 5 – Estrutura de uma linha de base para calibração direta de MED.



Fonte: BRAUN; DVORACEK; ŠTRONER (2014).

Além da calibração direta por linhas de base de pilares, há outros meios de calibração direta utilizados atualmente em laboratórios de metrologia. No laboratório do instituto CEM, na Espanha, a estrutura consiste em suportes fixados na parede, espaçados a cada cinco metros, onde são posicionados o MED e os refletores. Contudo, essa estrutura se mostra prejudicial à qualidade da calibração, pois foram constatados erros de forma na superfície do

suporte (WIŚNIEWSKI; RAMOTOWSKI, 2014). Além disso, por se tratar de uma estrutura menos robusta, a calibração de suas distâncias deve ser realizada com maior frequência, o que é uma desvantagem, pois requer a utilização de instrumentos de alta exatidão, encarecendo o método. Uma estrutura similar foi encontrada instalada na parede de um dos corredores do laboratório de metrologia dimensional da Fundação CERTI, em Florianópolis.

No método de calibração indireta, por sua vez, o MED é calibrado com base numa comparação com as medições de outro instrumento, de alta exatidão e calibrado. Em laboratórios de calibração a ambientes controlados o método indireto é o mais aplicado (BRAUN; DVORACEK; ŠTRONER, 2014). A técnica mais comum observada é através de bancadas interferométricas. Para ter-se uma ideia da popularidade dessa técnica na calibração de MED, num estudo da EURAMET com 13 laboratórios nacionais de metrologia da Europa, foi constatado que 10 deles utilizam a calibração por bancadas interferométricas (WIŚNIEWSKI; RAMOTOWSKI, 2014). A técnica utiliza laser interferômetro para comparar com a medição dos MED.

As bancadas interferométricas são equipamentos bem diferentes das observadas para calibração direta, pois são constituídas de longas estruturas com trilhos móveis, sobre os quais se deslocam os alvos de uma extremidade a outra, conforme ilustrado na Figura 6. Apesar de possuir a vantagem de ser um método de calibração de alta exatidão, o alto custo envolvido na sua estrutura torna o método basicamente restrito a laboratórios de institutos nacionais de metrologia.

Figura 6– Bancada interferométrica



Fonte: WIŚNIEWSKI; RAMOTOWSKI (2014).

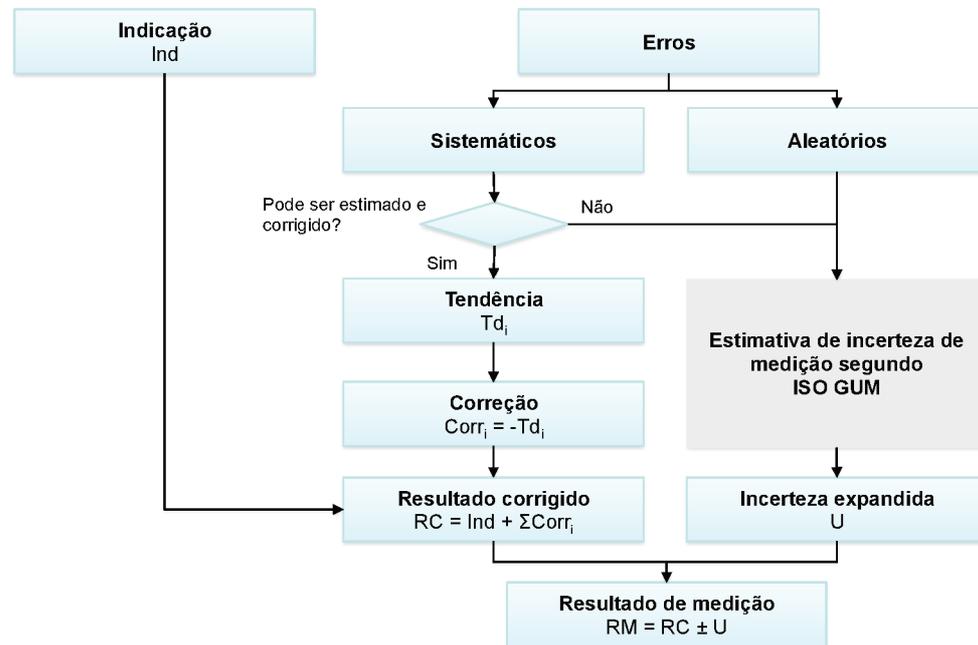
2.3. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Apesar de que, intuitivamente, espera-se que a indicação de uma medição corresponda ao valor verdadeiro do mensurando, não é isso o que ocorre no processo de medição, devido a diversas fontes de erro que afetam o resultado indicado. Medidores eletrônicos de distância sofrem os efeitos de uma variedade de erros inerentes às propriedades óticas e eletrônicas do instrumento e também erros relacionados a fatores externos ao equipamento (RÜEGGER, 1994). Quando se deseja obter a distância entre um ponto e outro, devem ser levados em consideração todos os aspectos que afetam o resultado da medição, como os fatores ambientais, as imperfeições do sistema de medição e a influência do operador.

Por se tratar de algo inevitável no processo de medição, esse tópico é abordado de forma imprescindível na metrologia, pois as principais fontes de erro precisam ser identificadas, assim como seus impactos necessitam ser quantificados e seus efeitos reduzidos. Essa abordagem é fundamental para que os erros não comprometam a qualidade da medição. Albertazzi e Souza (2008) discutem os erros de medição em detalhes, contemplando desde a natureza do erro até os caminhos para obter resultados confiáveis na presença dos mesmos. Os autores dividem os erros de medição em dois tipos de parcelas, denominados erros sistemáticos e aleatórios.

O procedimento geral para tratar erros de medição é apresentado na Figura 7. Os erros sistemáticos correspondem à parcela previsível do erro de medição. Por ter uma influência já esperada sobre o processo de medição, sua tendência (Td_i) pode ser quantificada através das médias dos erros de várias medições para um mesmo mensurando, nas mesmas condições de medição. Essa tendência deve, sempre que possível, ser corrigida através da correção ($Corr_i$), que corresponde ao mesmo valor, porém de sinal oposto, da tendência. Quando os erros sistemáticos não podem ser corrigidos, devem ser considerados na estimativa de incerteza juntamente com os erros aleatórios.

Figura 7 – Como tratar os erros de medição.



Fonte: Autor (2019).

Os erros aleatórios, por sua vez, correspondem à parcela do erro que não pode ser prevista, influenciando cada medição de uma forma diferente. O erro aleatório é a componente do erro que faz com que cada repetição resulte em diferentes indicações. Diferentemente dos erros sistemáticos, os erros aleatórios não podem ser corrigidos e precisam ser modelados estatisticamente no âmbito da estimativa de incerteza de medição.

2.3.1. Métodos para estimativa de incerteza

O principal método aplicado para estimativa de incerteza encontrado na bibliografia é o guia GUM - *Guide to the expression of uncertainty in measurement* (JCGM, 2008a), utilizado internacionalmente pela comunidade técnico-científica. Os conceitos apresentados no GUM auxiliam os trabalhos desenvolvidos por institutos de diversos países, uma vez que se tornou um guia amplamente utilizado quase todos os países.

Apesar de ser conhecido como um guia que unificou a metodologia para a estimativa de incertezas, o GUM possui suas limitações (EZHELA, 2008). Para estimar as incertezas através do GUM, é necessário compreender os efeitos de cada grandeza de entrada sobre a grandeza de saída (resultado da medição) utilizando as derivadas parciais (coeficientes de sensibilidade) do modelo matemático do processo de medição em relação a cada fonte de

incerteza (TREVISAN; FABRICIO, 2015). As incertezas estimadas pelo GUM são obtidas a partir da aproximação de uma série de Taylor ao modelo matemático. Em casos em que é difícil equacionar cada fonte de incertezas, como em modelos de distribuição de probabilidade assimétricas, outros métodos são recomendados (SOUSA, 2004). A simulação de Monte Carlo, conforme o Suplemento 1 ao GUM (JCGM, 2008b), é um dos principais métodos alternativos ao GUM clássico.

Uma das principais vantagens da simulação de Monte Carlo é obter a estimativa da função de densidade de probabilidade para o mensurando ao invés de simples parâmetros estatísticos. Além disso, pode ser aplicado independente da natureza do modelo de medição, como modelos não-lineares e grandezas de entrada com distribuição assimétrica de probabilidades. Contudo, para se chegar a um nível de confiança acima de 95%, normalmente se requer uma quantidade grande de iterações na simulação.

Neste trabalho, o método aplicado para estimar a incerteza do processo de medição proposto é o GUM clássico, por ser a principal metodologia utilizada na metrologia dimensional e se mostrar eficaz para a proposta. Por isso, os principais conceitos aqui apresentados são baseados em suas diretrizes.

