

Universidade Metodista De Piracicaba
Programa De Pós Graduação Em Engenharia De Produção

**EXPLORANDO O USO DE MEDIDAS MATERIALIZADAS NO
CONTEXTO DA METROLOGIA POR COORDENADAS PORTÁTIL**

DOUGLAS LUIS PASSUELO

ORIENTADOR: PROF. DR. MARIA CÉLIA DE OLIVEIRA

CO-ORIENTADOR: DR. RODRIGO JUNQUEIRA LEÃO

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2021

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**EXPLORANDO O USO DE MEDIDAS MATERIALIZADAS NO
CONTEXTO DA METROLOGIA POR COORDENADAS PORTÁTIL**

DOUGLAS LUIS PASSUELO

ORIENTADOR: PROF. DR. MARIA CÉLIA DE OLIVEIRA

CO-ORIENTADOR: DR. RODRIGO JUNQUEIRA LEÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a **Deus**, pela vida que me concede a cada dia e sua misericórdia infinita.

À Prof. Dr. Maria Célia de Oliveira, pela orientação, paciência e incentivo que sempre demonstrou, e pela amizade.

Ao Dr. Rodrigo Junqueira Leão, pela co-orientação, pelas sugestões valiosas e por me incentivar neste trabalho.

À minha esposa Julliana Bragaglia Passuelo, que mesmo privada de minha presença em momentos importantes, soube compreender e participar comigo desta jornada.

Aos meus pais Rosivaldo e Lolita, e meu irmão Thomas que sempre estiveram ao meu lado, tendo sempre uma palavra de carinho e incentivo.

Aos meus amigos do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção-PPGEP, Wanderson Stoco, Douglas Moraes e Douglas Felipe, que de alguma forma contribuíram para a realização desta etapa.

Agradeço ao meu empregador, o Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais– CNPEM, por toda a infraestrutura e suporte no decorrer da pesquisa.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão de bolsas de estudos.

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

PASSUELO, Douglas. **Explorando o uso de medidas materializadas no contexto da metrologia por coordenadas portátil**, 2021, 92f., Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

RESUMO

Para medição e alinhamento de grandes componentes como por exemplo, aceleradores de partículas, é predominante o uso da medição por coordenadas portátil por meio de equipamentos como o *laser tracker*. Contudo, no que diz respeito a medição de grandes volumes e em ambientes confinados, a atividade metrológica se torna mais desafiadora, devido a problemática da oclusão do feixe de laser, visto que se trata de um sistema óptico e requer linhas livres de visada para a realização das medições. Além disso, é necessário compreender o desempenho do instrumento nas típicas medições realizadas dentro de um acelerador de partículas. Neste contexto, o objetivo deste estudo é avaliar diferentes aplicações do uso de medidas materializadas em medições que utilizam o *laser tracker* como sistema de medição de referência, tendo em vista as problemáticas enfrentadas no ambiente de medição de um acelerador de partículas. O método de pesquisa deste estudo é experimental e propõem o uso de medidas materializadas, capaz de realizar verificações periódicas do desempenho do *laser tracker* e que também seja capaz de ser utilizada no processo de realocação em ambientes confinados. Para efeito de avaliação, três experimentos foram realizados para melhor investigar o uso de medidas materializadas nos cenários apresentados. Os resultados mostram que as aplicações propostas obtiveram bons resultados comparadas as técnicas comumente já empregadas, tendo assim grande importância para medições realizadas em ambientes de grandes volumes e em ambientes confinados.

Palavras-chave: *laser tracker*, fontes de luz síncrotron, confiabilidade metrológica, realocação de instrumentos.

PASSUELO, Douglas. **Exploring the use of materialized measures the context of portable coordinate metrology**, 2021, 92f., Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

ABSTRACT

For measurement and alignment of large components such as particle accelerators, the use of portable coordinate measurement using equipment such as the laser tracker is predominant. However, with regard to the measurement of large volumes and in confined environments, the metrological activity becomes more challenging, due to the problem of the laser beam occlusion, since it is an optical system and requires lines of sight for the measurements. In addition, it is necessary to understand the performance of the instrument in the typical measurements performed inside a particle accelerator. In this context, the objective of this study is to evaluate different applications of the use of materialized measures in measurements that use the laser tracker as a reference measurement system, in view of the problems faced in the measurement environment of a particle accelerator. The research method of this study is experimental and proposes the use of materialized measures, capable of performing periodic checks on the performance of the laser tracker and which is also capable of being used in the relocation process in confined environments. For evaluation purposes, three experiments were carried out to better investigate the use of materialized measures in the scenarios presented. The results show that the proposed applications, obtained good results compared to the techniques commonly already employed, thus having great importance for measurements carried out in high volume environments and in confined environments.

Keywords: laser tracker, synchrotron light sources, metrological reliability, reallocation of instruments.

SUMÁRIO

RESUMO.....	III
ABSTRACT.....	III
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.1.1. OBJETIVO GERAL.....	4
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.2 VISÃO MACRO DA PESQUISA.....	4
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	5
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	6
2.1 MEDIÇÃO DE GRANDES VOLUMES.....	6
2.1.1 SISTEMAS METROLÓGICOS PARA MEDIÇÃO DE GRANDES VOLUMES.....	10
2.1.1.1 <i>LASER TRACKER</i>	11
2.1.1.1.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO <i>LASER TRACKER</i>	13
2.1.1.1.2 FONTES DE ERROS E VERIFICAÇÃO DO <i>LASER TRACKER</i>	18
2.1.2 TOPOGRAFIA E GEODÉSIA.....	21
2.1.3 FOTOGRAMETRIA.....	24
2.1.4 BRAÇO ARTICULADO.....	27
2.1.4.1 VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO DE BRAÇOS ARTICULADOS	29
2.1.5 <i>LASER SCANNER</i>	30
2.2 FONTES DE LUZ SINCROTRON.....	32
2.2.1 ACELERADORES DE PARTÍCULAS.....	32
2.2.2 FONTES DE LUZ SINCROTRON E O PROJETO SIRIUS.....	34
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	52
3. 1 MATERIAIS E MÉTODO.....	53
3.1.1 MEDIDA MATERIALIZADA.....	53
3. 1.2 EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO.....	55
3. 1.3 SOFTWARE DE MEDIÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS.....	55
3. 2 O MÉTODO DE PESQUISA.....	56
3. 2.1 EXPERIMENTO 01.....	56
3. 2.2 EXPERIMENTO 02.....	64
3. 2.3 EXPERIMENTO 03.....	67
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	72

4. 1 RESULTADOS DO EXPERIMENTO 01	72
4. 2 RESULTADOS DO EXPERIMENTO 02	78
4. 3 RESULTADOS DO EXPERIMENTO 03	80
5. CONCLUSÃO	84
6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
APÊNDICES	94

LISTA DE APÊNDICE

APÊNDICE A: RELATÓRIO TRACKER PILOT PARA VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DISTANCIAS	94
APÊNDICE B: RELATÓRIO TRACKER PILOT PARA VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO ANGULAR.	95

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 : ETAPAS PARA DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	5
FIGURA 2 : DEFINIÇÃO DE UM GRANDE OBJETO POR DIMENSÃO NOMINAL E TOLERÂNCIA (SCHIMITT, 2016).....	7
FIGURA 3 : LISTA DE INSTRUMENTOS DE GRANDES VOLUMES E BREVE DESCRIÇÃO (FRANCESCHINI E MAISANO,2013).....	8
FIGURA 4 : RELAÇÃO ENTRE DIMENSÃO DO OBJETO E PRECISÃO PARA DIFERENTES TECNOLOGIAS LSDM (DE LUHMANN ET AL.,2006)	9
FIGURA 5 : CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE METROLOGIA POR MEIO DA TOPOLOGIA (SCHIMIT, 2016)	10
FIGURA 6 : EXEMPLO DE APLICAÇÕES DE LASER TRACKERS	12
FIGURA 7 : LASER TRACKER LEICA AT-401 E REFLETOR (SMR).....	12
FIGURA 8 : CONSTRUÇÃO DE UM LASER TRACKER (SAWYER ET AL. ,2003)	14
FIGURA 9 : PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO LASER TRACKER (WAN ET AL., 2017). 15	
FIGURA 10 : REFLETOR ESFÉRICO (STEFFEY., 2010)	16
FIGURA 11 : FEIXE DE LASER DO IFM.	17
FIGURA 12 : ILUSTRAÇÃO DE 4 CONFIGURAÇÕES DO TESTE DE COMPRIMENTO DA NORMA ASME B89.4.19-2006 (NASR ET AL. 2012)	20
FIGURA 13 : MEDIDA MATERIALIZADA E SUPORTE DE FIXAÇÃO (NASR ET AL. 2012).	21
FIGURA 14 : ESTAÇÃO TOTAL (GHILANI; WOLF2012).....	23
FIGURA 15 : CAMPOS DE INCERTEZA DA ESTAÇÃO TOTAL E DE UM LASER TRACKER (CALKINS., 2015).....	24
FIGURA 16 : FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE FOTOGRAMETRIA EM UMA REDE DE VÁRIAS ESTAÇÕES (ESTLER ET AL.,2002)	25
FIGURA 17 : INSPEÇÃO POR FOTOGRAMETRIA DE UMA PORTA EM UMA AERONAVE BOEING 787 (LAZAR., 2015)	26
FIGURA 18 : BRAÇO ARTICULADO DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS (HEXAGON MI).....	27
FIGURA 19 : MUDANÇA DO SISTEMA DE COORDENADAS E VOLUME DE TRABALHO (SOUZA, OROSCO E GIAMMUSSO, 2003)	28
FIGURA 20 : LASER SCANNER, UTILIZANDO UM ESPELHO GIRATÓRIO E O SENSOR GIRATÓRIO PARA DIRECIONAR O FEIXE DE LASER (FERRUCI ET AL., 2014)	30
FIGURA 21 : NUVEM DE PONTOS LASER SCANNER, ANEL DE ARMAZENAMENTO DO SIRIUS (AUTOR.....	31

FIGURA 22 : ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO, CLASSIFICADO DE ACORDO COM O COMPRIMENTO DE ONDA E FREQUÊNCIA (LNLS, 2014)	35
FIGURA 23 : FEIXE DE CARGAS ELÉTRICAS SENDO DEFLETIDO PELA AÇÃO DE UM CAMPO MAGNÉTICO PARA PRODUZIR A LUZ SINCROTRON (THE EUROPEAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY)	36
FIGURA 24 : ESQUEMÁTICO DA FONTE DE LUZ SOLEIL, NA FRANÇA (SOLEIL SINCROTRON)	37
FIGURA 25 : FONTES DE LUZ SINCROTRON COM BAIXA EMITÂNCIA, TERCEIRA GERAÇÃO (NATIONAL SYNCHROTRON RADIATION RESEARCH CENTER, TAIWAN)	38
FIGURA 26 : VISTA ÁREA INSTALAÇÕES SIRIUS (REVISTA FAPESP, 2020)..	41
FIGURA 27 : ESTRUTURA DA FONTE DE LUZ SIRIUS (FOLHA DE SÃO PAULO., 2020)	42
FIGURA 28 : ESQUEMÁTICO COM VISTA SUPERIOR DO ANEL DE ARMAZENAMENTO DO SIRIUS: DIPOLOS EM AZUL, QUADRUPOLOS EM VERMELHO E SEXTUPOLOS EM VERDE (LNLS, 2014)	43
FIGURA 29 : BERÇO COM SEXTUPOLOS E QUADRUPOLOS DO ANEL DE ARMAZENAMENTO DO SIRIUS (AUTOR)	44
FIGURA 30 : APOIO PARA ACOMODAR O REFLETOR ESFÉRICO DA REDE DE PONTOS (AUTOR)	46
FIGURA 31 : PONTOS MEDIDOS POR DIFERENTES ESTAÇÕES DE LASER TRACKER PARA CRIAÇÃO DA REDE DE PONTOS DE REFERÊNCIA (AUTOR)	46
FIGURA 32 : REDE DE PONTOS DE REFERÊNCIA DO ANEL DE ARMAZENAMENTO	48
FIGURA 33 : REDES DE REFERÊNCIA DE ALINHAMENTO DO SIRIUS (CNPEM/LNLS,2020).....	49
FIGURA 34 : BLINDAGEM DE RADIAÇÃO E HALL EXPERIMENTAL DO SIRIUS (AUTOR)	50
FIGURA 35 : ESQUEMÁTICO DE TÉCNICA DESENVOLVIDA, A PARTIR DO CONCEITO UTILIZANDO TEODOLITOS (GAO, 2016)	50
FIGURA 36 : ESQUEMÁTICA CONEXÃO ENTRE REDES UTILIZANDO FURO NA BLINDAGEM	51
FIGURA 37 : CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	52
FIGURA 38 : MEDIDAS MATERIALIZADAS.....	54
FIGURA 39 : CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS (DIMENSÕES EM MILÍMETRO)	57
FIGURA 40 : SEQUÊNCIA ETAPAS DE VERIFICAÇÃO LASER TRACKER.....	57
FIGURA 41 : POSIÇÕES DE ORIENTAÇÃO MEDIDA MATERIALIZADA (TRANSVERSAL E LONGITUDINAL)	58
FIGURA 42 : ESQUEMÁTICO COM AS DISTANCIAS DE MEDIÇÃO DA MEDIDA MATERIALIZADA NA TRANSVERSAL.....	59
FIGURA 43 : MEDIÇÃO DE MONITORAMENTO DO RAIOS DA BLINDAGEM DO SIRIUS.	60

FIGURA 44 : VERIFICAÇÃO SENSOR DE MEDIÇÃO DE DISTÂNCIA (ADM) POSIÇÃO INTERNA	61
FIGURA 45 : PROCEDIMENTO DE VERIFICAÇÃO DO SENSOR DE MEDIÇÃO ANGULAR.....	63
FIGURA 46 : SEQUÊNCIA DE MEDIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE VERIFICAÇÃO ANGULAR.....	63
FIGURA 47 : SEQUÊNCIA DAS ETAPAS DO EXPERIMENTO 02	64
FIGURA 48 : DIFERENTES ORIENTAÇÕES DAS MEDIDAS MATERIALIZADAS PARA PROCESSO DE REALOCAÇÃO.....	65
FIGURA 49 : ESTAÇÃO 01 MEDIDA MATERIALIZADA LONGITUDINAL- TRANSVERSAL	66
FIGURA 50 ESQUEMÁTICO DO LAYOUT DE REALOCAÇÃO LASER TRACKER	67
FIGURA 51 : SEQUENCIAS DA ETAPA DO EXPERIMENTO 03.....	68
FIGURA 52 : POSICIONAMENTO DO <i>LASER TRACKER</i> NO ANEL DE ARMAZENAMENTO, E MEDIDAS MATERIALIZADAS POSICIONADAS NO INTERIOR E EXTERIOR DA BLINDAGEM.....	68
FIGURA 53 : POSICIONAMENTO LASER TRACKER HALL EXPERIMENTAL, E MEDIDAS MATERIALIZADAS POSICIONADAS NO INTERIOR E EXTERIOR DA BLINDAGEM	69
FIGURA 54 : QUATRO PONTOS DE CONEXÃO PARA REDES DE REFERÊNCIA DO SIRIUS.....	70
FIGURA 55 : COMBINAÇÃO REDES DE REFERÊNCIA SIRIUS	71
FIGURA 56 : ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO POSIÇÃO LONGITUDINAL	73
FIGURA 57 : ESTIMATIVA DA REPETIBILIDADE EIXOS (HORIZONTAL, LONGITUDINAL E VERTICAL) MEDIDA MATERIALIZADA POSIÇÃO LONGITUDINAL	74
FIGURA 58 : ESTIMATIVA ERROS DE MEDIÇÃO ARTEFATO TRANSVERSAL	76
FIGURA 59 : ESTIMATIVA DA REPETIBILIDADE EIXOS (HORIZONTAL, LONGITUDINAL E VERTICAL) MEDIDA MATERIALIZADA POSIÇÃO TRANSVERSAL	77
FIGURA 60 : DESVIOS PONTOS DE CONEXÃO, TÉCNICAS UTILIZADAS PARA CONEXÃO DE REDES.....	81
FIGURA 61 : COMPARATIVO ENTRE REDES DE REFERÊNCIA HALL EXPERIMENTAL	82

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: VALOR DE INCERTEZA DO INSTRUMENTO, CALKINS (2015)	24
TABELA 2: ESPECIFICAÇÃO DE TOLERÂNCIA DE ALINHAMENTO (WIKI-SIRIUS, 2020)	45
TABELA 3 : DISTÂNCIAS CALIBRADAS EM 20 ⁰ C.....	57
TABELA 4: DESVIOS DOS DIFERENTES SETUPS DE ORIENTAÇÃO DAS MEDIDAS MATERIALIZADAS	79
TABELA 5: COMPARAÇÃO REDES DE PONTOS HALL EXPERIMENTAL	83

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1:PRINCIPAIS PARÂMETROS DO ANEL DE ARMAZENAMENTO DO SIRIUS (LNLS,2014).....	40
QUADRO 2: ESQUEMÁTICOS DAS ORIENTAÇÕES DAS ESTAÇÕES DE MEDIÇÃO	62

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ADM - *Absolute Distance Meter*

ASME - *American Society of Mechanical Engineers*

CERN - *Organisation européenne pour la recherche nucléaire*

CNPEM - *Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais*

DESY - *Deutsches Elektronen Synchrotron*

EDM - *Electronic Distance Meter*

FAIR - *Facility for Antiproton and Ion Research*

FERMILAB - *Fermi National Accelerator Laboratory*

GUM - *Guide to the expression of uncertainty in measurement*

IFM - *Interferometers*

ISO - *International Organization for Standardization*

IWAA - *International Workshops on Accelerator Alignment*

LHC - *Large Hadron Collider*

LNLS - *Laboratório Nacional de Luz Síncrotron*

MCTI - *Ministério da Ciência, Tecnologia, e Inovações*

MPE - *Máximo Erro Permitido*

NPL - *National Physical Laboratory*

NIST - *National Institute of Standards and Technology*

SLAC - *Stanford Linear Accelerator Center*

SMR - *Spherically Mounted Retroreflector*

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento na demanda de produtos e estruturas cada vez maiores, como por exemplo aeronaves, telescópios, navios, turbinas eólicas e aceleradores de partículas, surge a necessidade de desenvolver novos equipamentos e métodos de medição, capazes de realizar as medições necessárias para o correto funcionamento dos mesmos e atingir os requisitos do projeto. Conforme descrito por Kyle *et al.* (2001) a medição e posicionamento de objetos no espaço, com algumas centenas de metros, ficou conhecido como metrologia de grande escala ou grandes volumes. Segundo Puttock (1978), a metrologia de grandes volumes é um grande desafio para o metrologista, sendo necessário que ele se adapte e desenvolva novas técnicas de medição, visto que os requisitos de precisão estão se tornando cada vez mais desafiadores.

Este ramo da metrologia normalmente lida com tolerâncias micrométricas, geralmente alcançados apenas em um ambiente controlado de laboratório, para um volume de medição menor.

Entre as diversas aplicações da metrologia de grandes volumes estão os aceleradores de partículas que são as principais ferramentas para a busca experimental de respostas sobre os constituintes fundamentais do universo. Destinados a estudos de áreas como ciências dos materiais, biologia, medicina e química, eles dependem não só da aplicação de alta tecnologia já consolidada em vários segmentos, mas também do desenvolvimento de novas tecnologias para que suas exigências do projeto sejam atingidas (LIU, 2013). As grandes exigências para posicionamento e orientação dos componentes e as típicas dimensões, tornaram a medição e o alinhamento de um acelerador de partículas uma importante aplicação da metrologia de grandes volumes (MAYOUD, 2004).

No que se refere à construção de um acelerador de partículas, independentemente de sua aplicação científica, eles demandam medições e alinhamentos exatos para que operem corretamente. É necessário obedecer a tolerâncias bastante restritas, nas operações de inspeção e posicionamento de

componentes e na análise de deformação de estruturas em um ambiente de grandes volumes.

Para guiar partículas carregadas eletricamente por uma trajetória pré-definida, são utilizados campos magnéticos, geralmente pelo uso de eletroímãs. Segundo Silva (2010) os eletroímãs devem ser medidos e alinhados, para que alcancem suas exigências dimensionais e geométricas, sendo que o alinhamento desses componentes do acelerador é uma parte extremamente importante para seu funcionamento. Segundo Martin (2010) o desafio é garantir que as partículas atravessem o centro desses eletroímãs oscilando em torno de uma trajetória ideal dentro da tolerância especificada. Uma vez que, em função de efeitos não ideais como imperfeições no alinhamento e instabilidade do campo magnético, induzem perturbações do movimento das partículas e dependendo da magnitude, localização e distribuição desses erros, a trajetória pode sofrer desvios e oscilações, ocasionando assim, grandes dificuldades para manter as partículas em sua trajetória ideal no acelerador de partículas.

Para que seja possível realizar determinadas medições em um acelerador de partículas, a medição por coordenadas, por meio de equipamentos como *laser tracker*, *laser scanners*, estação total e fotogrametria está sendo amplamente utilizada (PEGGS *et al.* 2009 MUELANER *et al.* 2010).

O *laser tracker* é um equipamento tipicamente utilizado para medição de grandes volumes, devido ao seu grande alcance de medição, baixa incerteza e a possibilidade de execução de medições em tempo real (SPIESS, 1998 e MUSKE, 1999). No entanto, equipamentos de medição por coordenadas portáteis, como o *laser tracker*, em geral são utilizados fora do ambiente controlado de um laboratório metrológico. Assim para obter uma melhor compreensão do desempenho do instrumento em uma configuração típica de um acelerador de partículas são exigidas verificações regulares para comprovar se ele é capaz de realizar as medições exigidas em um ambiente de grandes volumes e dentro do limite de suas especificações. Para realizar estas verificações, procedimentos em campo utilizando medidas materializadas podem ser empregados, utilizando o valor de referência da medida materializada e o MPE (Máximo Erro Permitido) especificado pelo fabricante do equipamento,

como valor de aceitação e quando os resultados exibidos excederem os valores especificados, uma compensação do instrumento deverá ser aplicada.

Além disso, em ambientes confinados, como nas instalações de um acelerador de partículas, frequentemente há a oclusão do feixe do laser do instrumento de medição, impedindo a realização das medições, uma vez que o *laser tracker* requer linhas livres de visão para a realização de medições (entre a objetiva/saída de laser e o objeto a ser medido). Diante disso, pode-se medir de forma completa um componente com o *laser tracker*, realocando-o em diferentes posições. Para isso, a técnica mais usual é utilizar uma rede de pontos, que consiste em diversos alvos (suportes para acomodar o refletor esférico do *laser tracker*) distribuídos no piso e nas paredes do local de medição, criando uma rede de pontos de referência, visto que é necessário mais de um local para que o instrumento possa visualizar todos os diversos componentes a serem alinhados.

Porém, deve-se ter uma distribuição uniforme dos pontos no volume de medição para se obter alta qualidade no processo de orientação (Harley R, 2003), e a técnica mencionada pode apresentar dificuldades devido ao ambiente confinado, como em locais onde se tem apenas um pequeno e estreito furo na parede, restringindo assim a medição dos pontos distribuídos da rede de referência e impossibilitando a realocação do instrumento em outra área de trabalho.

Desta forma, definiu-se o seguinte problema de pesquisa para este estudo: Quais as contribuições da utilização de medidas materializadas em medições de grandes volumes e em ambientes confinados?

1.1 OBJETIVOS

Para responder a esta questão de pesquisa, este estudo delineou os objetivos descritos nas seções seguintes.

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Dadas as dificuldades enfrentadas nas medições de grandes volumes e em ambientes confinados, o objetivo geral deste estudo é avaliar diferentes aplicações do uso de medidas materializadas em medições que utilizam o *laser tracker* como sistema de medição por coordenadas de referência, tendo em vista as problemáticas enfrentadas no ambiente de medição de um acelerador de partículas de luz síncrotron.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atender ao objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

1. Avaliar o uso de medidas materializadas na verificação da confiabilidade metrológica do instrumento de medição, tendo como base as medições típicas realizadas em um acelerador de partículas;
2. Avaliar o desempenho, em termos de repetibilidade e exatidão, do processo de realocação de um instrumento através do uso de medidas materializadas;
3. Avaliar o uso de medidas materializadas para a conexão entre duas redes de pontos de referência para alinhamentos de aceleradores de partículas.

1.2 VISÃO MACRO DA PESQUISA

Para atingir os objetivos propostos na pesquisa, foram abordadas as etapas de referencial teórico , seguida dos procedimentos metodológicos utilizados, apresentação e discussões dos resultados obtidos e, por fim, as conclusões do trabalho. A Figura 1 mostra a visão macro da pesquisa.

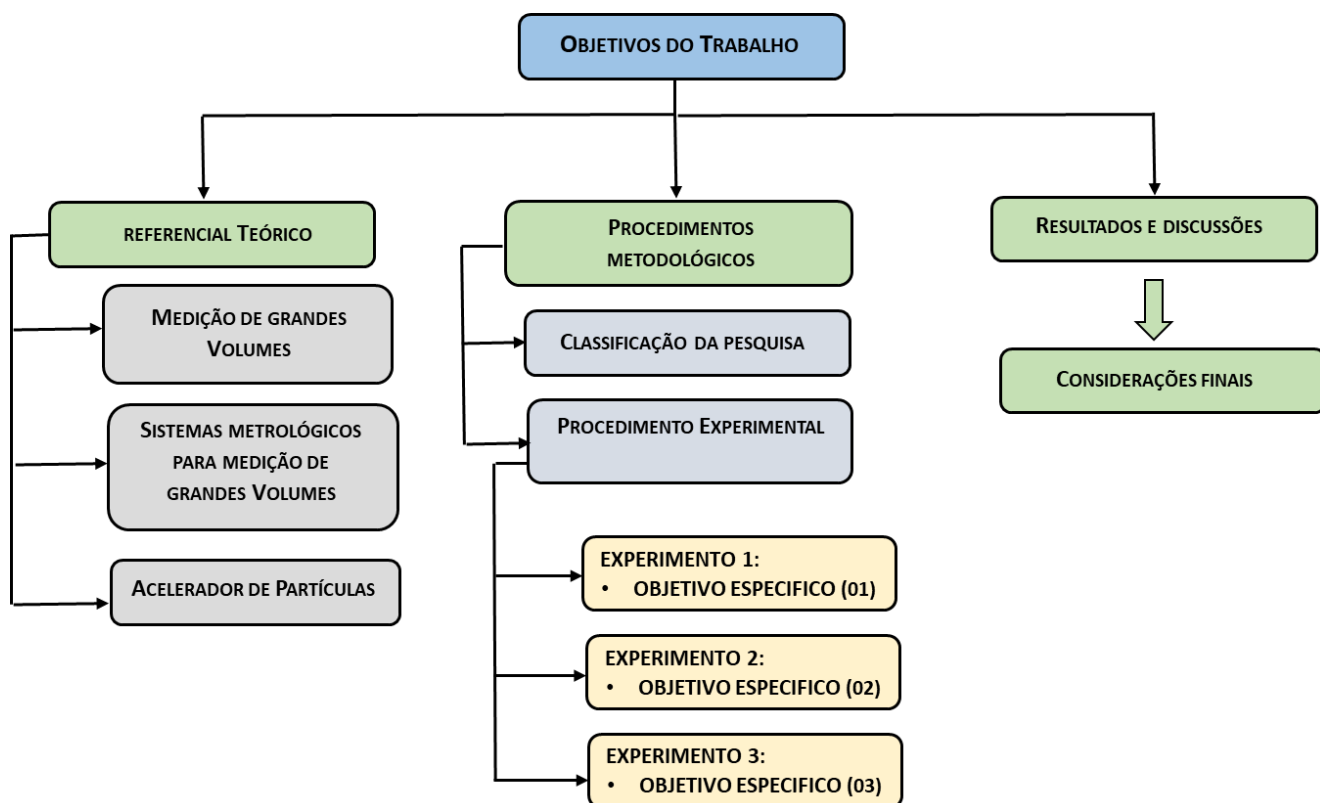


FIGURA 1 : ETAPAS PARA DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos:

Capítulo 1 – Introdução: é apresentada uma contextualização do tema, seguida do problema da pesquisa e dos objetivos do trabalho.

Capítulo 2 – Referencial Teórico: é apresentada uma visão geral dos temas abordados no trabalho: medição de grandes volumes, sistema metrológicos para medição de grandes volumes e aceleradores de partículas.

Capítulo 3 – Abordagem metodológica: é descrita a classificação da pesquisa, seguida do procedimento experimental utilizado no trabalho. São apresentadas as técnicas utilizadas para verificação da confiabilidade metrológica do instrumento de medição, as técnicas de realocação do instrumento de medição e para conexão entre duas redes de pontos de referência de um acelerador de partículas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta o resultado do levantamento bibliográfico realizado durante o desenvolvimento do estudo, apresentando os principais aspectos de definição das medições de grandes volumes, os sistemas metrológicos utilizados para medições em grandes volumes além da abordagem sobre a metrologia e alinhamento em um acelerador de partículas.

2.1 MEDIÇÃO DE GRANDES VOLUMES

Segundo Franceschini *et al.* (2011) a primeira definição de “metrologia em grande escala” surgiu na década de 60, quando Berry D.W (1961) descreveu a metrologia em grande escala como sendo um campo de desenvolvimento em que as habilidades até então separadas do engenheiro agrimensor e do metrologista foram reunidas no que ficou conhecido como “metrologia de grandes volumes” em seu relatório sobre as técnicas de medição precisas utilizadas na construção do “Nimrod” Síncrotron de Prótons, no laboratório de alta energia de Rutherford (Reino Unido).

Anos mais tarde, Puttock (1978) descreve que a metrologia dimensional de grandes volumes representa um grande desafio para o metrologista uma vez que as dimensões lineares variam de dezenas a centenas de metros, sendo tradicionalmente aplicados na construção de grandes máquinas e estruturas como, radiotelescópios, aeronaves e aceleradores de partículas. No artigo publicado por Estler *et al.* (2002), são reiteradas as observações feitas por Puttock sobre os desafios técnicos nas medições de grandes volumes. Ainda, o autor complementa que, frequentemente, é necessário que o metrologista se adapte e desenvolva técnicas para atender os requisitos específicos no trabalho em campo, já que as tolerâncias se tornam cada vez mais desafiadoras.

Schmitt *et al.* (2016) desenvolveu um estudo de revisão e futuras tendências sobre os avanços da metrologia de grandes volumes. Neste estudo

os autores definem a metrologia de grandes volumes em processos de medição que são utilizados na área da tecnologia da fabricação para inspeção dimensional e geométrica, de acordo com as especificações estabelecidas em projeto para objetos em que suas dimensões são de até centenas de metros com tolerâncias desafiadoras, conforme pode ser visto na Figura 2:

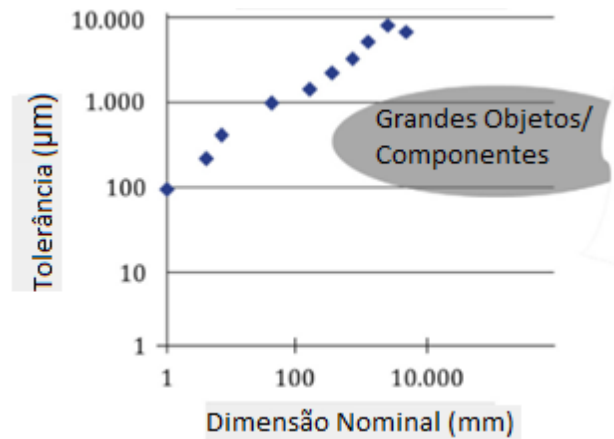


FIGURA 2 : DEFINIÇÃO DE UM GRANDE OBJETO POR DIMENSÃO NOMINAL E TOLERÂNCIA (SCHIMITT, 2016)

A Metrologia de grandes volumes tem sido estudado extensivamente por muitas décadas. No artigo publicado por Franceschini e Maisano (2013), foi realizada uma análise bibliométrica da literatura científica e estudos de patentes relacionadas à evolução da metrologia de grandes volumes. Além disso, o estudo apresenta o crescimento do desenvolvimento e aperfeiçoamento de instrumentos utilizados na metrologia de grandes volumes, para que fosse possível medir objetos com grandes dimensões, nas últimas décadas. A Figura 3 apresenta esta evolução dos principais instrumentos de grandes volumes, com uma pequena descrição das suas características.