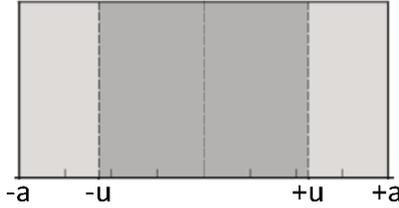
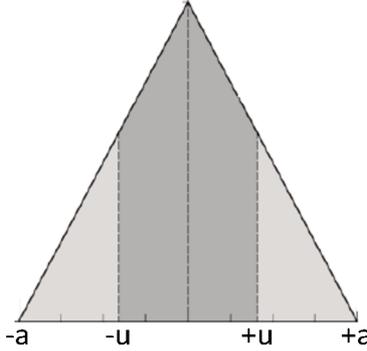
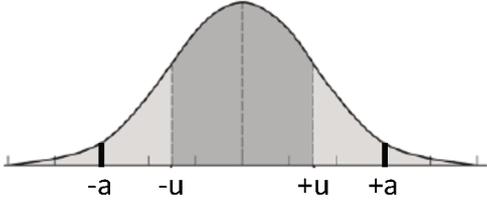
2.3.2. Procedimento para estimativa de incerteza de medição

O primeiro passo é identificar as fontes de incerteza e construir um modelo matemático que relacione as fontes de incerteza e demais grandezas de entrada com a grandeza de saída. Feito isso, é preciso compreender a contribuição de cada uma das fontes de incertezas pela estimativa da incerteza-padrão (u_i). De acordo com o GUM, existem duas maneiras de se determinar a incerteza-padrão para cada fonte aleatória de erros: procedimentos estatísticos (Tipo A) e não-estatístico (Tipo B). Ambos os tipos são baseados em distribuições de probabilidade. Enquanto no procedimento do Tipo A a incerteza é estimada a partir de medições repetidas do mesmo mensurando, o procedimento do Tipo B utiliza informações conhecidas *a priori* ou deduzidas por observações das suas características sobre o comportamento aleatório da fonte de incerteza. Albertazzi e Souza (2008) afirmam que algumas vezes não é prático utilizar os procedimentos Tipo A, que podem requerer muito mais tempo e recurso.

Os modelos de distribuição de probabilidades são utilizados para descrever o comportamento da distribuição dos erros de cada fonte de incertezas. A depender da fonte, nem sempre é fácil deduzir qual a distribuição de probabilidades mais adequada. No entanto, de acordo com o GUM, há três principais modelos: distribuição retangular, distribuição triangular e distribuição normal.

Quando há a mesma chance de que um erro de medição atrelado a uma fonte de incertezas seja de qualquer valor entre um intervalo $+a$ e $-a$ a distribuição retangular deve ser utilizada. No modelo triangular, a chance de ocorrência dos valores localizados no centro do intervalo são maiores do que os localizados nos limites inferiores e superiores. Por fim, há a curva de distribuição normal (gaussiana), que não possui extremidades definidas, pois sua curva se alonga de forma infinita. Os valores de $-a$ e $+a$ representam os limites que definem 95,45% de área abaixo da curva. Para cada um dos modelos de distribuição de probabilidade, o respectivo divisor para obtenção da incerteza padrão u a partir do semi-intervalo a é encontrado conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Modelos de distribuição de probabilidade para o cálculo da incerteza-padrão

| Modelo de distribuição | Curva | Divisor |
|--|---|--------------------------|
| Retangular |  | $u = \frac{a}{\sqrt{3}}$ |
| Triangular |  | $u = \frac{a}{\sqrt{6}}$ |
| Normal para probabilidade de abrangência de 95,45% |  | $u = \frac{a}{2}$ |

Fonte: Autor (2019).

Além de quantificar o semi-intervalo do espaço amostral para cada fonte de incerteza e definir seu modelo de distribuição de probabilidades, é necessário calcular os coeficientes de sensibilidade de cada fonte. Segundo o GUM, os coeficiente de sensibilidade (C_i) correspondem às derivadas parciais que descreve o comportamento da variação da estimativa de saída y com variações dos valores de entrada $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, ou seja, $C_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$. A importância em se estimar o coeficiente de sensibilidade para cada uma das fontes de incerteza é quantificar a influência de cada sobre o resultado da medição. A incerteza-padrão pode ser obtida através da Equação 1.

$$u_i(y) = |C_i|u_i(x) \quad (1)$$

A combinação dos efeitos de todas as incertezas-padrão resulta na incerteza combinada (u_c), que representa uma estimativa do desvio-padrão do processo de medição e, portanto, pode representar a dispersão dos valores atribuídos ao mensurando. A incerteza

combinada é o resultado da combinação das ações das componentes aleatórias de todas as fontes de incerteza que afetam o processo de medição. Se as diversas fontes de incerteza puderem ser consideradas independentes, a incerteza combinada pode ser obtida conforme a Equação 2.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum u_i(y)^2} \quad (2)$$

Ao final, a incerteza combinada deve ser multiplicada por um fator de abrangência (k) para obtenção da incerteza expandida (U) para a probabilidade abrangência desejada, como mostra a Equação 3.

$$U(y) = k \cdot u_c(y) \quad (3)$$

2.4. RESUMO DA REVISÃO BIBLIGRÁFICA

Com base nas informações levantadas na bibliografia, foi possível enfatizar a importância da calibração de medidores eletrônicos de distância. A calibração não é um processo simples e nem de fácil acesso para usuários de MED. Contudo, é fundamental para garantir a qualidade das medições.

A dificuldade na calibração de MED se deve ao elevado custo da estrutura e equipamentos necessários para que um processo robusto de calibração seja conduzido.

A calibração direta se mostrou o procedimento mais viável para a calibração de MED, ficando o grande obstáculo na geração dos comprimentos de referência de forma rápida e de baixo custo, que é o objetivo principal deste trabalho. Com as informações apresentadas nesta revisão bibliográfica, verifica-se que há grande compatibilidade científica entre o que a proposta deste trabalho oferece e o que demandam os usuários de MED, justificando o desenvolvimento do mesmo.

3. MÉTODO PARA A GERAÇÃO DE COMPRIMENTOS DE REFERÊNCIA

3.1. LEAPFROGGING COM MEDIDAS MATERIALIZADAS DE COMPRIMENTO

Como o grande desafio no desenvolvimento de uma estrutura de calibração e verificação de medidores eletrônicos de distância é disponibilizar comprimentos de referência, este trabalho buscará aplicar o conceito conhecido como *leapfrogging* para alcançar esse objetivo.

A origem do termo *leapfrogging* surgiu de uma brincadeira popular entre crianças, que consiste no deslocamento decorrente de uma repetição de saltos, de uma sobre a outra. O objetivo da brincadeira é percorrer a maior distância possível ou uma distância determinada em menor tempo, conforme ilustrado na Figura 8.

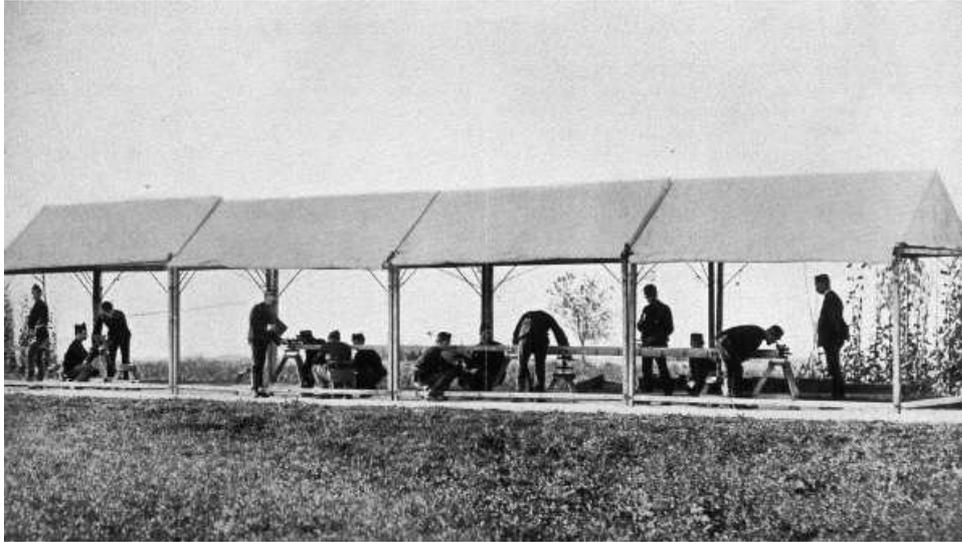
Figura 8 – Brincadeira de *Leapfrogging*.



Fonte: Oberlin News Tribune (2016).

A técnica de *leapfrogging* foi, por muito tempo, aplicado na determinação de linhas de base de malhas geodésicas. A técnica utiliza repetidas concatenações de comprimentos menores conhecidos para calcular longas distâncias. Essa técnica foi amplamente utilizada até o século XX, quando foi substituída por novos métodos (MITTLER; GLITSCH, 2005). A Figura 9 representa uma imagem da aplicação da técnica do *leapfrogging* na materialização de uma linha de base geodésica no século XIX.