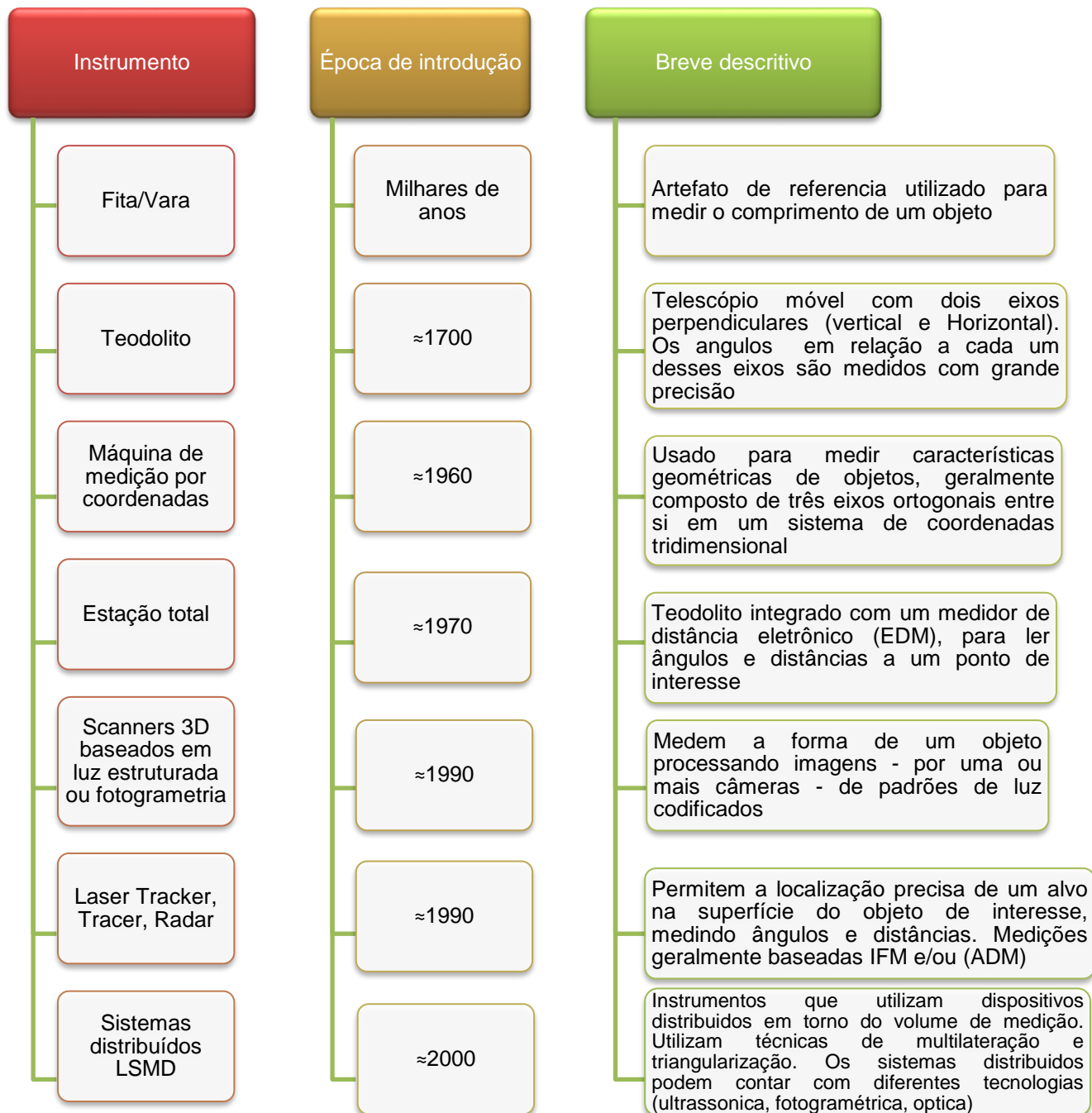


FIGURA 3 : LISTA DE INSTRUMENTOS DE GRANDES VOLUMES E BREVE DESCRIÇÃO
(FRANCESCHINI E MAISANO,2013)

Conforme estudo publicado por Franceschini *et al.* (2014) sobre os sistemas de medição envolvidos em medições de grandes volumes, ditos como LSDM (*Large-Scale/Large-Volume Dimensional Metrology*), o alcance de medição do equipamento é um diferencial entre instrumentos tradicionais da metrologia dimensional e sistemas LSDM. Tendo como desafio realizar medição tridimensional de grandes objetos e estruturas mantendo altos níveis de precisão. A Figura 4 mostra a relação entre a dimensão do objeto a ser medido e a precisão das principais tecnologias LSDM, tipicamente apresentada nas literaturas.

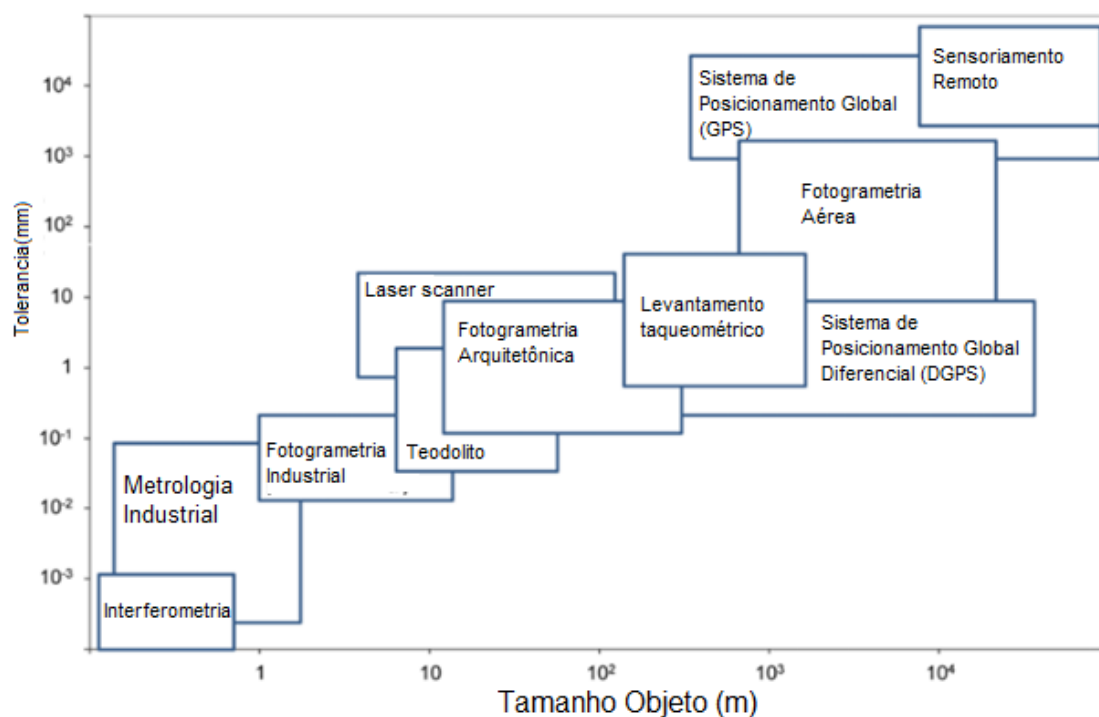


FIGURA 4 : RELAÇÃO ENTRE DIMENSÃO DO OBJETO E PRECISÃO PARA DIFERENTES TECNOLOGIAS LSDM (DE LUHMANN ET AL.,2006)

Ainda no estudo de Schmitt *et al.* (2016) é apresentada uma classificação, por meio da topologia dos sistemas de medição, sendo classificados em sistemas centralizados e distribuídos, conforme ilustra a Figura 5. Os sistemas centralizados são equipamentos com uma única unidade de processamento que podem medir independentemente as coordenadas de um ponto sobre um objeto. Podendo exigir um ou mais acessórios, como por exemplo um refletor esférico (SMR) no caso do *laser tracker*. Os sistemas distribuídos, consistem em equipamentos com unidades de processamento separadas, sendo que os dados

de medição coletados separadamente precisam ser processados para determinar as coordenadas de um ponto. Um exemplo desse sistema é o Nikon iGPS, além de sistemas de fotogrametria. Também pode ser possível utilizar sistemas centralizados em combinação como um sistema distribuído (por exemplo, *laser tracker*).

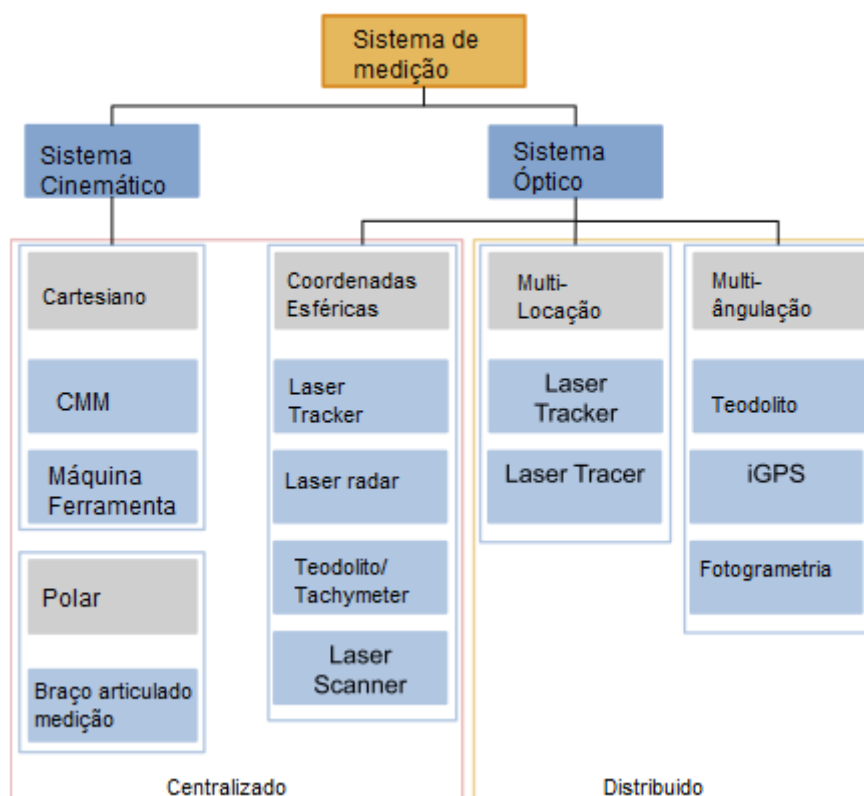


FIGURA 5 : CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE METROLOGIA POR MEIO DA TOPOLOGIA (SCHIMIT, 2016)

2.1.1 SISTEMAS METROLÓGICOS PARA MEDIÇÃO DE GRANDES VOLUMES

Para medição de grandes objetos como antenas de rádio, aeronaves, navios e estruturas como um acelerador de partículas, a medição por coordenadas tem sido uma ferramenta muito utilizada, conforme publicado por (GAO et al, 2016) e (ZHANG et al, 2005). Dentre as tecnologias utilizadas para

medições em grandes volumes podemos encontrar teodolitos, estação total, *laser tracker*, braços tridimensionais, *laser scanners*, além de sistemas de fotogrametria. Assim nos próximos tópicos estão os sistemas metrológicos mais comumente utilizados para medição de grandes volumes.

2.1.1.1 LASER TRACKER

O *laser tracker* foi desenvolvido em meados dos anos 80 e teve sua patente registrada em 1986, por Kam Lau, no NIST (*National Institute of Standards and Technology*). Foram integrados um interferômetro, para medição de distâncias e dois encoders para medição do ângulo Azimuth (α) e ângulo de elevação (β), em um sistema compacto e portátil, para assim obter medições dinâmicas e precisas (LAU K, 1986).

O *laser tracker* foi inicialmente desenvolvido para medir o desempenho dinâmico de robôs, devido à crescente demanda para automatizar os processos de soldagem e montagem nas fábricas (Gallagher, 2003). Assim, para realizar a automação desses processos, era exigido um nível de precisão aplicado à robótica, mais elevado, sendo que naquele período os instrumentos de medição não possuíam desempenho suficiente. Desde sua criação, diversas outras aplicações foram sendo desenvolvidas. Devido à sua flexibilidade e desempenho, é possível realizar medições de grandes volumes em aeronaves, inspeção em gabaritos de montagem e medições de superfícies de grandes componentes, conforme pode ser visto na Figura 6.



FIGURA 6 : EXEMPLO DE APLICAÇÕES DE LASER TRACKERS
 FONTE: CATÁLOGO LEICA LASER TRACKER - PORTABLE COORDINATE MEASURING MACHINE.

Conforme descrito por Spiess (1998) e Muske *et al.* (1999) o *laser tracker* é um equipamento tipicamente utilizado para medição de grandes volumes, devido ao seu grande alcance de medição, alta precisão e a possibilidade de execução de medições em tempo real.

Segundo Viera (2003), o *laser tracker* (Figura 7), só chegou à indústria Brasileira em 1997 pela aquisição da empresa Embraer. Desde então, diversas empresas instaladas no Brasil, em setores como automobilístico, naval, máquinas de construção civil e agrícola, entre outras já possuem *laser tracker* para controle de qualidade dimensional e geométrico dos produtos.

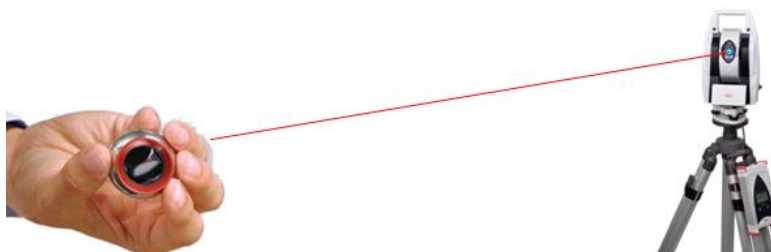


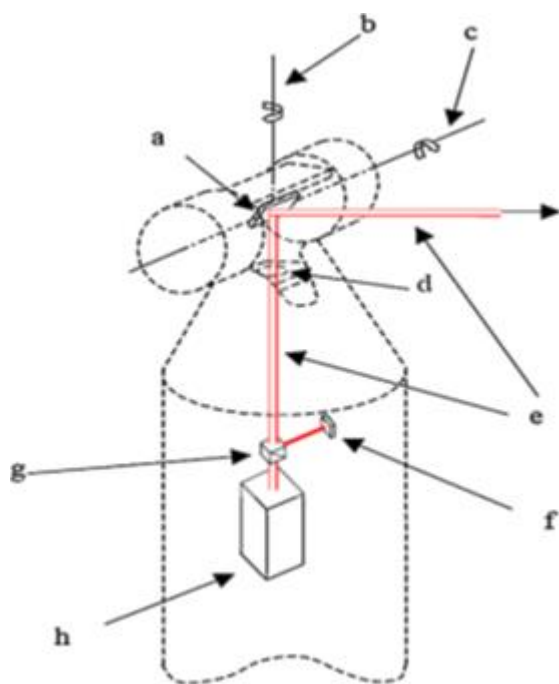
FIGURA 7 : LASER TRACKER LEICA AT-401 E REFLETOR (SMR).
 FONTE: CATÁLOGO LEICA LASER TRACKER - PORTABLE COORDINATE MEASURING MACHINE.

2.1.1.1.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO LASER TRACKER

Segundo Kam Lau (1986), o *laser tracker* é uma máquina de medir por coordenadas que mede coordenadas do ponto de destino, controladas por um refletor com feixe de laser. Para medição ponto a ponto, este equipamento é uma ferramenta muito utilizada, oferece vantagens de flexibilidade em uso, medição eficiente, baixos requisitos de calibração no local e excelente precisão.

Conforme descrito por Muralikrishnan, Phillips e Sawyer (2016), o *laser tracker* é um conjunto de vários componentes mecânicos e seus subsistemas, tais como: estação meteorológica, mecanismo de rastreamento, baterias, mecanismo de direção dos eixos vertical e horizontal e alvos (refletores). Um desenho esquemático de um *laser tracker* é mostrado na Figura 8.

O equipamento de medição, *laser tracker* apresenta um eixo de rotação permanente (eixo vertical) e um eixo de movimentação (eixo horizontal). Em uma configuração geométrica ideal os dois eixos são ortogonais entre si e se conectam em um ponto que serve de origem para o sistema de coordenadas esféricas definidas pelo rastreador. A trajetória do feixe de laser do instrumento até o alvo, captura de forma ideal essa origem e é perpendicular ao eixo de movimentação. Um *encoder* angular é montado coaxialmente com o eixo fixo para ler o ângulo horizontal, enquanto o segundo *encoder* angular é montado coaxialmente com o eixo de movimentação para o ângulo vertical.



- a - Espelho direcional do feixe
- b - Eixo fixo/Vertical
- c - Eixo movimentação/horizontal
- d - Placa de proteção
- e - Feixe do laser
- f - Dispositivos de sensoriamento de posição (PSD)
- g - Divisor de feixe
- h - Interferômetro

FIGURA 8 : CONSTRUÇÃO DE UM LASER TRACKER (SAWYER ET AL. ,2003)

Para sua operação, o *laser tracker* utiliza um interferômetro a laser e dois *encoders* angulares para rastrear a localização de um refletor esféricos (SMR) à medida que ele se move pelo espaço. Assim, a unidade de processamento do equipamento combina as informações de distância do interferômetro com as informações dos *encoders* horizontal e vertical, para calcular as coordenadas do alvo de referência. Segundo Wan et al. (2017) o princípio de operação do equipamento em um sistema de coordenadas esféricas possui o centro do cabeçote do tracker como origem do sistema de coordenadas "O". Deste modo, as coordenadas de distância do alvo de referência (refletor), representadas por "L" são realizadas utilizando um interferômetro a laser com alta precisão, *encoders* angulares, são utilizados para o ângulo Azimute " α " e ângulo de elevação " β ". Conforme pode ser visto na Figura 9.

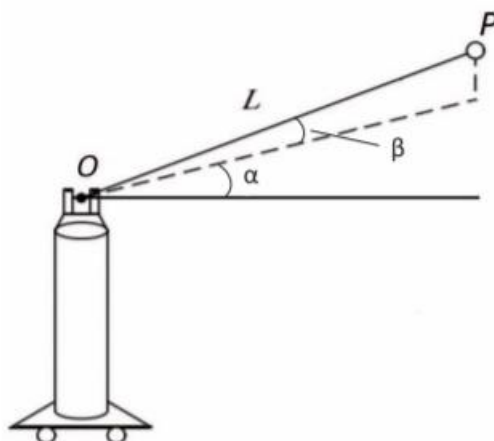


FIGURA 9 : PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO LASER TRACKER (WAN ET AL., 2017).

Para simplificar a leitura, o software de medição converte automaticamente as coordenadas esféricas ($L - \alpha - \beta$) em coordenadas cartesianas (XYZ), comumente utilizadas em campo, por meio das equações 1, 2 e 3:

$$X = L * \cos\alpha * \cos\beta \quad (1)$$

$$Y = L * \sen\alpha * \cos\beta \quad (2)$$

$$Z = L * \sen\beta \quad (3)$$

O *laser tracker* é um equipamento que utiliza um refletor esférico para retornar o feixe de volta ao instrumento, a “*Spherically Mounted Retroreflector*” (*SMR*) consiste em um conjunto retro refletivo de espelhos montados dentro de uma esfera de aço. O refletor é composto por três superfícies refletivas que são mutuamente ortogonais, conforme Figura 10. No artigo publicado por Steffey (2010) ele explica como a *SMR* pode impactar na qualidade das medições e que em uma *SMR* ideal, o ângulo entre duas das três faces do espelho é exatamente de 90° . Na prática, esses ângulos podem diferir em alguns segundos de arco, resultando no retorno do feixe refletido em uma direção que não é paralela ao feixe incidente.



FIGURA 10 : REFLETOR ESFÉRICO (STEFFEY., 2010)

Conforme descrito por Greenwood (1993), o *laser tracker* pode ter dois sistemas de laser, o (IFM) interferômetro e o ADM (*Absolute distance meter*). O funcionamento do sistema IFM consiste na geração de uma interferência flutuante (pulso) ocasionado pelo retorno do laser, tendo variação de forma, proporcional ao deslocamento do refletor. Quando o IFM é usado, não é possível determinar distancias absolutas de um ponto, mas sim distancias relativas a um ponto de partida, conhecido como “*home point*”, havendo distancias maiores ou menores ao ponto inicial. Caso o instrumento tenha somente o sistema IFM, sempre que ocorrer a interrupção do feixe do laser, o equipamento deve reiniciar a medição, a partir do ponto de partida. O “*home point*” ou ponto de partida, é determinado durante a fabricação do equipamento e calibrado durante a montagem do instrumento, sendo posicionado próximo ao cabeçote do instrumento. A Figura 11 ilustra o comprimento de onda, em destaque na figura, criado pelo laser IFM ao encontrar o centro da esfera e retornar ao tracker.



FIGURA 11 : FEIXE DE LASER DO IFM.
FONTE: *HEXAGON MANUFACTURING INTELLIGENT 2012.*

O sistema ADM, por sua vez, realiza medições absolutas, que correspondem a distância até um ponto conhecido em um sistema de coordenadas 3D. Diferente do sistema IFM, no sistema ADM, se o feixe de laser for interrompido durante o processo de medição não é preciso retornar ao ponto de partida do equipamento, sendo necessário somente posicionar o refletor em frente do feixe de laser, que o equipamento calcula a nova posição do refletor no sistema de coordenadas utilizando o ADM, dando continuidade à medição.

No estudo desenvolvido por Peggs (2009) sobre recentes desenvolvimentos em metrologia de grandes volumes, o autor menciona que historicamente, o sistema ADM às vezes eram instaladas em rastreadores a laser com o objetivo principal de restabelecer um dado de distância para o interferômetro, após um evento de quebra de feixe. Com os avanços na tecnologia do rastreador a laser, realizados nos últimos anos, atualmente a grande maioria dos fabricantes oferecerem o equipamento com um ADM, além do interferômetro a laser, possibilitando a conveniência de redefinir o sistema de medição sem precisar retornar o refletor a posição de referência.

2.1.1.1.2 FONTES DE ERROS E VERIFICAÇÃO DO LASER TRACKER

O sistema de medição por coordenadas, assim como qualquer sistema de medição está sujeito a erros. Conforme descrito por Muralikrishnan *et al.* (2009) o *laser tracker* é um instrumento de medição de coordenadas esféricas, que possui um conjunto de vários componentes mecânico, que podem apresentar, desalinhamentos em sua construção, sendo que esses desalinhamentos geométricos introduzem erros sistemáticos na leitura da medição por coordenadas esféricas (ângulos e distância de medição) e, provavelmente, nos comprimentos calculados dos artefatos de referência.

Segundo o Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM, 2012) o erro pode ser compreendido como tendo dois componentes, um aleatório e um sistemático, sendo que eles não podem ser completamente eliminados e muito menos totalmente conhecidos. Contudo, o erro sistemático é mais fácil de ser estimado e corrigido ou reduzido, por variar de forma previsível ou permanecer constante durante as medições, comportamento este que facilita a sua compensação, mesmo sabendo da impossibilidade de eliminá-lo totalmente. O erro aleatório, por sua vez, varia de forma imprevisível, impossibilitando sua compensação. Segundo Lin e Lu (2005) o erro sistemático não pode ser compensado integralmente, mas pode ser reduzido, sendo uma prática usual compensar esses erros através de modelos de erro em software por vez semelhante a utilizado em máquina de medição por coordenadas cartesianas (CMMs). Entretanto, a presença de um modelo de erro geométrico, não acarreta necessariamente na ausência de erros sistemáticos.

Segundo Nasr *et al.* (2012), existem diversos padrões internacionais para a avaliação do desempenho do *laser tracker*, sendo a norma ASME B89.4.19-2006 (*Performance Evaluation Tests and Geometric Misalignments in Laser Trackers*) um dos padrões mais comumente utilizados para verificação do desempenho do *laser tracker*. Outros padrões como a VDI / VDE 2617-parte 10 e a ISO 10360-parte 10 também podem ser utilizados por fabricantes e usuários para avaliar o desempenho do instrumento. A escolha da norma ASME B89.4.19-

2006 neste trabalho, se deve pelo fato dos ensaios práticos para o levantamento dos erros, serem mais aplicados a realidade dos erros de interesse. Os testes descritos na norma *ASME B89.4.19-2006* são sensíveis às diferentes fontes potenciais de erro, incluindo erros resultantes de desalinhamentos geométricos do instrumento.

A *ASME B89.4.19-2006* especifica que pequenos e não intencionais deslocamentos, inclinações, e excentricidade mecânica introduzem erros sistemáticos nas coordenadas esférica medidas (ângulos e leituras de distâncias). É desejável que os testes descritos na *ASME B89.4.19-2006* sejam sensíveis a desalinhamentos geométricos, de modo que quaisquer erros sistemáticos sejam identificados durante a avaliação do desempenho do *laser tracker*. Os testes descritos na *ASME B89.4.19-2006* podem ser realizados em qualquer ocasião, pois seus objetivos são detectar se o *laser Tracker* está realizando medições corretas conforme suas especificações. Sugere-se que os testes sejam realizados depois de longos transportes, movimentações, quedas, suspeita de medições divergentes ou com o intuito de controle da garantia do equipamento.

A norma *ASME B89.4.19-2006* estabelece verificações por meio da medição de um comprimento de referência conhecido (artefato) em uma variedade de configurações e comparando o erro observado (comprimento medido pelo rastreador a *laser* menos o comprimento de referência) com o erro máximo admissível especificado (MPE) especificado pelo fabricante.

A norma *ASME B89.4.19-2006* descreve três tipos de testes a serem realizadas nos *Laser Trackers*:

- Teste de alcance do *laser*.
- Teste do sistema de medição de comprimento.
- Teste (*two Face*) face frontal e traseira do sistema.

1. O teste de *Alcance do laser* faz a avaliação da capacidade de medição de distância do *Laser Tracker* ao longo de um sentido radial. São realizados para avaliar dispositivos de medição de deslocamento (IFM) e/ ou sistema de distância (ADM) de um *laser tracker*.

2. O Teste do Comprimento do sistema de medição é realizado para avaliar a capacidade do *Tracker* em medir comprimentos diferentes, dentro do volume de trabalho, pois este teste tem ligação com a cinemática no tracker e eles são sensíveis a maioria dos desalinhamentos geométricas. A norma exige testes do comprimento do sistema de medição sendo realizada em 33 posições pré-determinadas e duas definidas pelo usuário. Algumas das configurações do teste são mostradas na Figura 12.

- Teste sistema de medição do comprimento horizontal (9 posições).
 - Teste sistema de medição de comprimento vertical (8 Posições).
 - Teste sistema de medição de comprimento na diagonal direito (8 posições).
 - Teste sistema de medição de comprimento na diagonal esquerdo (8 posições).
3. O teste de *Two-face*, utiliza a média entre duas leituras onde se inverte 180° cada *encoder*, com o objetivo de se eliminar desvios de excentricidade, demonstrando diversos desalinhamentos geométricos produzidos por erros angulares que invertem o resultado entre as faces, frontal e traseira do tracker, portanto, são excelentes diagnósticos de distorções geométricas. A norma exige que os erros do *two face* deve ser medidos à 12 posições pré-determinadas.

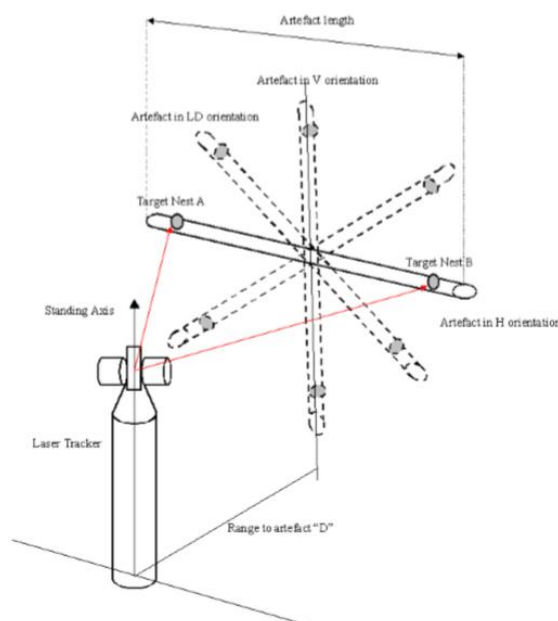


FIGURA 12 : ILUSTRAÇÃO DE 4 CONFIGURAÇÕES DO TESTE DE COMPRIMENTO DA NORMA ASME B89.4.19-2006 (NASR ET AL. 2012)

No estudo desenvolvido por NASR *et al.* (2012), os autores realizam a verificação de um *laser tracker* utilizando a norma ASME B89.4.19-2006, os testes do sistema de medição de comprimento e os testes do sistema de duas faces são realizados no NPL (*National Physical Laboratory*) no Reino Unido, utilizam uma medida materializada, sendo um artefato padrão destinado a reproduzir de maneira permanente uma dimensão de referência, conforme Figura 13, a medida materializada consiste em uma barra de fibra de carbono com 2,5 m de comprimento, montado em uma estrutura com um suporte para o artefato. Dois alojamentos cinemáticos para o refletor de 1,5” ou 0,5” polegadas são fixados na parte externa do tubo a uma distância nominal de 2,3 m. O mensurando é a distância ponto a ponto entre os alojamentos. Os resultados do estudo desenvolvido, mostraram que o *laser tracker* avaliado está em conformidade com o valor de MPE estabelecido pelo fabricante.



FIGURA 13 : MEDIDA MATERIALIZADA E SUPORTE DE FIXAÇÃO (NASR ET AL. 2012).

2.1.2 TOPOGRAFIA E GEODÉSIA

Neste tópico, são apresentados instrumentos utilizados na topografia e geodésia, sendo equipamentos capazes de medir ângulos e distâncias com

grande alcance de medição, sendo comumente utilizados em medições de grandes volumes.

Segundo Borges (1977) a topografia pode ser representada por medidas de distâncias e ângulos, sobre um plano horizontal, podendo ser também conhecida como geometria aplicada. Determinar a coordenada de um ponto no espaço, inclui a medição de distâncias e observações angulares. Os ângulos medidos, são classificados como ângulo horizontal e vertical. Equipamentos como estação total e teodolitos são aptos a realizar a medição de ambos os tipos de ângulos (GHILANI; WOLF, 2012).

Instrumentos como a estação total, apresentado na Figura 14, estão substituindo o teodolito, que é um instrumento muito utilizado para medição de ângulo. Esta substituição é importante, pois uma estação total é capaz de realizar medições angulares com alta precisão, devido a utilização de *encoders* angulares e de realizar medições de distância, com a integração do sistema EDM (*Electronic Distance Meter*).

Segundo Ramos (1999) uma estação total seria como um teodolito equipado com um sistema de medição de distâncias, onde através da emissão de uma luz infravermelha do centro da luneta e que ao atingir um refletor retorna para o ponto de partida, tendo como referência o comprimento de onda da luz infravermelha, podendo assim calcular a distância até o ponto medido. O instrumento ainda é equipado com um sistema de coleta de dados, eliminando assim a operação de anotação dos valores medidos como em atividades com o teodolito.



FIGURA 14 : ESTAÇÃO TOTAL (GHILANI; WOLF2012).

Nas atividades de levantamento de rede de referência, como de um acelerador de partículas, equipamentos como o *laser tracker* e estação total são geralmente utilizados. Segundo Calkins (2015) sobre a quantificação do campo de incerteza em sistemas de medição por coordenadas espaciais, as medições de distancias lineares apresentam melhores resultados quando realizadas por equipamentos como o *laser tracker*, em função do uso do interferômetro, enquanto as estações totais são capazes de medir ângulos com maior precisão devido ao uso de *encoders* angulares de melhor precisão, conforme mostra a Figura 15.

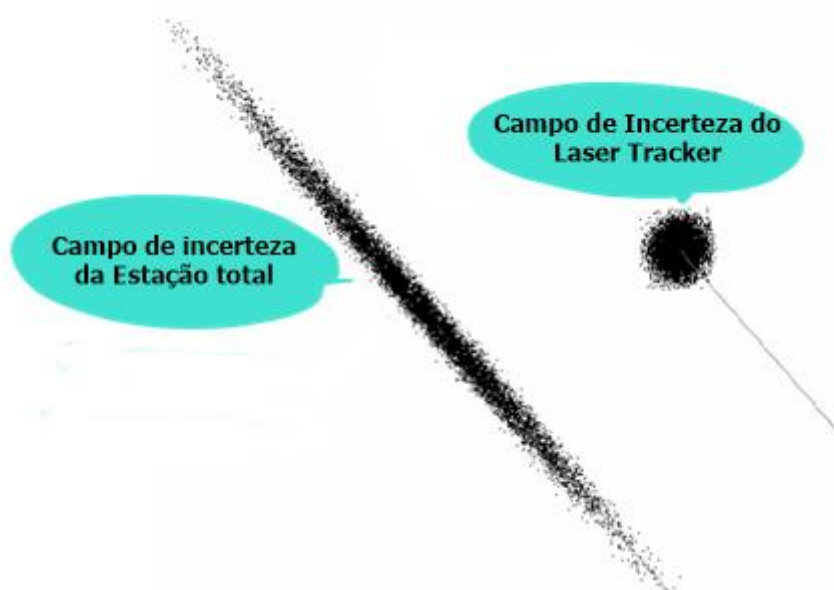


FIGURA 15 : CAMPOS DE INCERTEZA DA ESTAÇÃO TOTAL E DE UM LASER TRACKER (CALKINS., 2015)

Os valores de incerteza típicos para cada componente de medição de cada instrumento estão listados na Tabela 1. Esses valores podem ser determinados através de experimentos de verificação ou obtidos nas especificações do fabricante.

TABELA 1: VALOR DE INCERTEZA DO INSTRUMENTO, CALKINS (2015)

	Unidade de medida	Estação Total	Laser Tracker
Ângulo Horizontal	(arcseg)	0.5	1.3
Ângulo vertical	(arcseg)	0.5	1.3
Distância	(mm)	0,999	0,015

2.1.3 FOTOGRAMETRIA

A fotogrametria é uma técnica de medição na qual a forma, tamanho e posição dos objetos é determinada através de imagens digitais feitas com uso de câmeras. As coordenadas tridimensionais dos pontos, parte da identificação dos pontos homólogos (pontos em comum capturados por duas ou mais câmeras) conforme Figura 16, sendo calculadas através de métodos de

triangulação com uso das imagens capturadas pelas diferentes posições (ESTLER et al. 2002).