Figura 9– Técnica de concatenação de medidas no século XIX.



Fonte: Eidgenössisches Departement Für Verteidigung (2018).

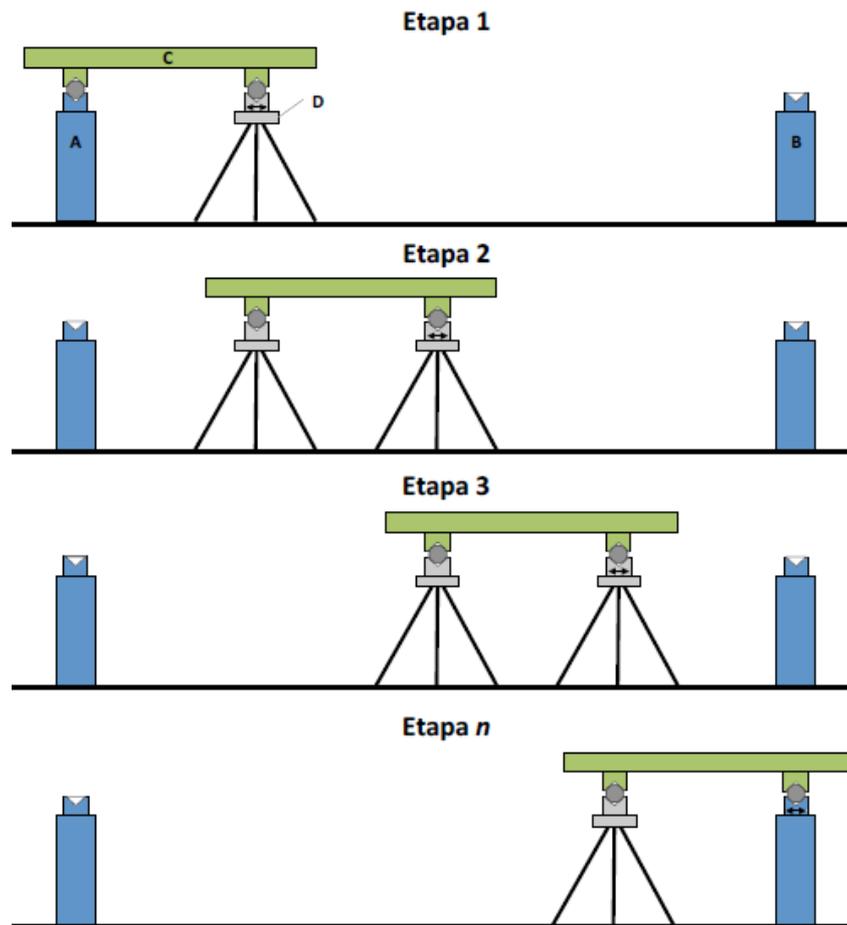
3.2. TÉCNICA PROPOSTA

Para este trabalho, o conceito de *leapfrogging* é aplicado com o objetivo de obter comprimentos de referência de alta exatidão a partir da concatenação de uma barra calibrada em laboratório. O grande desafio é desenvolver uma técnica de concatenação de forma que a incerteza do comprimento de referência gerado seja suficientemente baixa para a calibração de medidores eletrônicos de distância. Por isso, propõe-se a utilização de uma barra-padrão calibrada com baixa incerteza de medição e dispositivos de transferência de comprimento que garantam boa repetibilidade na concatenação dos comprimentos, que serão apresentados na seção 4.1.

A técnica proposta neste trabalho consiste na repetição de acoplamentos sucessivos da barra-padrão nos dispositivos de transferência (concatenações de comprimentos), conforme ilustrado na Figura 10. O objetivo do método é materializar uma distância conhecida entre os pontos A e B após n etapas de concatenações. A barra-padrão é indicada pela letra C, enquanto os dispositivos de transferência, que são equipamentos de apoio fixados sobre tripés, estão identificados pela letra D. A distância entre dois dispositivos D consecutivos, após cada transferência de comprimento, deve coincidir com o comprimento da barra-padrão, dentro de uma margem de tolerância suficientemente pequena.

A exatidão obtida a partir da técnica com o *leapfrogging* influenciará diretamente a incerteza do procedimento de calibração final dos medidores eletrônicos de distância. A estimativa da incerteza desse processo de transferência de comprimento será discutida na seção 4.3.

Figura 10– Técnica proposta para geração de comprimentos de referência.



Fonte: Autor (2019).

3.3. MODELO MATEMÁTICO E FONTES DE INCERTEZA

De acordo com o GUM (JCGM, 2008), a indicação de uma medição, sem contabilizar os efeitos das fontes de erro que atuam sobre o processo, deve ser considerada apenas uma estimativa do valor do mensurando. Devido às variações oriundas dos efeitos das diversas fontes que impactam o resultado da medição, estimar a incerteza de medição da técnica proposta é fundamental na validação do método experimentalmente. Além disso, identificar e

quantificar todas as fontes de incerteza é necessário para que sejam corrigidas possíveis tendências, conforme será apresentado no modelo matemático, bem como abranger os efeitos das componentes aleatórias dos erros no resultado final da medição.

3.3.1. Descrição das fontes de incertezas

O primeiro passo a ser seguido é a análise do processo de medição, elencando todas as possíveis fontes de incerteza, conforme sugere Albertazzi e Souza (2008). Essa análise deve ser realizada *a priori* e de forma integrada com a etapa de planejamento do experimento. O principal objetivo de se realizar a análise *a priori* é ter a compreensão de todos os fatores que podem influenciar o processo de medição no momento em que o experimento ainda é planejado, garantindo que todos os fatores possam ser avaliados durante a execução do experimento e permitindo a elaboração do modelo matemático do processo de medição.

Para este trabalho, foi realizado um exercício de *brainstorming* em conjunto com os membros do Laboratório de Geodésia Industrial com o objetivo de identificar as principais fontes de incerteza que possam impactar no resultado da medição. Todas as possíveis fontes de incerteza foram ilustradas são apresentadas no diagrama da Figura 11.

Figura 11 – Diagrama das fontes de incerteza.



Fonte: Autor (2019).

A Tabela 4, por sua vez, apresenta cada fonte de incerteza e explica, resumidamente, como se dá o efeito de cada sobre o processo de medição da técnica proposta.

Tabela 4 – Fontes de incerteza do processo de medição

| Símbolo | Descrição | Caracterização |
|---------------------|--|---|
| $U(L_{barra})$ | Incerteza do comprimento da barra-padrão | Incerteza proveniente do processo de calibração da barra. |
| $U(\alpha_{barra})$ | Incerteza do coeficiente de dilatação térmica da barra | A incerteza do coeficiente de dilatação influencia na correção da dilatação térmica. |
| $U(T)$ | Incerteza na medição da temperatura | A incerteza na medição da temperatura, assim como a incerteza da dilatação térmica, influencia na correção da dilatação térmica. |
| e_{trans} | Erro do processo de transferência de comprimento | Erros resultantes do processo de transferência do comprimento da barra para um par de dispositivos de transferência. |
| e_{estab} | Erro devido à estabilidade dos dispositivos de transferência | Erros resultantes de deslocamentos involuntários dos dispositivos de transferência entre duas concatenações sucessivas. |
| $U(\theta)$ | Incerteza do desalinhamento angular dos pontos | Como a técnica busca determinar um longo comprimento de referência (unidimensional, eixo x) a partir de sucessivas concatenações, o desalinhamento nas demais direções (eixo y e z) em cada concatenação contribui com uma incerteza ao valor final da medição. |

Fonte: Autor (2019).

3.3.2. Modelo matemático do processo de medição e coeficientes de sensibilidade

Depois de estabelecer as fontes de incerteza que atuam sobre o processo de medição proposto desenvolveu-se o modelo matemático para a obtenção da distância materializada após cada transferência de comprimento, a partir da posição anterior. Assim, a distância materializada depois da i -ésima transferência de comprimento L_i pode ser calculada de acordo com a Equação 4, para $L_0 = 0$.

$$L_i = L_{i-1} + L_{barra} + L_{barra} \alpha_{barra} (T_i - 20^\circ C) + e_{trans} + e_{estab} - L_{barra} (1 - \cos \theta) \quad (4)$$

Onde,

L_i : distância materializada após a i -ésima transferência de comprimento;

L_{barra} : comprimento calibrado da barra;

α_{barra} : coeficiente de dilatação térmica da barra;

T_i : temperatura da barra-padrão durante a i -ésima transferência de comprimento;

e_{trans} : erro decorrente do processo de transferência do comprimento;

e_{estab} : erro decorrente da estabilidade dos dispositivos de transferência;

θ : ângulo de desalinhamento do par de dispositivos de transferência.