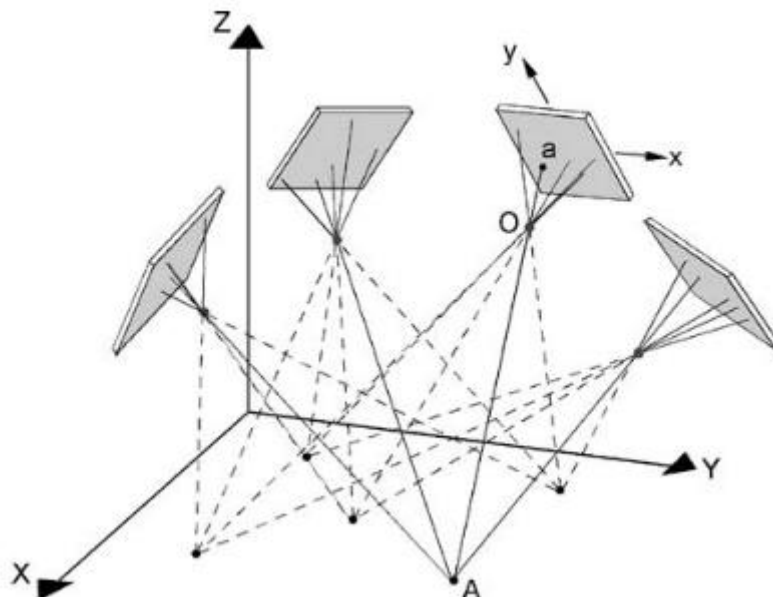


FIGURA 16 : FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE FOTOGRAMETRIA EM UMA REDE DE VÁRIAS ESTAÇÕES (ESTLER ET AL.,2002)

Em um sistema de fotogrametria, a seleção da tecnologia do sensor de captura de imagem é fundamental para diversos requisitos como: precisão, resolução, velocidade, informações espectrais, campo de visão entre outros. Desta maneira, é importante utilizar câmeras que atendam esses requisitos de imagens para se obter uma melhor eficiência e produtividade na realização das medições (LUHMANN, 2010).

Alvos codificados feitos de um material refletivo geralmente são colados nos objetos a serem inspecionados, sendo prática comum na fotogrametria industrial para facilitar a identificação e medição automática. Os alvos são projetados para que possam ser detectados e identificados automaticamente por métodos de processamento de imagem (VAN DEN HEUVEL, 1992).

A fotogrametria começou a se estabelecer na fabricação de aeronaves e naves espaciais na década de 80, para inspeção de ferramentas, componentes e processos de montagens (ESTLER et al. 2002). Na Figura 17 é

possível ver o procedimento de inspeção da porta de uma aeronave Boeing 787, utilizando uma câmera INCA 3 do sistema de fotogrametria do fabricante GSI (*Geodetic Systems Inc*) onde medições são realizadas em vários estágios do processo de produção, para garantir que os resultados estejam dentro dos limites especificados no projeto (LAZAR,2015).



FIGURA 17 : INSPEÇÃO POR FOTOGRAMETRIA DE UMA PORTA EM UMA AERONAVE BOEING 787 (LAZAR., 2015)

Aceleradores de partículas apresentam alguns dos requisitos mais desafiadores para o campo da metrologia de alta precisão. No estudo desenvolvido por Gayde *et al.*, (1997) foram realizadas medições na construção do LHC (*Large Hadron Collider*), com uso da fotogrametria. Este estudo mostrou benefícios como por exemplo, curto período para realização das medições, além da portabilidade do sistema, possibilitando assim o acesso a locais com espaço limitado.

Em estudo publicado por Marbes *et al.* (2008) é apresentado um conceito preliminar de medição baseado em fotogrametria, onde estudaram a possibilidade de utilizar carros de movimentação guiadas por um controle remoto, com câmeras de alta definição montadas sobre os veículos, sendo designadas para capturar imagens da máquina em áreas de difícil acesso e alta radiação do FAIR (*Facility for Antiproton and Ion Research*), acelerador de

partículas que atualmente está sendo construído na Alemanha com colaboração Internacional.

Os princípios, técnicas e aplicações da fotogrametria são encontradas no estudo de Luhmann *et al* (2006) onde os autores mencionam que a grande vantagem da fotogrametria é fornecer um método de medição sem contato para determinar a forma, posição e orientação de uma superfície que é particularmente adequada ao monitoramento de movimentos e mudanças ao longo do tempo (LUHMANN, 2006).

2.1.4 BRAÇO ARTICULADO

As crescentes demandas para inspeção de grandes peças, especialmente em setores de veículos pesados, automotivo e aeroespacial, motivaram o desenvolvimento de máquinas de medir por coordenadas, mais flexíveis e portáteis. Uma tecnologia de medição por coordenadas, não cartesiano, abrange os braços articulados de medição, conforme ilustra a Figura 18.



FIGURA 18 : BRAÇO ARTICULADO DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS (HEXAGON MI).

Segundo Lima (2006) os braços articulados utilizam uma serie de articulações compondo 5, 6 ou 7 graus de liberdade conectados através de

medidores angulares (*encoders*). Para determinar a posição de um ponto no espaço tridimensional é utilizado um sistema de sonda tátil (apalpador) que através da leitura das articulações e modelo cinemático conhecido calcula a posição desse ponto medido no espaço. Sendo o posicionamento do apalpador realizado de forma manual, em um volume de medição esférico.

As transformações do sistema de coordenadas global (fixo a base), até o sistema de coordenadas do apalpador, assim como a representação do volume de trabalho esférico do equipamento, conforme mostra a Figura 19.

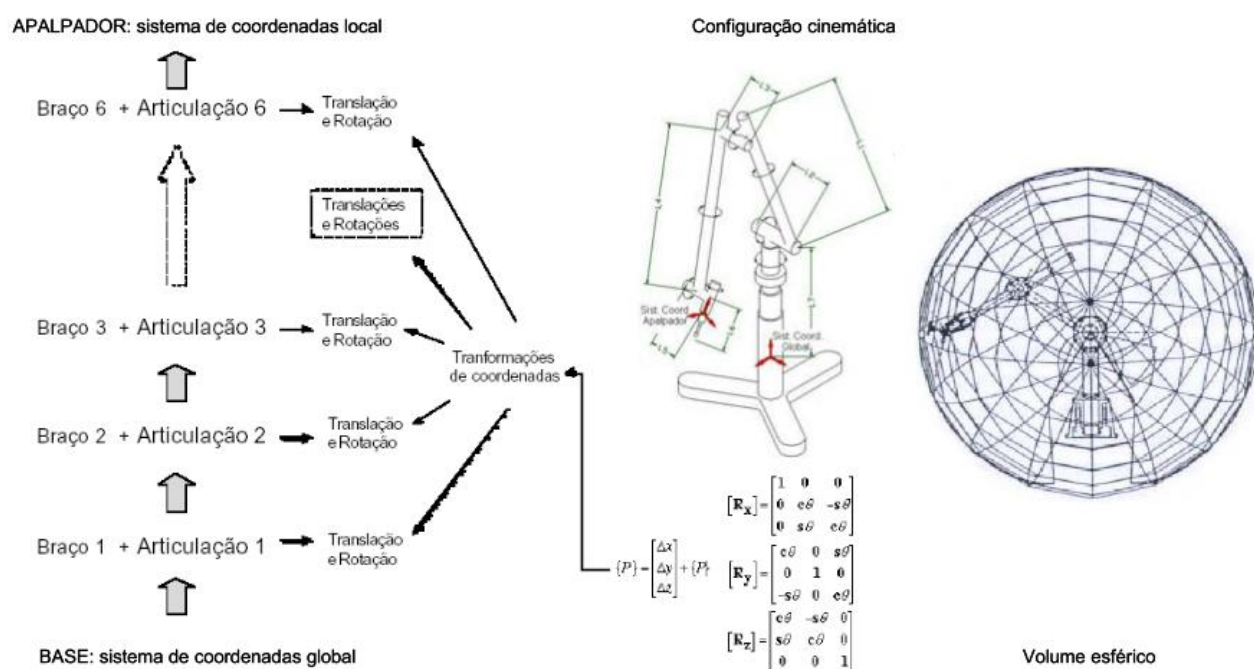


FIGURA 19 : MUDANÇA DO SISTEMA DE COORDENADAS E VOLUME DE TRABALHO (SOUZA, OROSCO E GIAMMUSSO, 2003)

Segundo Hocken e Pereira (2012) os braços articulados de medição são equipamentos portáteis e podem ser montados em diversos locais, geralmente utilizam uma base magnética ou ar comprimido e são operados manualmente pelo metrologista. Dessa forma, medições em campo são possíveis do ponto de vista operacional, com relativa facilidade para o usuário.

Conforme mencionado no trabalho publicado por Souza (2003), em função da configuração e características construtivas os braços articulados de

medição são equipamentos que oferecem algumas vantagens que podem ser decisivas em determinadas operações, como por exemplo: (i) Grande portabilidade e flexibilidade; (ii) Relação vantajosa entre o volume de medição e o tamanho do equipamento; (iii) Menor custo em relação as máquinas de medição por coordenadas clássicas

No entanto, como qualquer outro sistema metrológico, os braços de medição estão sujeitos a limitações. Em geral, eles apresentam uma incerteza de medição maior que as máquinas cartesianas, devido fatores como rigidez da fixação do braço em relação a peça a ser medida e habilidade do operador causam impacto sobre o desempenho metrológico do equipamento (SOUZA, 2003).

Devido a essas limitações, estes equipamentos, são geralmente utilizados para a inspeção e controle de peças com tolerâncias não tão rigorosas, tais como peças plásticas, estampadas e fundidas.

2.1.4.1 VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO DE BRAÇOS ARTICULADOS

Para avaliações do desempenho do instrumento de medição, a *ASM* publicou a norma B89.4.22-2004-*(Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines, 2004)*, norma que aborda métodos padronizados para verificação do instrumento. A norma define três tipos de teste:

- Teste de desempenho do diâmetro efetivo: Neste teste, é realizado a medição do diâmetro de uma esfera calibrada, trata-se de um teste semelhante ao teste de repetibilidade de apalpador para uma máquina de medir por coordenadas cartesiana, definidas pelo ISO 10360;
- Teste de desempenho da articulação de um único ponto: Tem como objetivo avaliar a capacidade do equipamento para fornecer valores semelhante das coordenadas de um ponto quando o instrumento é movimentado e utiliza diferentes orientações de suas articulações;

- Teste de desempenho volumétrico: Neste teste é realizado a medição da distância entre os centros de duas esferas posicionadas nas extremidades de um artefato calibrado, medido em 20 posições no volume de trabalho.

2.1.5 LASER SCANNER

O sistema de laser scanner é um segmento de metrologia de grandes volumes que cresce rapidamente, sendo uma solução eficaz para medição de coordenadas de grandes volumes que exigem alta densidade de pontos e moderada precisão. Esse sistema óptico de medição por coordenadas é capaz de gerar nuvens de pontos com coordenadas de objetos e cenas de maneira fácil e rápida (GONÇALES, 2007).

O *laser Scanner*, em geral, possui dois eixos rotativos que deslocam um único feixe de laser nos planos horizontal e vertical. *Encoders* rotativos são utilizados para medir ângulo vertical (V) e horizontal (H), enquanto um laser modulado é utilizado para medir distâncias (R). Os ângulos medidos e a distância são realizados em um sistema de coordenadas esférico (FERRUCI *et al.* 2014). Conforme pode ser visto na figura 20 o equipamento possui uma fonte de laser e um espelho giratório, sendo eles integrando a um sensor (cabeça) rotativo. O sensor do scanner gira ao longo de “H”, ao mesmo tempo que o espelho gira ao longo de “V”:

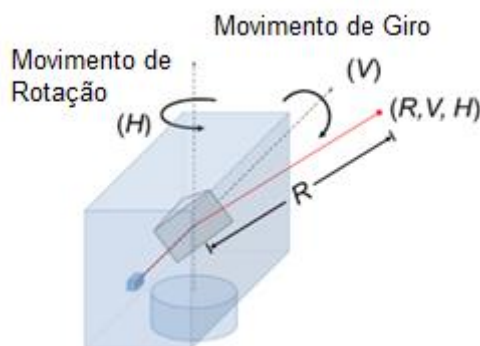


FIGURA 20 : LASER SCANNER, UTILIZANDO UM ESPELHO GIRATÓRIO E O SENSOR GIRATÓRIO PARA DIRECIONAR O FEIXE DE LASER (FERRUCI ET AL., 2014)

Assim, ao usar o feixe de laser em conjunto com os eixos rotativos, o dispositivo é capaz de reconstruir toda a cena em seu entorno.

Segundo Fuss (2004), o *laser scanner* pode ter diversas aplicações em um acelerador de partículas, embora atualmente sua precisão não seja o suficiente para atender os requisitos para o alinhamento dos eletroímãs. O *laser scanner* pode ser usado para posicionamento de componentes menos críticos e criação de um “*As-built*” de maneira rápida do ambiente do acelerador, por coletar dados de posição não apenas do que foi solicitado, mas sim capturar toda informação do ambiente de medição, conforme a Figura 21.

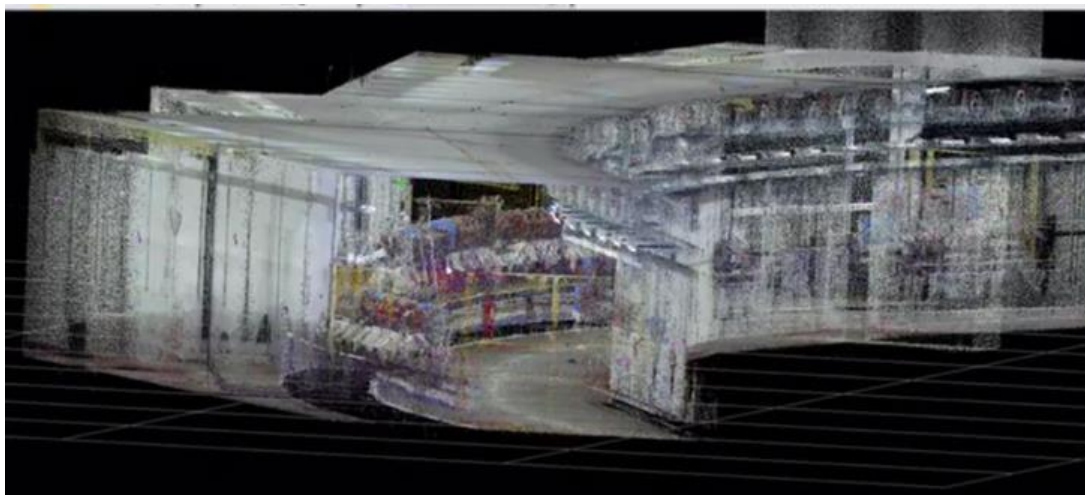


FIGURA 21 : NUVEM DE PONTOS LASER SCANER, ANEL DE ARMAZENAMENTO DO SIRIUS (AUTOR)

Segundo Tommaselli (2003) o *laser scanner* é uma tecnologia de medição por coordenadas capaz de adquirir uma densa nuvem de pontos em um período relativamente curto. Além da elevada quantidade de pontos, esta tecnologia é capaz de capturar a posição de um objeto que esteja até cerca de 100 metros de distância e sem a necessidade do uso de refletores. Estas características fazem com que esta tecnologia seja atrativa para diversas aplicações, como por exemplo, digitalização de ambientes, monitoramentos, análise de obras de construção civil, metrologia de grandes estruturas, entre outros.

2.2 FONTES DE LUZ SINCROTRON

Esta seção apresenta de forma introdutória um acelerador de partículas e fontes de luz síncrotron.

2.2.1 ACELERADORES DE PARTÍCULAS

Em um estudo desenvolvido por Steere (2005) é apresentada uma linha do tempo dos principais aceleradores de partículas. Segundo o autor, o interesse em acelerar partículas teve início no laboratório da Universidade de Cambridge, Inglaterra em 1910, com Ernest Rutherford, acelerando partículas alfa (α), verificando que os átomos têm uma massa incrivelmente pequena e densa no centro. Esses primeiros resultados evoluíram rapidamente para o desejo de meios de acelerar partículas para energias maiores do que aquelas de decaimentos naturais produzidos por isótopos radioativos.