Além de estabelecer o modelo matemático do processo de medição, é necessário calcular os coeficientes de sensibilidade para cada fonte de incertezas, conforme tratado na seção 2.3. Portanto, de acordo com o procedimento para a estimativa da incerteza, foram modeladas as equações para o cálculo das estimativas dos coeficientes de sensibilidade para cada uma das fontes de incerteza, que se encontram abaixo:

i) Calibração da barra:

$$C_{L_{barra}} = \frac{\partial L_n}{\partial L_{barra}} = \alpha_{Barra} (T_i - 20^\circ C) + \cos \theta$$

ii) Coeficiente de dilatação térmica da barra:

$$C_\alpha = \frac{\partial L_n}{\partial \alpha_{Barra}} = L_{Barra} \cdot (T_i - 20^\circ C)$$

iii) **Medição de temperatura:**

$$C_T = \frac{\partial L_n}{\partial T} = L_{Barra} \cdot \alpha_{Barra}$$

iv) **Erro de transferência:**

$$C_{e_{trans}} = \frac{\partial L_n}{\partial e_{trans}} = 1$$

v) **Estabilidade dos dispositivos de transferência:**

$$C_{e_{estab}} = \frac{\partial L_n}{\partial e_{estab}} = 1$$

vi) **Desalinhamento dos pontos:**

$$C_\theta = \frac{\partial L_n}{\partial \theta} = -L_{Barra} \cdot \sin \theta$$

A quantificação das diversas fontes de incerteza será abordada no próximo capítulo.

4. TESTE DE CONCEITO

De forma a testar a técnica proposta, foi planejado um experimento que oferecesse resultados suficientes para uma conclusão acerca da viabilidade prática da utilização do conceito de *leapfrogging* na geração de comprimentos de referência. O objetivo principal do experimento é, a partir das medições dos comprimentos de referência gerados com técnica de concatenação de distâncias, além de outros dados relevantes, comparar os resultados obtidos com um valor de referência e, com isso, concluir se a técnica e a estimativa de incerteza de medição são válidos. Para tal, serão utilizadas como referência as medições de uma estação total robótica para comparar aos resultados determinados a partir do modelo matemático (Equação 4) com o *leapfrogging*.

Além disso, a realização do experimento também se faz necessária para a elaboração de um balanço de incertezas completo, já que algumas fontes de incerteza devem ser quantificadas experimentalmente.

Por fim, com o balanço de incertezas elaborado, é então calculada a estimativa de incerteza de medição da técnica. Caso a técnica seja validada, a estimativa de incerteza da medição obtida servirá para guiar medições futuras que utilizem o método.

4.1. EQUIPAMENTOS

Para a aplicação da técnica de concatenação proposta, foram utilizados os equipamentos listados abaixo.

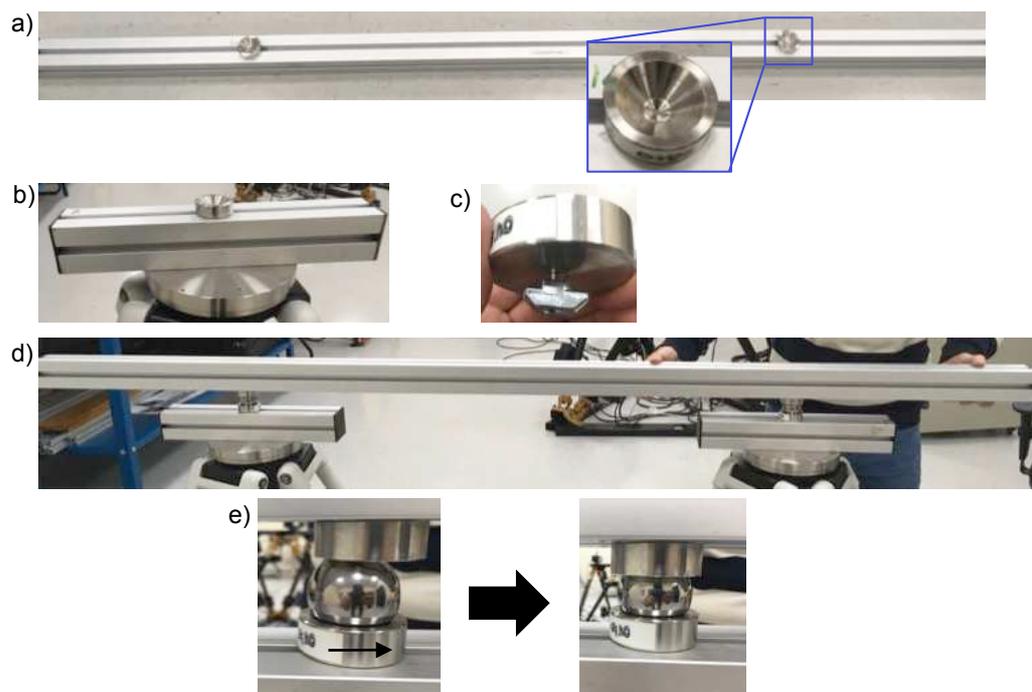
a) Barra-padrão:

A barra-padrão, feita de alumínio (Figura 12-a), foi calibrada em laboratório e possui furos cônicos, denominados de “ninhos” (em destaque na Figura 12-a), que irão permitir o acoplamento da barra aos dispositivos de transferência. A distância nominal entre os dois ninhos da barra é de aproximadamente 1121 mm. A calibração da barra-padrão será discutida na seção 4.3.

b) Dispositivos de transferência:

Os dispositivos de transferência são equipamentos que foram construídos a fim de replicar o comprimento da barra-padrão. Cada dispositivo também possui um ninho (Figura 12-b), utilizados para a concatenação do comprimento da barra. Nos dispositivos de transferências, os ninhos são fixados com o auxílio de porcas em forma de “T” (Figura 12-c), que podem ser afrouxadas permitindo a movimentação dos ninhos ao longo dos trilhos dispositivos (Figura 12-e). O objetivo da movimentação dos ninhos é permitir o acoplamento da barra aos dispositivos sobre tripés utilizando o auxílio de duas esferas de precisão com diâmetro de 38,1 mm, resultando num acoplamento capaz de replicar o comprimento da barra com alta exatidão (Figura 12-d e Figura 12-e).

Figura 12 – Protótipos para o teste de conceito.



Fonte: Autor (2019).

c) Estação Total:

Foi utilizada na realização do experimento uma estação total robótica da marca Leica Geosystems modelo TS12. A estação total foi aplicada em cada etapa (concatenação) do processo de medição a fim de obter dados que servirão de referência para comparar com o

método do *leapfrogging*. A precisão¹ (repetibilidade) do equipamento é de 1,0 mm + 1,5 ppm, segundo o fabricante, e o instrumento apresenta resolução de 0,1 mm.

d) Estação meteorológica portátil marca Kestrel modelo 4500:

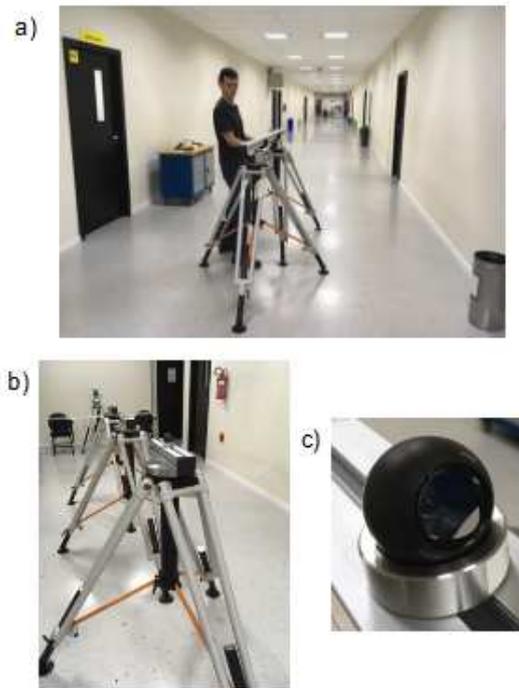
A aplicação de uma estação meteorológica se faz necessária para registrar as temperaturas ao longo do experimento. O instrumento utilizado foi instalado junto à barra-padrão com o auxílio de fita adesiva. Isso se deve ao interesse em se obter, principalmente, a temperatura da barra em cada etapa, visto que seu comprimento sofre efeito de expansão térmica.

4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido num longo corredor, com cerca de 120 metros de comprimento no prédio principal do Campus da UFSC Joinville. Um tripé com um dispositivo de transferência foi mantido fixo, simulando um pilar de uma linha de base. Outros dois tripés com dispositivos de transferência foram utilizados para as sucessivas concatenações. A preparação do experimento é ilustrada na Figura 13 e todas as etapas são descritas conforme procedimento abaixo.

¹ A estação total foi adquirida com certificado de calibração do fabricante em 2015.