O primeiro acelerador a ser construído, foi por John D. Cockcroft e E.T.S. Walton, em 1930, o projeto foi baseado nos princípios de eletrostática. No ano de 1931, Robert Van de Graaf, descreveu seu modelo para gerar e manter altas tensões, motivando o desenvolvimento de aceleradores lineares-*LINACs*, utilizando campos elétricos oscilantes. Ainda na década de 30, foram construídas as primeiras máquinas circulares, os *Cyclotrons*, observando que se as partículas carregadas rodarem em uma órbita mais longa, sua velocidade irá aumentar.

Na década de 40, com a descoberta da estabilidade das fases, os cientistas começaram a tentar acelerar elétrons em uma trajetória circular bem definida, através da sincronização entre o campo magnético e a fase de uma partícula aceleradora. Em alguns pontos da orbita, o campo elétrico de RF (Rádio frequência) é aplicado e sincronizado ao feixe dos elétrons em orbita, daí o nome síncrotron. A primeira máquina a acelerar elétrons foi construída em 1940, por Donald William Kerst, com a finalidade utilizar raio-x para área médica.

Entre as principais categorias de aceleradores de partículas, destacam-se duas classes principais: (i) Síncrotrons e (ii) Colisores. As fontes de luz síncrotron são aceleradores de partículas capazes de gerar radiação eletromagnética que possibilita que pesquisadores observem a estrutura atômica dos materiais, atuando como um super microscópio. Os colisores de partículas, são aceleradores de partículas que colidem partículas carregadas. As colisões de alta energia geram novas partículas que são detectadas e utilizadas para testar teorias científicas.

Aceleradores de partículas são as principais ferramentas para a busca experimental de respostas sobre os constituintes do universo, são responsáveis por descobertas científicas, em áreas como ciências dos materiais, medicina, biologia, química entre outras. Desde a década de 1930, pesquisas na área da física encontraram um modo de explorar o universo dos átomos e das partículas subatômicas que, caso contrário, continuariam invisíveis aos seres humanos (STEERE, 2005). Interações entre partículas subatômicas, que acontecem somente em altas energias, são investigadas pelo ser humano através da utilização de aceleradores de partículas. Assim, diversos prêmios Nobel foram concedidos diretamente por causa de descobertas realizadas com o uso de aceleradores de partículas.

Para ilustrar a importância de pesquisas realizadas de fontes de luz síncrotron, este estudo destaca o *Brookhaven National Laboratory*, situado nos Estados Unidos, com o atual acelerador de partículas NSLS-II (National Synchrotron Light Source II), inaugurado em 2015. A instituição já foi laureada com 7 prêmios Nobel ao longo de sua história (BNL,2020).

No ano de 2009, os cientistas Ramakrishnan, Steitz e Yonath com o uso de um acelerador de partículas utilizaram um método chamado cristalografia de raio-X para mapear cada posição, átomo por átomo, dos ribossomos, tornando possível o desenvolvimento de novos antibióticos. Os resultados das pesquisas renderam aos cientistas o prêmio Nobel de Química. (YONATH et al., 2000)

No ano de 2012, dois detectores do LHC (*Large Hadron Collider*) que pertencem ao CERN (em francês, *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*), anunciaram a observação de uma nova partícula compatível com o

bóson de Higgs previsto pelo modelo padrão. No ano seguinte, o Prêmio Nobel de Física foi concedido a François Englert e Peter Higgs pela descoberta teórica do mecanismo que contribui para a origem de partículas de massa subatômicas.

2.2.2 FONTES DE LUZ SINCROTRON E O PROJETO SIRIUS

Na busca para melhor compreender o universo ao nosso redor, é preciso entendê-lo em uma escala cada vez menor. Já é conhecido que toda matéria é formada por átomos, que por sua vez são compostas de um núcleo, formado por prótons e nêutrons, e a eletrosfera, formada por elétrons. No entanto para observar os átomos que possuem dimensões da ordem de um décimo de nanômetro ($\times 10^{-9}$) é preciso utilizar uma forma diferente de luz, com comprimento de onda muito menor que a luz visível (MARTIN, 2010)

A luz, denominada de radiação eletromagnética, sempre foi uma ferramenta fundamental na investigação e estudo do universo pelo ser humano. A luz visível percebida pelos olhos humanos, corresponde a uma pequena fração do espectro eletromagnético. Entretanto, o espectro eletromagnético não comporta apenas a luz visível, mas também ondas com diferentes frequências, começando pelas ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, ultravioleta, raios-x até a radiação gama, de maior frequência conforme pode ser vista na Figura 22, onde é apresentado uma classificação das diversas regiões do espectro eletromagnético incluído a faixa da radiação que é gerada pelas fontes de luz sincrotron, que compreende da radiação infravermelho até os raio-X.

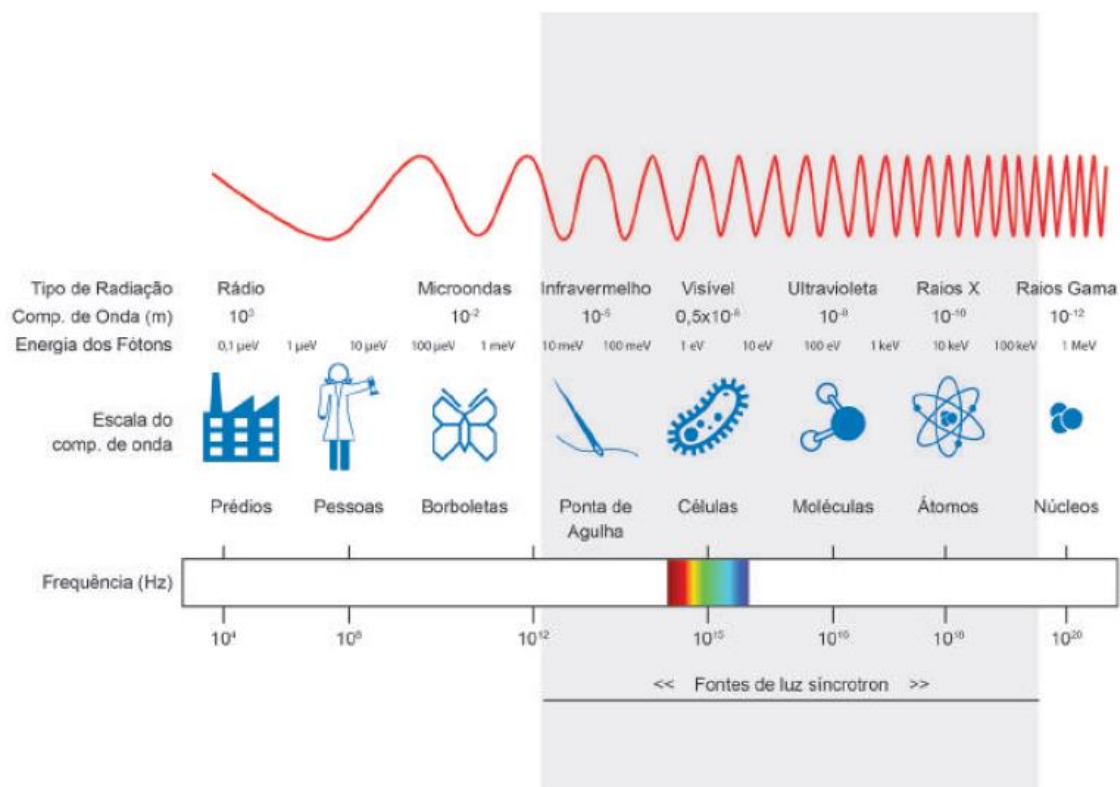


FIGURA 22 : ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO, CLASSIFICADO DE ACORDO COM O COMPRIMENTO DE ONDA E FREQUÊNCIA (LNLS, 2014)

A produção da radiação sincrotron permite a utilização de diferentes técnicas de estudo e investigação da matéria, sendo possível realizar análises com resolução espacial de nanômetros e acompanhar a evolução temporal de processos que ocorrem em frações de segundo.

A luz sincrotron, é gerada por cargas elétricas relativísticas (com velocidade próxima à velocidade da luz no vácuo) quando desviadas de sua trajetória por uma força centrípeta de origem magnética, emitindo assim radiação sincrotron tangencial à trajetória do feixe, evento esse que pode ser visto conforme Figura 23.

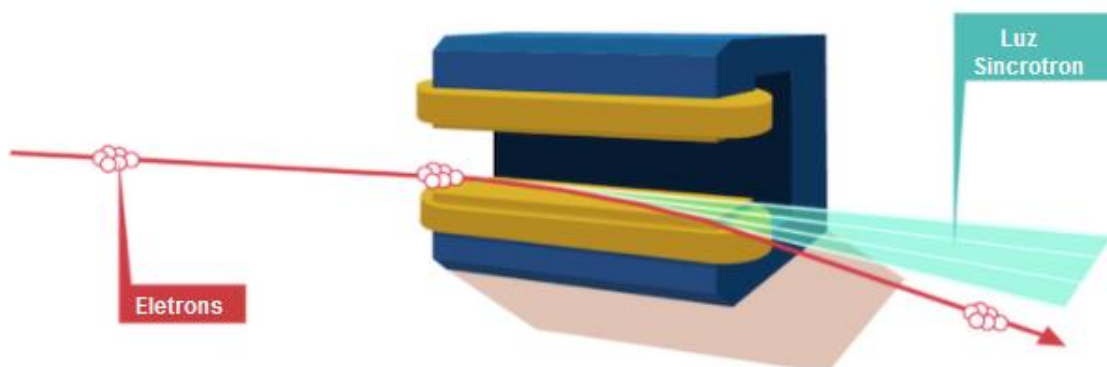


FIGURA 23 : FEIXE DE CARGAS ELÉTRICAS SENDO DEFLETIDO PELA AÇÃO DE UM CAMPO MAGNÉTICO PARA PRODUZIR A LUZ SINCROTRON (THE EUROPEAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY)

Para realizar a aceleração e o desvio da trajetória das partículas é necessário um conjunto de aceleradores. As fontes de luz síncrotron, são compostas por três estruturas aceleradoras: (I) Acelerador linear, ou Linac, onde ocorre a criação do feixe de elétrons, emitido por meio de um canhão de elétrons, os quais são acelerados em linha reta e atingem o primeiro nível de energia; (II) Booster, o segundo acelerador, tem por objetivo receber a energia do Linac e assim aumentar sua energia para o nível operacional e injeta-lo no terceiro acelerador; (III) Anel de armazenamento, onde as partículas são mantidas em uma trajetória circular e estável com o auxílio de um conjunto de eletroímãs que compõem a rede magnética do anel de armazenamento, eletroímãs conhecidos como dipolos desviam a trajetória dos elétrons, ocasionando perda de energia em forma de radiação síncrotron. A energia perdida pelos elétrons na emissão da radiação síncrotron é compensada através de cavidades de rádio frequência (RF). A radiação síncrotron defletida pela ação do campo magnético é direcionada e condicionada para estações experimentais nas chamadas linhas luz. Cada linha de luz é equipada para preparar e analisar as amostras a serem estudadas. Todas as etapas descritas acima, podem ser vistas na Figura 24.

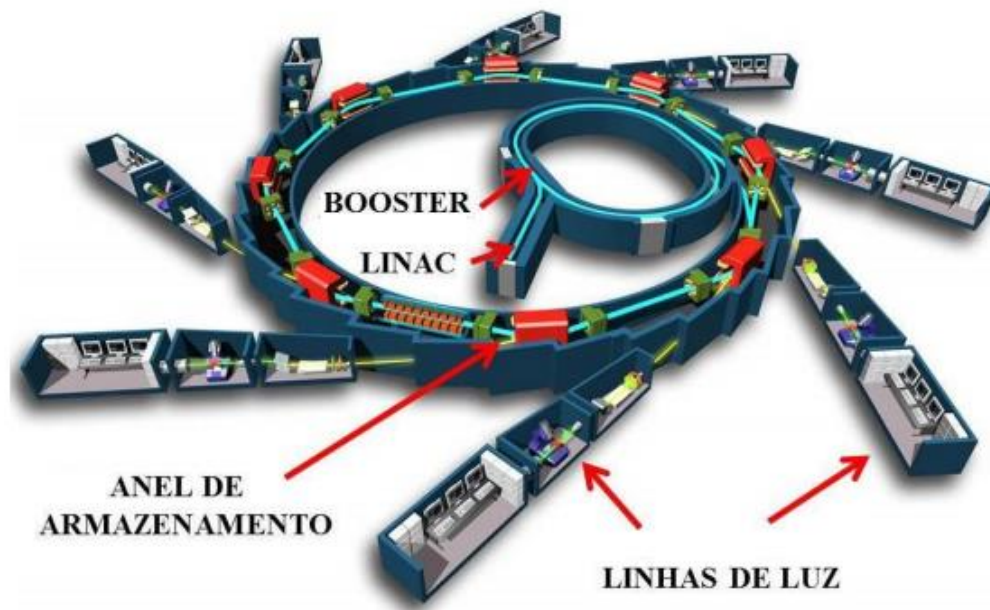


FIGURA 24 : ESQUEMÁTICO DA FONTE DE LUZ SOLEIL, NA FRANÇA (SOLEIL SINCROTRON)

As fontes de luz, diante do perfil tecnológico e histórico podem ser classificadas em 4 gerações. De acordo com Winick (1997) as fontes de luz consideradas de primeira geração não eram projetadas exclusivamente para geração de luz síncrotron. Elas eram, para estudos de física nuclear ou física de alta energia, sendo a radiação síncrotron produzida, tratada apenas como efeito “parasita”. A segunda geração de fontes de luz síncrotron foram projetadas de forma otimizada para sua produção e dedicados exclusivamente para uso da radiação síncrotron, sendo emitida através do uso de dipolos magnéticos. As fontes de luz de terceira geração começaram a surgir na década de 90 e outros foram construídos na década seguinte, conforme mostra a Figura 25, sendo projetados para ter menor emitância e ser otimizada para uso de equipamentos que provocam oscilações na trajetória do feixe, produzidas por uma sucessão de campos magnéticos alternados, conhecidos como dispositivos de inserção (wiggler e onduladores), produzindo assim uma luz mais brilhante que a produzida por eletroímãs de dipolo. Um dos principais parâmetros que caracteriza a qualidade de uma fonte de luz síncrotron é a emitância, de modo que, quanto menor a emitância, maior o brilho da radiação produzida (ROQUE; WESTFAHL, 2017).



Nome	Localidade	Energia (GeV)	Ano início de comissionamento
European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)	França	6.0	1992
Advanced Light Source (ALS)	EUA	1.9	1993
Taiwan Light Source (TLS)	Taiwan	1.5	1993
Elettra Synchrotron Light Source (ELETTRA)	Itália	2.4	1993
Pohang Light Source (PLS)	Coréia do Sul	2.5	1995
Advanced Photon Source (APS)	EUA	7.0	1995
MAX-Lab (MAXII)	Suécia	1.5	1997
Super Photon Ring – 8 GeV (SPring-8)	Japão	8.0	1997
BESSYII Accelerator (BESSYII)	Alemanha	1.9	1998
Swiss Light Source (SLS)	Suíça	2.4	2001
Canadian Light Source (CLS)	Canadá	2.9	2003
Stanford Synchrotron Radiation Laboratory (SSRL-SPEAR3)	EUA	3.0	2004
SOLEIL Synchrotron (SOLEIL)	França	2.75	2005
Diamond Light Source (Diamond)	Reino Unido	3.0	2006
Australian Synchrotron	Austrália	3.0	2007
Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF)	China	3.5	2008
PETRA III at DESY	Alemanha	6.0	2008
Synchrotron Light Facility (ALBA)	Espanha	3.0	2010

FIGURA 25 : FONTES DE LUZ SINCROTRON COM BAIXA EMITÂNCIA, TERCEIRA GERAÇÃO (NATIONAL SYNCHROTRON RADIATION RESEARCH CENTER, TAIWAN)

A fim de manter a competitividade, desenvolvimentos tecnológicos recentes definiram uma quarta geração de fonte de luz síncrotron, baseadas em projetos de novas redes magnéticas capazes de atingir “ultrabaixa” emitância. Assim, como chamadas de fontes de luz de quarta geração, já está em operação a Max-IV na Suécia e Sirius, no Brasil, ainda em fase de comissionamento.

Diversas fontes de luz ao redor do mundo estão estudando aprimoramentos para a quarta geração como: ESRF-II, na França; APS-U, nos EUA; *Spring8*-II, no Japão. O projeto Sirius tem como objetivo a construção da nova fonte de luz síncrotron de quarta geração no Brasil, começou a ser construída em 2014, para substituir a fonte de 2ª geração de 1,37 GeV e circunferência de 93m, nomeada de “UVX” (sigla que representa os termos “do ultravioleta ao raio-X”), a primeira fonte de luz síncrotron do Hemisfério Sul, foi inaugurada em 1997, mas que nos últimos anos havia deixado de ser competitiva, muito em decorrência de sua baixa energia e alta emitância (100 nm.rad), apresentando assim características limitantes a suas aplicações e atingindo limites físicos em termos de novas linhas de luz ou melhorias em seus aceleradores.

A fonte de luz Sirius, encontra-se em fase de comissionamento no LNLS (Laboratório Nacional de Luz Síncrotron), o qual faz parte do CNPEM (Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais), organização social qualificada pelo (MCTI) Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Planejado para colocar o Brasil na liderança mundial de produção de luz síncrotron, tendo papel estratégico para o futuro da ciência e da tecnologia do país. Trata-se de uma Fonte de Luz Síncrotron de 4ª geração, com 518 m de circunferência e energia de 3 GeV (RODRIGUES *et al.*, 2018). O projeto Sirius deve ser a fonte de luz mais brilhante do tipo, formado por uma estrutura magnética completamente nova, comparável apenas ao já inaugurado MAX IV na Suécia (LIU *et al.* 2014).

O Quadro 1 apresenta alguns parâmetros da fonte de luz Sirius, sendo que a especificação completa pode ser vista em (LNLS, 2014).

QUADRO 1: PRINCIPAIS PARÂMETROS DO ANEL DE ARMAZENAMENTO DO SIRIUS (LNLS, 2014)

Parâmetros	Valores
<i>Energia (top up)</i>	3.0 GeV
<i>Corrente</i>	500 mA
<i>Circunferência</i>	518.25 m
<i>Número de trechos retos</i>	20
<i>Comprimento dos trechos retos</i>	10 x 7 m; 10 x 6 m
<i>Frequência de revolução</i>	0.578 MHz
<i>Período de revolução</i>	1.729 μ s
<i>Emitância sem elementos de inserção, horizontal</i>	0.28 nm.rad
<i>mitância sem elementos de inserção, vertical (@1% de acoplamento)</i>	2.8 pm.rad
<i>Campo magnético em dipolo de campo baixo (LowFD)</i>	0.584 T
<i>Campo magnético em dipolo de campo alto (HighFD)</i>	1.95 T
<i>Número de dipolos de campo alto</i>	20
<i>Energia crítica de dipolos de campo alto</i>	11.7 keV
<i>Energia crítica de dipolos de campo baixo</i>	3.5 keV
<i>Perda de energia por volta nos dipolos</i>	494 keV
<i>Potência de radiação dos dipolos</i>	247 kW
<i>Frequência de RF</i>	499.8 MHz

A nova fonte de luz Sirius, conforme Figura 26, terá capacidade para abrigar 40 linhas de luz, sendo que atualmente, para as fases I e II estão planejadas 18 linhas de luz, abrangendo aplicações científicas em áreas estratégicas do Brasil, como energia, agricultura, saúde e meio ambiente, (RODRIGUES *et al.*, 2018).



FIGURA 26 : VISTA ÁREA INSTALAÇÕES SIRIUS (REVISTA FAPESP, 2020)

Conforme pode ser visto na Figura 27, a fonte de luz Sirius é composta por 3 aceleradores: (1) Acelerador Linear “Linac” com energia de 150MeV; (2) Booster, acelerador responsável pelo sistema de injeção; (3) Anel de armazenamento, projetado para operar com energia de 3GeV, além das linhas de luz (4). O Anel de armazenamento e o Booster são concêntricos e localizados no mesmo túnel com geometria circular e o acelerador Linear é localizado em um túnel próprio conectado ao túnel circular. Uma descrição detalhada do acelerador e de todos os seus subsistemas está incluída no Wiki- Sirius (<http://wiki-sirius.inls.br>).

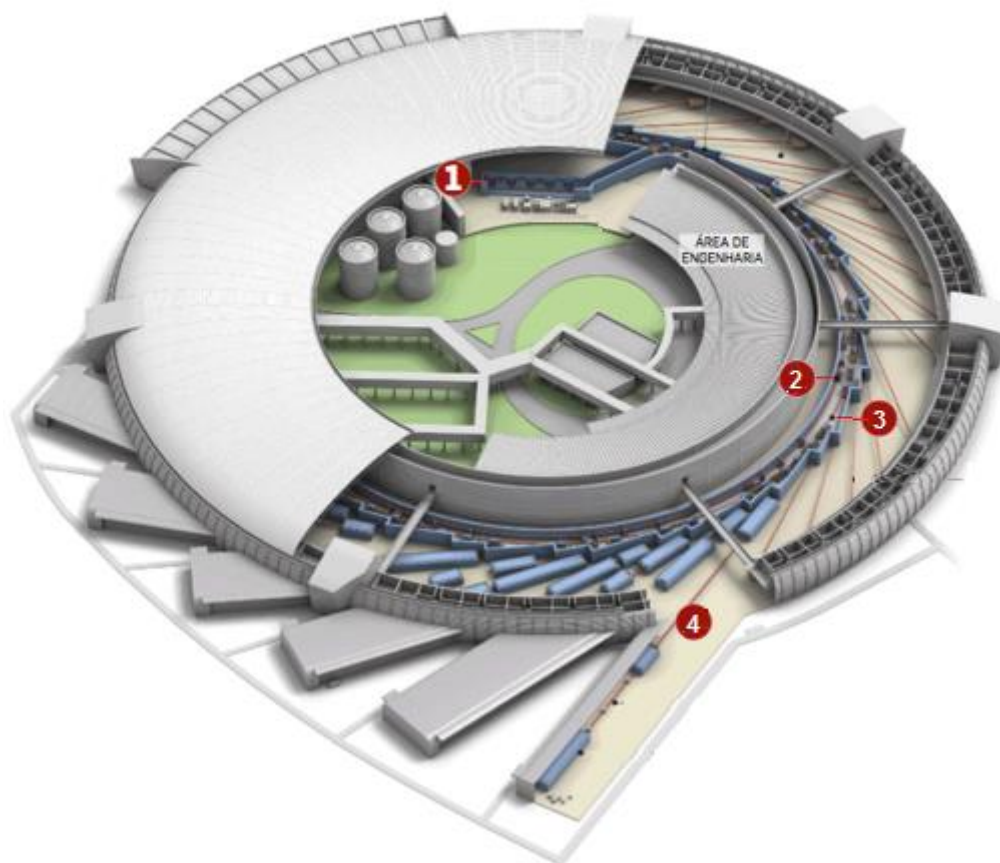


FIGURA 27 : ESTRUTURA DA FONTE DE LUZ SIRIUS (FOLHA DE SÃO PAULO., 2020)

Conforme já mencionado, um dos principais componentes de uma fonte de luz são os eletroímãs que compõem a rede magnética, sendo posicionados de tal maneira a formar uma trajetória muito bem definida das partículas. No entanto, para que funcionem corretamente, sua posição e orientação devem ser mantidas em um alto nível de exatidão. Sendo então a rede magnética determinante para as características do feixe de elétrons e, conseqüentemente, da luz produzida.

Para que seja possível alcançar a qualidade esperada da nova fonte de luz Sirius, se faz necessário uma menor emitância, número que pode ser compreendido como o produto da divergência do feixe pela sua área, ou seja quanto menor a emitância, melhor a resolução espacial e temporal dos experimentos e para que esses limites sejam alcançados, é fundamental atender as tolerâncias no alinhamento dos componentes da rede magnética

(GERALDES, 2015). Em fontes de luz mais avançadas, os físicos de partículas utilizam simulações numéricas, relativa à dinâmica das partículas, para determinar quanto o desalinhamento da rede magnética pode ser tolerado (BIZEK *et al.*, 1991; WERIN, 1994).

Este procedimento de simulação é feito aplicando desalinhamentos aleatórios em torno das coordenadas nominais da rede magnética. Na sequência, através do monitoramento da trajetória das partículas é realizado o ajuste da magnitude dos desalinhamentos, permitindo assim definir limites de erro de posicionamento, que sejam capazes de gerar uma trajetória estável para orbita das partículas.

Entre as ferramentas numéricas usadas neste procedimento, destacam-se o MAD (*Methodical Accelerator Design*), e o DMS (*Dispersion Matched Steering*). Em um acelerador de partículas, o eletroímã é responsável por manter o feixe em um caminho desejável, sendo que os principais eletroímãs da rede magnética são: Dipolos, Quadrupolos e Sextupolos. Segundo Wiedemann, (2007) os dipolos são eletroímãs de dois polos responsáveis por defletir o feixe de elétrons e definir sua trajetória, enquanto os quadrupolos são responsáveis pela focalização e defocalização do feixe, e os sextupolos, atuam na correção de um fenômeno conhecido como aberração cromática, que ocorre devido à dispersão do feixe nos dipolos de curvatura pelas diferenças energéticas das partículas (quanto maior a energia, menor a curvatura que a partícula sofre no dipolo). Na Figura 28, é possível observar o esquemático de um superperíodo da rede magnética do Sirius, com os dipolos, quadrupolos e sextupolos e na Figura 29 é possível observar os eletroímãs montados sobre os berços no anel de armazenamento.

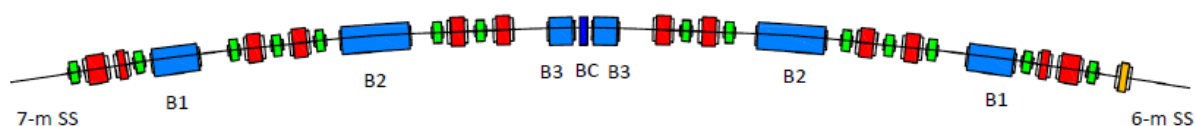


FIGURA 28 : ESQUEMÁTICO COM VISTA SUPERIOR DO ANEL DE ARMAZENAMENTO DO SIRIUS: DIPOLOS EM AZUL, QUADRUPOLOS EM VERMELHO E SEXTUPOLOS EM VERDE (LNLS, 2014)

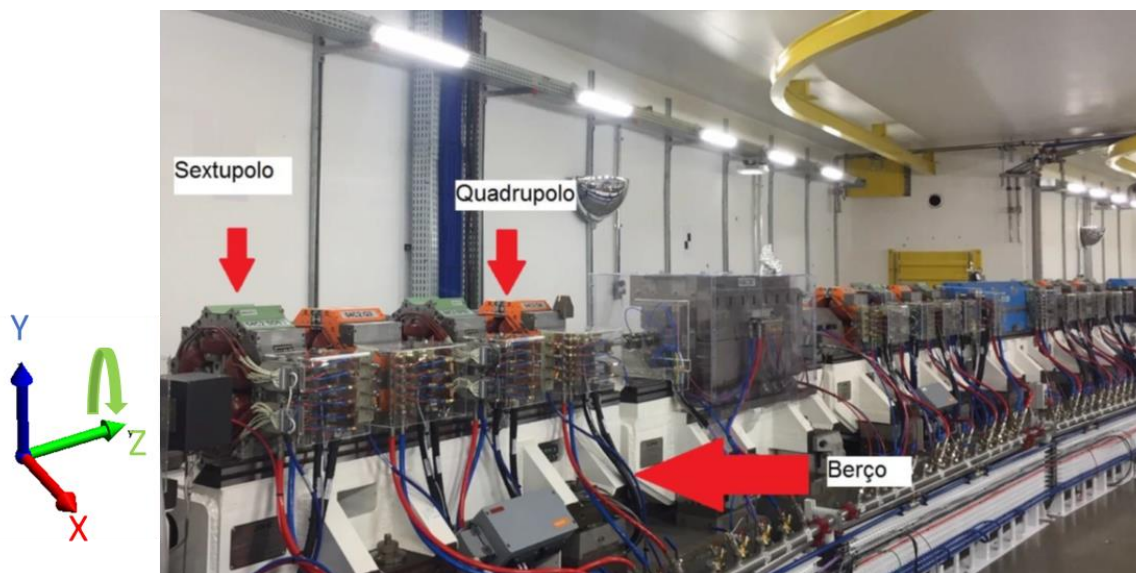


FIGURA 29 : BERÇO COM SEXTUPOLOS E QUADRUPOLOS DO ANEL DE ARMAZENAMENTO DO SIRIUS (AUTOR)

Com o desenvolvimento das primeiras máquinas *sincrotron*, surge o desafio de realizar o alinhamento desses aceleradores com dimensões típicas de centenas de metros a alguns quilômetros. A atividade de alinhamento de um acelerador de partículas contém desafios que sobrepõem os domínios da metrologia e geodesia tradicional. As novas e mais avançadas fontes de luz sincrotron exigem tolerâncias micrométricas entre berços, em distancias que podem chegar a 30 quilômetros, sendo necessário a aplicação de técnicas especializadas e equipamentos de última geração para que seja possível atender os requisitos (MARTIN, 2010).

A atividade de alinhamento é de grande importância, pois o desempenho da fonte de luz depende de trajetórias estáveis com partículas carregadas com alta energia, que se aproximam da velocidade da luz.

A Tabela 2 apresenta as especificações de tolerância para desvios de alinhamento transversal e rotacional para os berços dos eletroímãs do anel de armazenamento do Sirius, assumindo distribuição normal truncada em $\pm 1\sigma$.

TABELA 2: ESPECIFICAÇÃO DE TOLERÂNCIA DE ALINHAMENTO (WIKI-SIRIUS, 2020)

Tipo de erro	Berço /Berço
Erro Transversal x e y (μm)	80
Erro rotacional em torno do eixo (<i>roll</i>) (<i>mrad</i>)	0,3

As especificações da tabela 2, tratam da tolerância nos graus de liberdade mais severos, sendo dois de translação eixos (X e Y) e um de rotação, conforme visto na figura 29, estes são erros de desalinhamentos mais nocivos para os parâmetros de funcionamento do acelerador.

Para que seja possível realizar o alinhamento dos diversos componentes que compõem um acelerador de partículas utiliza-se o conceito que envolve o uso de uma rede geodésica com pontos fixos, distribuídos no local onde o acelerador de partículas será instalado (KELLER, 1991). Para isso, é necessário a coleta de dados em mais de um local para que o instrumento possa visualizar todos os diversos componentes a serem medidos e alinhados do acelerador de partículas.

As atividades de levantamento de rede e alinhamento em aceleradores de partículas eram tipicamente realizadas por meio de instrumentos e técnicas geomáticas, como níveis de precisão e teodolitos (CARLÉ; NILSON, 1995). Com a disseminação e desenvolvimento dos instrumentos portáteis de medição por coordenadas, aceleradores de partículas com até algumas centenas de metros, tradicionalmente utilizam sistemas de medição de coordenadas esféricas (FRIEDSAM, 1994). Segundo estudo publicado por Yu *et al* (2014) o laser tracker tem tido grande êxito nas aplicações em aceleradores de partículas, demonstrando grande eficiência e precisão nas medições realizadas.

Nos aceleradores de partículas, cada ponto da rede de referência equivale a um dispositivo para acomodar o refletor esférico, conforme mostra a

Figura 30. Estes dispositivos são normalmente fixados no piso, parede e teto do acelerador, para servirem como uma rede de pontos de referência a serem usados no processo de alinhamento.



FIGURA 30 : APOIO PARA ACOMODAR O REFLETOR ESFÉRICO DA REDE DE PONTOS (AUTOR)

Cada ponto da rede de referência é medido diversas vezes, por diferentes posições do laser tracker, conforme Figura 31, o que permite diversas observações, sendo possível estimar a localização desse ponto no espaço e sua respectiva incerteza.

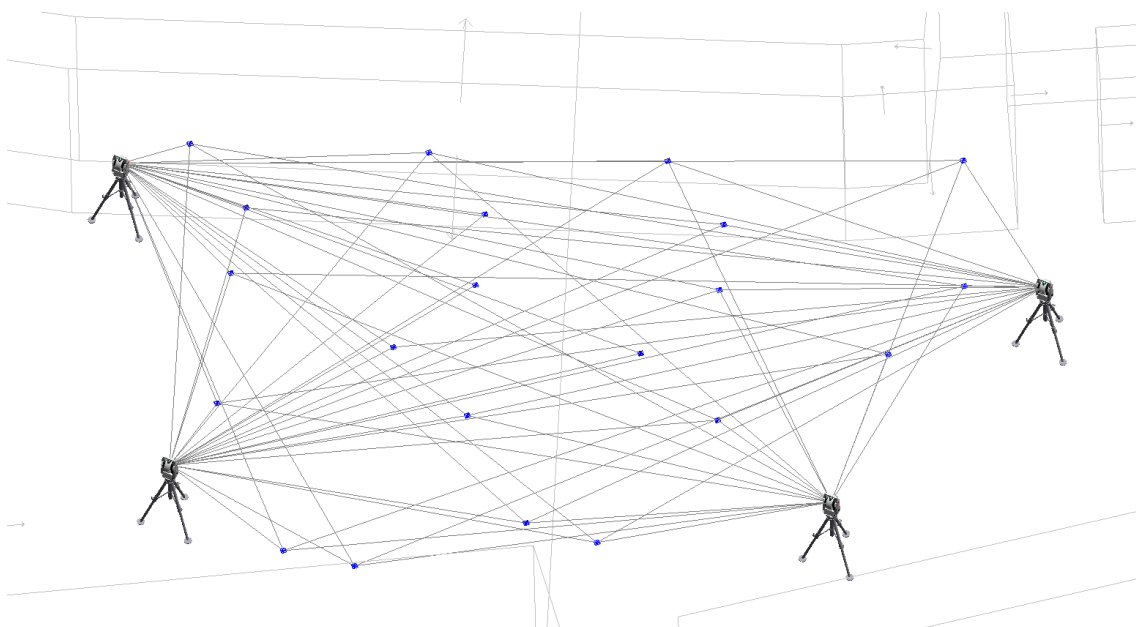


FIGURA 31 : PONTOS MEDIDOS POR DIFERENTES ESTAÇÕES DE LASER TRACKER PARA CRIAÇÃO DA REDE DE PONTOS DE REFERÊNCIA (AUTOR)

Em estudo publicado por Leão *et al.* (2015) foram feitas simulações computacionais para investigar alguns parâmetros da rede de referência, como distância entre pontos, disposição ao longo do volume da máquina e número de observações por pontos, com a finalidade de reduzir as incertezas da rede de pontos de referência a uma incerteza pretendida.