Figura 13 – Realização do Experimento



Fonte: Autor (2019).

i) Nivelamento dos Tripés

Antes de começar a instalação dos equipamentos, deve-se certificar que os tripés, que são as estruturas de apoio tanto para a estação total, quanto para os dispositivos de transferência estão devidamente nivelados. Cada tripé possui um ajuste de altura em cada “pé de apoio”, que devem ser regulados para que cada fique numa altura aproximada ao dos demais tripés, evitando erros de grosseiros de desalinhamento (eixo z) no processo de transferência de comprimento.

ii) Instalação da estação total:

A estação total é instalada em um ponto fixo, próximo ao tripé fixo que simula a origem da linha de referência, onde deve permanecer ao longo de todo o procedimento de medição. Por isso, ela deve ser posicionada num local com pouco fluxo de pessoas. A origem da estação total deve estar à mesma altura dos dispositivos de transferência nos tripés.

iii) Determinação da direção do alinhamento angular:

Na extremidade oposta a qual a estação total foi instalada, ou seja, no final do comprimento a ser materializado, é posicionado um refletor (Figura 13-c) no ninho de um dispositivo de transferência sobre um dos tripés e seu ângulo em relação à estação total é configurado como ângulo de referência $0^{\circ}00'00''$. O objetivo em determinar uma referência angular é garantir que as concatenações de distâncias sigam numa linha reta (eixo x), minimizando deslocamentos laterais (eixo y) que interfiram no comprimento final do comprimento gerado.

iv) Posicionamento e medição do ponto de origem:

Próximo à extremidade onde a estação total está instalada é posicionado um tripé, a uma distância de aproximadamente três metros, que servirá como a origem da linha de referência. Esse tripé permanece imóvel na posição de origem ao longo de todo o experimento. O posicionamento da origem deve ser instalado de forma que o ângulo em relação à linha de referência seja a menor possível (a tolerância angular adotada foi de $\pm 0^{\circ}00'30''$). Depois de realizado o posicionamento, é feita a primeira medição do ponto de origem a partir da estação total.

v) Realização da concatenação do comprimento da barra-padrão:

A partir do tripé que sustenta o ponto de origem, é posicionado outro tripé a uma distância aproximada ao comprimento da barra padrão, com o auxílio de uma trena. Embora o ninho cônico posicionado sobre o tripé seja móvel, é importante realizar o posicionamento do tripé de forma aproximada à distância de concatenação, evitando que o ninho se distancie muito do centro do tripé.

Após a posição ter sido determinada com o auxílio da indicação da trena, é realizado o ajuste angular do mesmo, garantindo que o *leapfrogging* seja realizado em direção retilínea. Para isso, o refletor é encaixado ao ninho cônico do tripé e o alinhamento angular é realizado com o auxílio da estação total. A tolerância utilizada é de $\pm 0^{\circ}00'30''$. Com isso, o tripé está posicionado para suportar a aplicação do *leapfrogging*. É importante esclarecer que a estação total foi utilizada para o alinhamento por estar disponível no experimento. No entanto, para a

aplicação prática do método pode-se utilizar dispositivos mais simples, como um apontador laser (*laser pointer*), por exemplo.

Assim, finalmente, é possível aplicar a técnica de concatenação da distância da barra-padrão. Para tal, o ninho cônico do tripé recém-posicionado é “afrouxado”, o que permite que o mesmo se movimente ao longo da sua base, e as esferas são encaixadas sobre cada ninho. O ninho cônico do outro tripé, no entanto, deve permanecer imóvel, pois o mesmo mantém a distância gerada anteriormente, garantindo que o comprimento de referência evolua somente com as concatenações da técnica do *leapfrogging*.

Com as esferas posicionadas sobre os ninhos é, então, utilizada a barra-padrão para a transferência do comprimento aos dois pontos. Assim, os dois ninhos cônicos fixos na barra padrão são encaixados nas duas esferas que estão sobre os tripés (Figura 13-a). O movimento do ninho cônico móvel é o que permitirá que o encaixe ocorra e, nesse momento, o ninho móvel deve ser “apertado” de forma que permaneça fixo e não se movimente mais. Após a fixação do ninho móvel, a barra-padrão e as esferas devem ser retiradas e a nova distância entre os dois ninhos, agora fixos, representa o resultado da transferência de comprimento do método proposto (Figura 13-b). O próximo passo é realizar a medição do novo ponto gerado.

vi) Realização das medições e registro dos dados:

Depois de realizada a transferência do comprimento, a distância entre os dois ninhos já representa o resultado obtido com a técnica. Assim, o próximo passo refere-se à realização das medições com a estação total, que são os dados desejados para compreender a exatidão da técnica.

Para isso, primeiramente deve ser feita a leitura da temperatura no termômetro digital que está fixo, com fita isolante, junto à barra-padrão, no momento imediatamente seguinte ao fim do passo quatro. É importante garantir que seja feito o registro da temperatura de forma imediata a fim de garantir obter o resultado mais fiel possível.

Feito o registro da temperatura, pode-se, então, realizar as medições das distâncias entre cada ninho. Portanto, o refletor deve ser posicionado em cada um dos ninhos e suas posições medidas a partir da estação total (Figura 13-c). É importante ressaltar que a posição de cada ninho será sempre medida em dois momentos distintos. O primeiro é no momento em que o ponto é gerado a partir da concatenação do ponto anterior e o segundo ocorre quando o mesmo é utilizado para realizar a concatenação do ponto seguinte.

Após realizar todos os cinco passos o experimento está iniciado e, para seguir gerando novos comprimentos de referência basta repetir a partir do quarto passo.

4.3. REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

Seguindo os passos descritos acima, o experimento proposto foi realizado três vezes (rodadas) em dias distintos durante o mês de fevereiro, com o objetivo de evitar grande fluxo de pessoas na universidade, por se tratar de um período de recesso. Em cada rodada foram realizadas 45 transferências de comprimento. Esse número foi determinado com o propósito de gerar uma linha de referência de pelo menos 50 m. A Tabela 5 contempla informações sobre a data e hora de cada uma das rodadas realizadas.

Tabela 5 – Informações acerca das rodadas de medição

| Experimento | Data | Hora Início | Hora Fim | Duração |
|-------------|------------|-------------|----------|---------|
| Rodada 1 | 20/02/2019 | 09:30 | 15:30 | 06:00 |
| Rodada 2 | 21/02/2019 | 13:30 | 18:00 | 04:30 |
| Rodada 3 | 27/02/2019 | 15:15 | 19:00 | 03:45 |

Fonte: Autor (2019).

Cada rodada foi executada de maneira igual, seguindo os procedimentos apresentados na seção 4.2. A Figura 14 traz uma imagem feita ao final da Rodada 3, onde pode ser observado comprimento gerado a partir do ponto de origem ao longo de todo o experimento, bem como o corredor onde foi realizado o experimento.

Figura 14– Imagem do experimento ao final da Rodada 3.



Fonte: Autor (2019).

4.4. QUANTIFICAÇÃO DAS GRANDEZAS DE ENTRADA DO PROCESSO DE MEDIÇÃO E BALANÇO DE INCERTEZAS

Após a identificação das fontes de incerteza, é necessário quantificar cada uma utilizando o procedimento descrito na seção 2.3 e as equações para os cálculos dos coeficientes de sensibilidades apresentadas seção 3.3.2. O impacto de cada fonte sobre o resultado do processo de medição deve ser combinado (u_c), ao final, para que seja calculada a incerteza expandida (U) da técnica proposta.

4.4.1. Calibração da barra-padrão

A calibração da barra-padrão foi realizada no Laboratório de Metrologia Dimensional da Fundação CERTI, em Florianópolis, que conta com equipamentos de alta tecnologia e ambientes com condições climáticas controladas, credenciando-a como uma das instituições mais respeitadas do Brasil no segmento. Durante a calibração, duas esferas, as mesmas utilizadas no experimento, foram acopladas nos ninhos da barra-padrão, conforme mostra a imagem da Figura 15, que foi capturada no momento da calibração.

Figura 15 – Calibração do conjunto barra-padrão, ninhos e esfera.



Fonte: Autor (2019).

Utilizando uma máquina de medir por coordenadas (MMC) do fabricante Carl Zeiss, modelo Prismo Ultra, foram medidas as três características listadas abaixo:

- a) Distância entre os centros dos ninhos fixados na barra-padrão de alumínio;
- b) Diâmetro da esfera 1;
- c) Diâmetro da esfera 2.

Foram realizadas dez medições, porém em duas etapas distintas de cinco medições cada. Na primeira etapa (medição 1 a 5) não houve contato ou interação externa com o conjunto barra-ninho-esfera. Após a primeira etapa, as esferas foram giradas 45° no sentido horizontal e vertical cada e, então, foram realizadas as cinco últimas medições (medição 6 a 10). Essa movimentação das esferas objetivou avaliar eventuais variações de comprimento decorrentes da interação entre os erros de forma dos cones e das esferas.

Cada medição consistiu na captura de 13 pontos distribuídos sobre a superfície de cada esfera, sendo um ponto localizado num dos polos das esferas, quatro pontos sobre uma circunferência localizada a 45° da linha de centro, e oito pontos distribuídos sobre a circunferência central da esfera. A distância entre os ninhos cônicos corresponde à distância entre os centros das esferas.

Nas medições dos diâmetros, a esfera 1 apresentou um diâmetro médio de 38,1057 mm, enquanto que a esfera 2 apresentou seu diâmetro médio em 38,1059 mm. O erro de forma de ambas as esferas ficou em 0,0005 mm.

Para cada distância entre os centros das esferas, a incerteza de medição foi estimada numericamente através de uma ferramenta denominada *Virtual CMM*, que está disponível no software da MMC utilizada. A incerteza expandida de cada comprimento medido é 0,0038 mm para uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95% e já considera a incerteza da compensação da dilatação térmica da barra. Por se tratar de uma barra de alumínio, que é um material com alto coeficiente de dilatação térmica, a temperatura ambiente foi monitorada durante as medições. Os comprimentos medidos foram corrigidos para a temperatura de referência de 20°C considerando o coeficiente de dilatação térmica da barra $23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Os valores das médias e desvio padrão para cada uma das etapas são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Média e desvio padrão das medições realizadas.

| Medições | \bar{x} (mm) | s (mm) |
|-----------------|----------------------------------|---------------|
| 1 – 5 | 1121,6065 | 0,00018 |
| 6 – 10 | 1121,6047 | 0,00032 |

Fonte: Autor (2019).

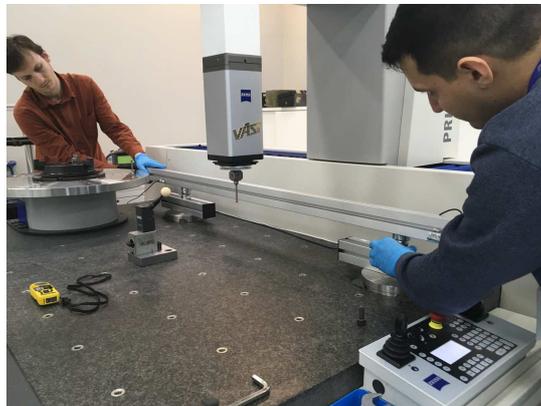
Com isso, o resultado final da calibração do comprimento entre os ninhos fixos da barra-padrão foi de $L = 1121,6056 \pm 0,0038 \text{ mm}$, com probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição considera, além da incerteza da medição das distâncias mencionada acima, a variabilidade dos resultados após a movimentação das esferas e a repetibilidade dos resultados.

4.4.2. Erros do processo de transferência de comprimento

Após realizar a calibração da barra-padrão, foi realizada uma avaliação dos erros do processo de transferência do comprimento da barra para os dispositivos de transferência. Essas medições também foram realizadas com a máquina de medir por coordenadas da Fundação CERTI.

Para tal, foram realizadas quatro tentativas (montagem 1 a 4) de transferência do comprimento da barra-padrão para os dispositivos de transferência, conforme ilustrado na Figura 16. Depois de realizada cada transferência, foram feitas três medições do comprimento transferido, totalizando 12 medições de comprimento.

Figura 16– Avaliação da repetibilidade da transferência de comprimento.



Fonte: Autor (2019).

Para realizar a medição da distância entre o centro dos ninhos dos dispositivos de transferência após a transferência do comprimento foi utilizado o mesmo método da calibração da barra-padrão. Ou seja, foram medidas através da distância entre os centros de cada esfera acoplada nos ninhos dos dispositivos, também a partir de 13 pontos distribuídos em suas superfícies. A distância foi medida três vezes após cada transferência. Os resultados do ensaio podem ser encontrados na Tabela 7. São apresentadas: a distância média transferida (\bar{L}_{trans}), a tendência (Td_{trans}), calculada pela equação 5, o desvio padrão amostral das 12

medições de comprimento (s_{trans}), a incerteza padrão do processo de transferência (u_{trans}), calculada pela equação 6. A forma de tratar a tendência não corrigida segue as recomendações de Lira e Wöger (1998). O respectivo número de graus de liberdade (v_{trans}) é determinado segundo equação 7 (equação de Welch-Satterthwaite).

Tabela 7– Resultados do teste de transferência de comprimento

| | Valor [mm] |
|-------------------|-------------------|
| \bar{L}_{trans} | 1121,6144 |
| L_{barra} | 1121,6056 |
| Td_{trans} | 0,0088 |
| s_{trans} | 0,0091 |
| u_{trans} | 0,0126 |
| v_{trans} | 42 |

Fonte: Autor (2019).

$$Td_{trans} = \bar{L}_{trans} - L_{barra} \quad (5)$$

$$u_{trans} = \sqrt{s_{trans}^2 + Td_{trans}^2} \quad (6)$$

$$v_{trans} = \frac{u_{trans}^4}{s_{trans}^4 / 11} \quad (7)$$

4.4.3. Incerteza do coeficiente de dilatação térmica

A dilatação térmica da barra-padrão é uma importante fonte de incerteza que precisa ser considerada no processo de medição. Conforme já foi mencionado neste trabalho, por ser feita de alumínio, que é um material com alto índice de dilatação térmica, esse efeito é ainda mais presente. Para efeitos de comparação, o alumínio dilata cerca de duas vezes mais que o aço, já que seu coeficiente de dilatação térmica é de $23 \mu m / (m \cdot ^\circ C)$.

Adota-se o modelo de dilatação térmica linear da Equação 8.

$$\Delta L = L_{barra} \cdot \alpha_{barra} \cdot (T_i - 20^\circ C) \quad (8)$$

Onde:

L_{barra} = comprimento inicial da barra-padrão;

α_{barra} = coeficiente de dilatação térmica da barra-padrão;

T_i = temperatura da barra padrão na i -ésima transferência;

A temperatura foi medida em cada processo de transferência e a dilatação da barra corrigida. Apesar de muitos autores adotarem a incerteza do coeficiente de dilatação térmico do alumínio como $\pm 2 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, um estudo de Hidnert e Krider (1952) aponta que essa propriedade, na média, varia entre $23,4 \mu\text{m} / (\text{m} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ e $23,8 \mu\text{m} / (\text{m} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ para diferentes *grades* de alumínio em temperaturas até 100°C . Por isso, será adotada a incerteza do coeficiente térmico do alumínio como $\pm 1 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ com distribuição de probabilidades retangular.

4.4.4. Incerteza da medição de temperatura

Para cada transferência de comprimento realizada durante o experimento, foi medida a temperatura com um termômetro digital fixado à barra-padrão para fins de correção da dilatação térmica.

Adota-se como incerteza expandida da medição de temperatura $0,5^\circ\text{C}$, obtida do certificado de calibração do termômetro. A distribuição de probabilidades utilizada é a normal.

4.4.5. Erros decorrentes da estabilidade dos dispositivos de transferência

Foi estimada também a incerteza atrelada à estabilidade dos dispositivos de transferência fixados sobre tripés. Apesar de serem estruturas robustas, é fundamental estudar o comportamento desse fator, pois qualquer deslocamento nos tripés entre duas transferências sucessivas poderá impactar significativamente no resultado final.

Essa fonte de incertezas foi determinada com base na variação das posições dos dispositivos durante as três rodadas do experimento realizadas. Para tal, cada tripé foi medido duas vezes: a primeira, ao ser posicionado a partir da transferência do comprimento com origem no tripé anterior; e a segunda, após o tripé ser origem da transferência do comprimento para a posição seguinte e ser feita a nova transferência de comprimento. Para cada par de medições, calculou-se a diferença entre as posições dos dispositivos, resultando,

portanto, em 135 diferenças (45 vezes por rodada). A diferença média observada foi de 0,00 mm com desvio-padrão de 0,21 mm. Assume-se, portanto, incerteza padrão de 0,21 mm para uma distribuição t de Student com 134 graus de liberdade.

4.4.6. Erros decorrentes do alinhamento dos pontos

Os erros de desalinhamento foram determinados a partir das medições com a estação total, utilizando-se as diferenças entre as coordenadas y e z (direções transversais) dos dispositivos de transferência após cada transferência. O desalinhamento de cada comprimento transferido é calculado através da Equação 9.

$$\theta = \operatorname{acos} \frac{\sqrt{\Delta y^2 + \Delta z^2}}{L_{\text{barra}}} \quad (9)$$

O valor para desalinhamento médio foi de 0,0038 radianos, com incerteza padrão $u(\theta) = 0,0021$ radianos para 134 graus de liberdade.

4.4.7. Balanço de incertezas e incerteza expandida

Depois de quantificado o semi-intervalo do espaço amostral a para cada fonte de erro, bem como definido os divisores (conforme distribuição de probabilidade), estima-se o valor do impacto de cada fonte de incertezas conforme Equação 1. A incerteza combinada, por sua vez, pode ser calculada através da Equação 2. Portanto, utilizando as equações apresentadas na seção 2.3, foi construído o balanço de incertezas do processo de medição da técnica proposta, conforme consta na Tabela 8.

Tabela 8 – Balanço de incertezas do experimento

| Grandeza de entrada | Média | Incerteza (a) | UM | Divisor | C_i | u_i [mm] | Relevância |
|---------------------|-----------|-------------------|------------------|------------|--------|------------|------------|
| L_{Barra} | 1121,6056 | 0,0038 | mm | 2 | 0,9997 | 0,0019 | 0,01% |
| α_{barra} | 0,000023 | 0,000001 | $^{\circ}C^{-1}$ | $\sqrt{3}$ | 6955 | 0,0040 | 0,04% |
| T | 26,2 | 0,5 | $^{\circ}C$ | 2 | 0,026 | 0,0065 | 0,10% |
| e_{trans} | 0 | 0,0126 | mm | 1 | 1 | 0,0126 | 0,36% |
| e_{estab} | 0 | 0,21 | mm | 1 | 1 | 0,21 | 99,32% |
| Θ | 0,0038 | 0,0021 | rad | 1 | 4,31 | 0,0090 | 0,18% |
| | | | | | u_c | 0,21 | 100% |

Fonte: Autor (2019).

É possível observar, a partir da tabela, a relevância da estabilidade dos dispositivos de transferência no resultado da medição, numa grandeza muito superior às demais fontes de incerteza. Isso indica que essa componente é a principal fonte de erros no procedimento proposto. Ter ciência dessa informação é de muita valia para o processo de melhoria da técnica proposta. Ressalta-se que a incerteza combinada é referente a um único processo de transferência de comprimento.

Finalmente, após construído o balanço de incertezas e quantificado a incerteza combinada, calcula-se a estimativa da incerteza expandida do processo de medição. A incerteza expandida, representada pelo símbolo U , é o intervalo onde se espera encontrar a componente aleatória dos erros de medição, para uma probabilidade de 95%.

Considerando as sucessivas concatenações para a geração de comprimentos de referência, a incerteza após a i -ésima transferência de comprimento pode ser obtida a partir da equação 10, onde k é o coeficiente de abrangência.

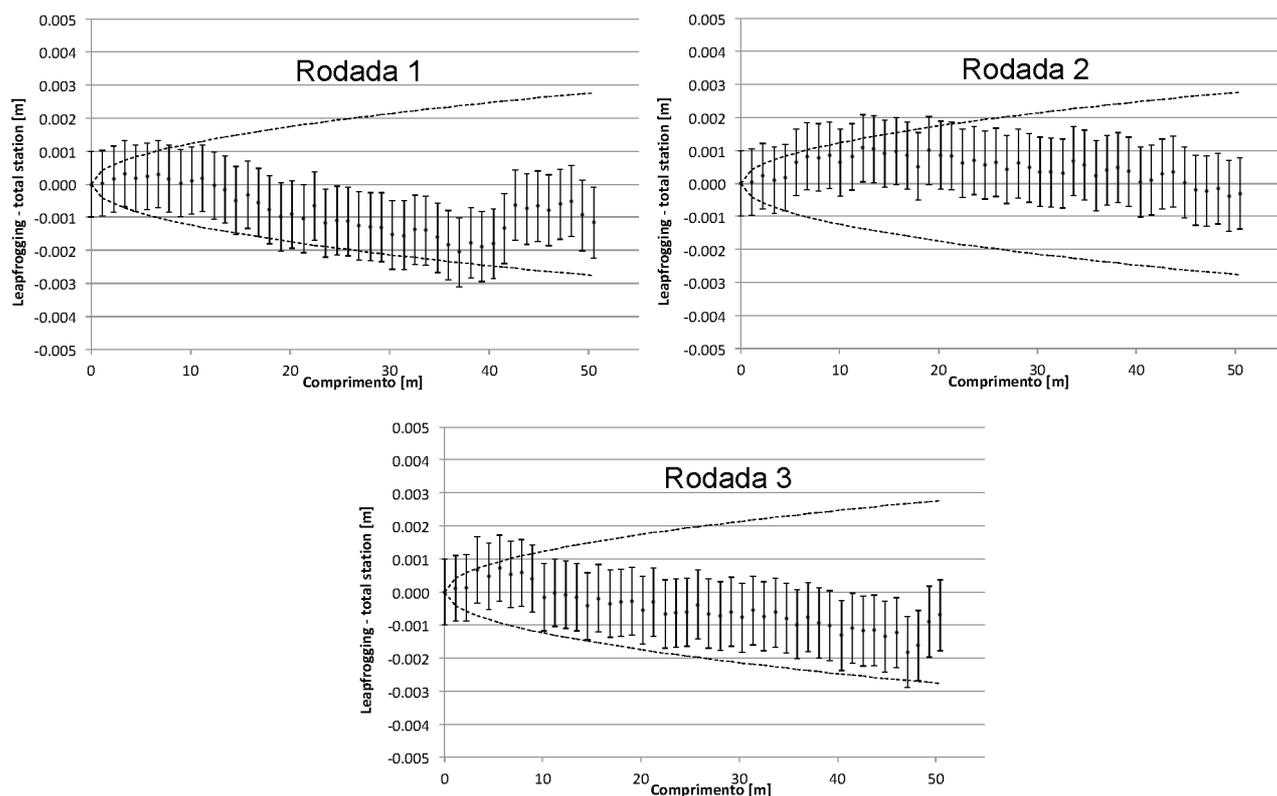
$$U = k \cdot \sqrt{i \cdot u_c^2} \quad (10)$$

4.5. RESULTADOS

Os resultados da comparação entre o método proposto (*leapfrogging*) e a referência (estação total) encontram-se plotados na Figura 17. Cada ponto representa a diferença entre a distância gerada pelo *leapfrogging*, através do modelo matemático apresentado na Equação 4 (somadas sucessivas do valor nominal da barra-padrão até a i -ésima transferência, corrigindo-se os efeitos sistemáticos da dilatação e desalinhamento), e o valor indicado pela estação total,

após cada transferência de comprimento. A incerteza expandida do método proposto, calculada de acordo com a Equação 10 com $k = 2$ é representada pelas linhas tracejadas, enquanto que as barras representam a precisão da estação total, conforme especificado pelo fabricante.

Figura 17– Resultado da comparação do *leapfrogging* e as medições da estação total



Fonte: Autor (2019).

A Tabela 9 traz uma comparação entre os resultados do comprimento materializado pelo método proposto e o comprimento medido pela estação total ao final da última concatenação, bem como a temperatura média registrada em cada experimento. O comprimento final menor obtido na terceira rodada muito provavelmente se deve à menor temperatura média no dia do experimento.

Tabela 9 – Comprimento final após 45 concatenações

| Rodada | <i>Leapfrogging</i> [m] | Estação Total [m] | T_{média} [°C] |
|---------------|------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 50,4798±0,0028 | 50,4810±0,0011 | 26,9 |
| 2 | 50,4798±0,0028 | 50,4801±0,0011 | 26,8 |
| 3 | 50,4776±0,0028 | 50,4783±0,0011 | 24,9 |

Fonte: Autor (2019).

A partir da análise da comparação dos resultados é possível observar que as regiões de incerteza do método proposto e das medições com a estação total se sobrepõem em todos os pontos. Isso indica que o método apresentou resultados consistentes, considerando a incerteza de medição estimada. Deve-se atentar também ao fato de que a precisão especificada pelo fabricante da estação total considera apenas efeitos aleatórios. É possível, portanto, que a incerteza declarada para as medições com a estação total esteja subestimada.

4.6. DISCUSSÃO

Embora o resultado da comparação tenha mostrado que o método do *leapfrogging* e a referência utilizada estão dentro dos limites das incertezas, indicando consistência na proposta, aparentemente há uma tendência negativa nos comprimentos obtidos a partir do modelo matemático para os três experimentos. Uma das possíveis hipóteses levantadas é que o erro médio de desalinhamento seja menor do que o valor corrigido (0,0038 rad), sendo, então, “superestimado”. Dessa forma, os resultados teriam sido corrigidos para um valor de tendência maior que o real. No entanto, testes complementares teriam que ser conduzidos para comprovar essa hipótese.

Analisando o balanço de incertezas, foi constatada a estabilidade dos dispositivos de transferência como a fonte de erros dominante para a técnica proposta, com relevância muito maior que as demais fontes de incertezas. Aparentemente, têm ocorrido pequenas movimentações nos tripés entre duas transferências de comprimento, o que deve ser reduzido se for realizado melhorias na mecânica dos tripés ou outras estruturas de suporte para os dispositivos de transferência em futuras aplicações. Caso a incerteza decorrente da estabilidade dos tripés fosse reduzida em 50%, a incerteza expandida após 45 transferências de comprimento seria reduzida para 1,5 mm.

Além disso, a incerteza final também seria beneficiada se fosse utilizada uma barra-padrão mais comprida, pois ela é proporcional ao número de transferências de comprimentos utilizados. Caso ocorresse a troca da barra-padrão, recomenda-se que a mesma fosse construída a partir de um material com coeficiente de dilatação térmico menor que o do alumínio, o que reduziria o efeito dessa fonte de incerteza. Um projeto contemplando melhorias nos equipamentos também deve buscar reduzir os erros de desalinhamento, tornar o procedimento mais rápido e melhorar o controle das condições ambientais.

Contudo, é importante ressaltar que foram avaliadas somente as incertezas relacionadas à técnica do *leapfrogging*. Fontes de incertezas adicionais devem ser consideradas na aplicação das distâncias materializadas para a calibração de medidores eletrônicos de distância, como a estabilidade das distâncias no longo prazo e os erros resultantes da adaptação dos alvos aos acoplamentos dos pilares. Além disso, não foi feita uma avaliação da incerteza decorrente da reprodutibilidade do método proposto para diferentes operadores. Essa avaliação fica como uma sugestão para futuros trabalhos.

5. CONCLUSÃO

Devido à dificuldade em replicar os métodos tradicionais de calibração de MED sem a disponibilidade de equipamentos de alto custo, como bancadas interferométricas ou um sistema de alta exatidão para a calibração de comprimentos de referência, este trabalho propôs a aplicação de uma técnica utilizando o conceito do *leapfrogging* como solução de baixo custo para a geração de referências para a calibração de MED.

Apesar de a principal vantagem da proposta estar no baixo custo necessário para aplicá-la, é importante ressaltar que melhorias nos equipamentos utilizados teriam o efeito de reduzir a incerteza da técnica, aumentando a qualidade do processo de calibração. Havia-se inicialmente a ideia de que a dilatação da barra-padrão, feita de alumínio, seria a principal fonte de incertezas atuante sobre o processo de medição. Contudo, a discussão em torno dos dados apresentados no balanço de incertezas concluiu que a estabilidade dos dispositivos de transferência é a fonte dominante sobre o processo. Portanto, recomenda-se uma melhoria na estrutura de suporte dos dispositivos de transferência em futuras aplicações.

Entretanto, mesmo realizando a experimentação da proposta num ambiente sem o controle das condições ambientais, utilizando uma barra-padrão de alumínio e com tripés que apresentaram pequenos deslocamentos ao longo do processo, a técnica proposta através do conceito do *leapfrogging* apresentou resultados consistentes. Após 45 concatenações do comprimento da barra-padrão, os comprimentos gerados nos três experimentos se mostraram compatíveis com valores resultantes dos resultados das medições com estação total, considerando a incerteza estimada para o método. No entanto, a incerteza expandida ainda é demasiadamente elevada para a calibração de MED de alta exatidão, principalmente aqueles integrados a estações totais. Novos estudos e experimentações acerca da técnica proposta devem focar na redução da incerteza de medição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTAZZI, ARMANDO & SOUSA, ANDRÉ R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. São Paulo: Manole, 2008.

BRAUN, J.; DVORACEK, J.; STRONER, M. **Absolute Baseline for Testing of Electronic Distance Meters**. INGENIO, 6., 2014, Praga. Metrology, testing and calibration. Praga: Ingeo, 2014. p. 275 – 280

EIDGENÖSSISCHES DEPARTEMENT FÜR VERTEIDIGUNG. **Giubiasco: Basis von 1881**. Disponível em: <https://www.swisstopo.admin.ch/de/swisstopo/geschichte/anekdoten/giubiasco.html>. Acesso em: 22 set. 2018.

EZHELA, V. V. **A Multimeasurand ISO GUM Supplement is Urgent**. Data Science Journal, [s.l.], v. 7, p.E2, 2008. Ubiquity Press, Ltd.. <http://dx.doi.org/10.2481/dsj.7.e2>.

FONTES, L. **A Evolução Histórica e Tecnológica do Instrumental Topográfico**. 2001. Disponível em: <http://www.topografia.ufba.br/evolucao%20tecnologicatop.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2018.

HIDNERT, Peter; KRIDER, H. Thermal Expansion of Aluminum and Some Aluminum Alloys. **Journal Of Resea Rch Of The Nationa L Bureau Of Standards**. Washington, p. 209-220. mar. 1952. Disponível em: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/048/jresv48n3p209_A1b.pdf>. Acesso em: 12 set. 2019.

INTERNATIONAL ORGANIATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 17123-4:2012 - Optics and Optical Instruments - Field Procedures For Testing Geodetic And Surveying Instruments: Part 4: Electro-Optical Distance Meters (EDM Measurements to Reflectors)**. 2. ed. Geneva. 2012.

INTERNATIONAL ORGANIATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 16331-1:2017 - Optics and optical instruments - Laboratory procedures for testing surveying and construction instruments - Part 1: Performance of handheld laser distance meters**. 2. ed. Geneva. 2017.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM). **Evaluation of Measurement Data — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**. 2008. Disponível em: <<http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>>. Acesso em 19 ago. 2019.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM). **Evaluation of Measurement Data — Supplement 1 to the ‘Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement’ — Propagation of Distributions Using a Monte Carlo Method**. JCGM, 2008. Disponível em: <https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2019.

LIMA, A.; SILVA, L. **CALIBRAÇÃO DE ESTAÇÕES TOTAIS A LUZ DAS NORMAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS**. Congresso Brasileiro De Cartografia, 17, 2017, Rio de Janeiro. Geodésia, Astronomia, Topografia e Agrimensura. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, 2017. p. 101 - 105.

LIRA, I.H.; WÖGER, W. **Evaluation of the Uncertainty Associated with a Measurement Result Not Corrected for Systematic Effects**. Measurement Science and Technology. Vol. 9. Nr. 6. 1998. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/9/6/019>.

LINDFORS, C.; CHANG, P.; STONE, W. **Survey of Construction Metrology Options for AEC Industry**. Journal Of Aerospace Engineering, [s.l.], v. 12, n. 2, p.58-64, abr. 1999. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0893-1321\(1999\)12:2\(58\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0893-1321(1999)12:2(58)).

MITTLER, E.; GLITSCH, S. **Wie der Blitz einschlägt, hat sich das Rätsel gelöst: Carl Friedrich Gauss in Göttingen**. Universitätsverlag Göttingen. 2005. Whitten, C.A., 1986. Geodesy and Geodynamics. H.G. Henneberg (Editor), Recent Crustal Movements, 1985. Tectonophysics, 130: 9-21.

OBERLIN NEWS-TRIBUNE. **STEM camp includes ‘hydraulic leapfrog’ race**. 2016. Disponível em: <https://www.theoberlinnewstribune.com/news/6183/stem-camp-includes-hydraulic-leapfrog-race>. Acesso em: 17 set. 2018.

PESCOD, Rhys Daniel Wayne. **Improvements to the Calibration of Electronic Distance Measurement Equipment (EDME)**. 2015. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Bachelor Of Spatial Science (surveying), Faculty Of Engineering And Surveying, University Of Southern Queensland, Southern Queensland, 2015. Disponível em: <https://eprints.usq.edu.au/29279/1/Pescod_R_Campbell.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2019.

RÜEGER, J.M. **Electronic distance measurement: an introduction – 4th ed**. Sidney: Springer, 1994.

SILFVAST, W. **Laser Fundamentals**, Cambridge University Press, 1996.

Silva, M. M. S. da. **Metodologia para a criação de um laboratório para classificação das componentes angulares horizontal e vertical, de teodolitos e estações totais**. 2008. Tese de Doutorado pela Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR. 139 páginas.

SOUSA, João Alves. **Princípios do Cálculo de Incertezas – O Método GUM**. 2004. Disponível em: <<http://www3.uma.pt/valimed/livro%202004/artigo5-JAS.pdf>>. Acesso em: 09 fev. 2019.

SUAREZ, H. **Uso do Método Compacto para calibração de estações totais**. Dissertação de Mestrado pela Universidade de São Paulo, São Carlos-SP. 152 páginas, 2014.

TREVISAN, L; FABRICIO, D. (2015). **Método de Monte Carlo na estimativa da incerteza em ensaios de fadiga**. Revista Ciência e Tecnologia. 18. 81-86.

WHITTEN, Charles A. **Geodesy and geodynamics**. Tectonophysics, [s.l.], v. 130, n. 1-4, p.9-21, nov. 1986. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(86\)90097-1](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(86)90097-1).

WIŚNIEWSKI, M; RAMOTOWSKI, Z. **Comparison of laser distance measuring instruments.** Euramet Supplementary Comparison, Euramet.l-s20 (#1169). Varsóvia, abr. 2014.