Para que seja possível fornecer uma estimativa da localização desses pontos com as diferentes observações, processo pelo qual é conhecido em topografia e geodesia como ajustamento de rede, é necessário o uso de algum método para tratamento dos dados. O método dos mínimos quadrados é frequentemente utilizado em campo, com a finalidade de minimizar a soma quadrática dos resíduos. Tal método pressupõe que erros aleatórios estejam ocorrendo e que os resíduos entre as observações sejam normalmente distribuídos (GHILANI; WOLF, 2012).

Diversos grupos de alinhamento de aceleradores de partículas implementaram seu próprio método de estimativa da localização dos pontos utilizando mínimos quadrados para realizar os ajustes de rede e assim ser possível fazer o alinhamento da máquina, é o caso da rede de referência subterrânea do acelerador Fermilab (WOJCIK; LAKANEN, 1997).

No entanto, Calkins (2002) propôs e implementou no software *SpatialAnalyzer*, hoje do grupo *Hexagon Manufacturing Intelligence*, um algoritmo de propagação de incertezas e ajustamento de redes. O algoritmo denominado USMN (*Unified Spatial Metrology Network*) calcula a melhor estimativa dos pontos através de um processo semelhante aos mínimos quadrados, realizando o ajustamento de redes, ponderando de maneira diferente as influências de cada instrumento, com base nas distâncias de medição e aplica simulações de Monte Carlo para avaliar a incerteza resultante dos pontos da rede.

Após o levantamento da rede do anel de armazenamento e a criação do sistema de coordenadas de referência, conforme a Figura 32, é possível localizar o instrumento usando pontos da rede de referência distribuídos dentro no anel de armazenamento do acelerador de partículas e alinhar os componentes na posição de destino. Quanto mais baixos os valores da incerteza para a rede, com

maior confiabilidade podemos determinar a localização do instrumento e consequentemente de mais qualidade será o processo de alinhamento dos componentes (LEÃO *et al.* 2015)

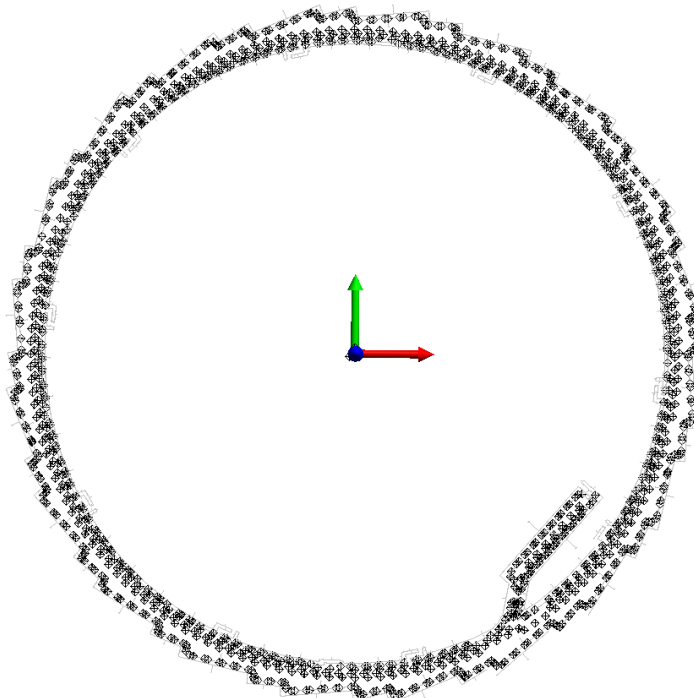


FIGURA 32 : REDE DE PONTOS DE REFERÊNCIA DO ANEL DE ARMAZENAMENTO

Ao lado externo, existe um *hall* experimental, onde ficam as estações de pesquisas experimentais, aptas para receberem a radiação sincrotron provinda do anel de armazenamento. Os componentes que serão instalados nas estações experimentais devem estar alinhados dentro das tolerâncias especificadas em projeto. Portanto, também há necessidade de uma rede de pontos de referência de alinhamento no *hall* experimental, pontos em azul na Figura 33, com o mesmo sistema de referência que a rede de pontos de dentro da blindagem.

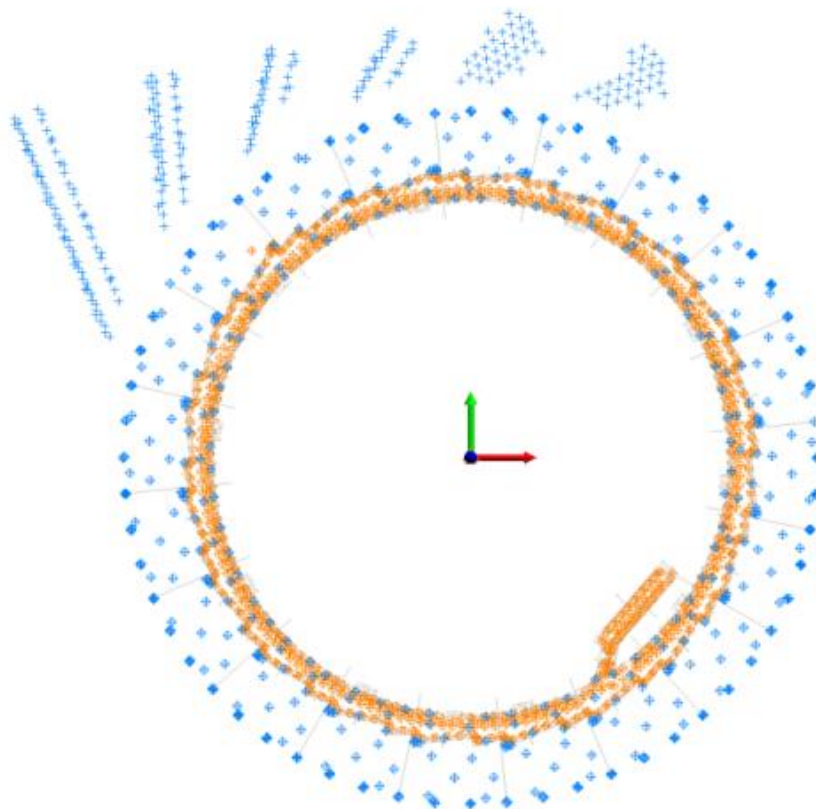


FIGURA 33 : REDES DE REFERÊNCIA DE ALINHAMENTO DO SIRIUS (CNPEM/LNLS,2020)

Um acelerador de partículas de radiação síncrotron deve estar contido por uma blindagem, composta por paredes de concreto especial com até 1,5 m de espessura, sendo necessárias para conter a radiação gama, produzida por feixes de luz de amplo espectro, emitidos em diversas linhas tangenciais ao anel de armazenamento do acelerador. Por consequência, a rede de alinhamento do anel de armazenamento também está contida dentro da blindagem (pontos em laranja na Figura 33). Diante disso, a conexão entre as redes de referência é dificultada, sendo que, devido a oclusão do feixe do laser, por consequência da blindagem, visto Figura 34, impossibilitando a medição de pontos coincidentes em uma estação de dentro e outra fora da blindagem. Deste modo, novas estratégias de conexão entre instrumentos devem ser utilizadas.



FIGURA 34 : BLINDAGEM DE RADIAÇÃO E HALL EXPERIMENTAL DO SIRIUS (AUTOR)

Em medições com teodolitos (instrumento de topografia e geodesia), é utilizado a estratégia de conexão mútua entre os instrumentos, utilizando um dispositivo intercambiável no centro de rotação de cada equipamento, conforme a Figura 35. O conceito serviu como base para desenvolvimento de uma técnica para uso com laser tracker em situações de trabalho em espaço confinado.

Essa técnica necessita de 2 *laser trackers* e consiste em localizar um laser tracker usando outro já localizado como referência, medindo pontos de uma calota esférica no cabeçote de cada instrumento e na sequência fazem um giro vertical e horizontal de 180° , para que as medições sejam feitas novamente na outra face do equipamento, (OLIVEIRA e LUCKE, 2020).

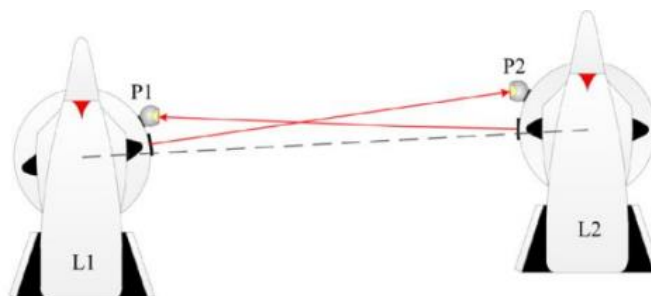


FIGURA 35 : ESQUEMÁTICO DE TÉCNICA DESENVOLVIDA, A PARTIR DO CONCEITO UTILIZANDO TEODOLITOS (GAO, 2016)

Desta maneira, as redes de referência podem ser relacionadas e conectadas por pequenos e estreitos furos existentes na parede da blindagem, nas chamadas saídas de linhas de luz, que interligam o anel de armazenamento ao hall experimental, conforme esquemático da Figura 36.

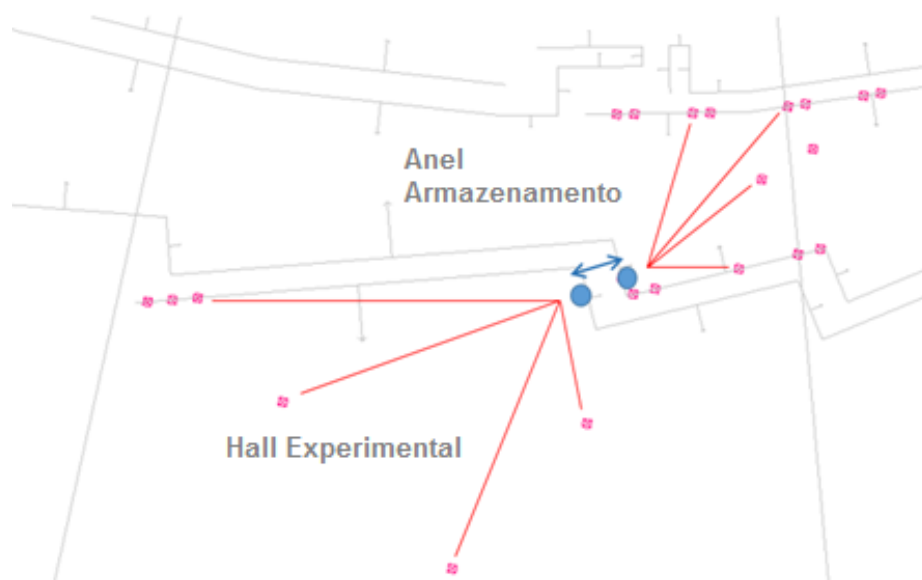


FIGURA 36 : ESQUEMÁTICA CONEXÃO ENTRE REDES UTILIZANDO FURO NA BLINDAGEM

A problemática enfrentada nesta técnica é devida ao elevado tempo gasto em todo o processo de medição e à exigência do uso de dois *laser tracker* simultaneamente. Essa técnica foi empregada para conexão da rede de referência do anel de armazenamento e rede de referência do *hall* experimental do Sirius, sendo já validada internamente e obtendo bons resultados.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os procedimentos metodológicos desta pesquisa, que consiste na caracterização da pesquisa e materiais e métodos.

Esta pesquisa está classificada quanto a abordagem, natureza, objetivos e procedimento, de acordo com a Figura 37.

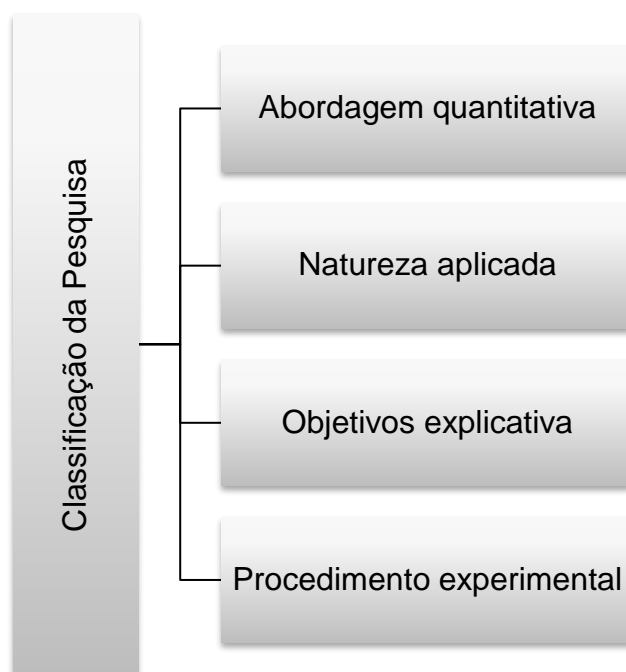


FIGURA 37 : CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com a Figura 37, esta pesquisa está classificada com abordagem quantitativa, pois ela utiliza técnicas quantitativas em suas diversas fases, desde a coleta dos dados até as análises dos resultados, por meio de ferramentas matemáticas e estatísticas (MIGUEL, 2011).

A natureza aplicada do estudo está relacionada com os seus resultados, que devem gerar informações e conhecimento (MARCONI e LAKATOS, 2010)

desta forma, este estudo deve gerar informações e conhecimento para diferentes aplicações do uso de medidas materializadas em medições com *laser tracker*, tendo em vista as problemáticas, enfrentadas em um ambiente de grandes volumes e confinado de um acelerador de partículas.

Quanto aos objetivos, esta pesquisa é classificada como explicativa, por estudar um determinado fenômeno de forma mais aprofundada, explicando detalhadamente as relações entre as variáveis (SANTOS, 2007). Ainda segundo o autor, este tipo de pesquisa consiste numa investigação mais aprofundada de um fenômeno, por meio de métodos experimentais, que possam auxiliar no desenvolvimento da pesquisa. Desta forma, este estudo busca entender as diferentes aplicações no uso de medidas materializadas nas medições de grandes volumes e em ambientes confinados de um acelerador de partículas que utilizam o *laser tracker* como instrumento de medição.

Com relação ao procedimento, que se refere à maneira pela qual são obtidos os dados utilizados no estudo, esta pesquisa está classificada como experimental. Serão realizados experimentos para avaliar o uso de medidas materializadas na avaliação da confiabilidade metrológica, no processo de realocação e no processo de conexão entre duas redes de referência. Martins (1998) afirma que a pesquisa experimental é caracterizada por verificar a relação causa e efeito, por meios planejados e controlados de coleta de dados.

3. 1 MATERIAIS E MÉTODO

Para a realização da parte experimental deste estudo, foram planejados três experimentos. Foram utilizados um conjunto de equipamentos para realização dos experimentos, coleta de dados e análise dos resultados.

3.1.1 MEDIDA MATERIALIZADA

Para a realização dos experimentos serão utilizadas medidas materializadas em dois artefatos físicos destinados a reproduzir de maneira permanente dimensões de referência, com o propósito de lidar com as diversas

exigências de atividades de alinhamento na fonte de luz Sirius. A geometria da medida materializada é ajustada para possibilitar verificações periódicas do desempenho de instrumentos de medição por coordenadas portátil. As medidas materializadas também devem ser capazes de serem utilizadas em processos de realocação do instrumento em ambientes confinados, onde temos apenas pequenos e estreitos furos, sendo de grande importância a distribuição e quantidade de pontos, deste modo possui múltiplas distâncias distribuídas nas diversas faces de orientação, conforme a Figura 38).

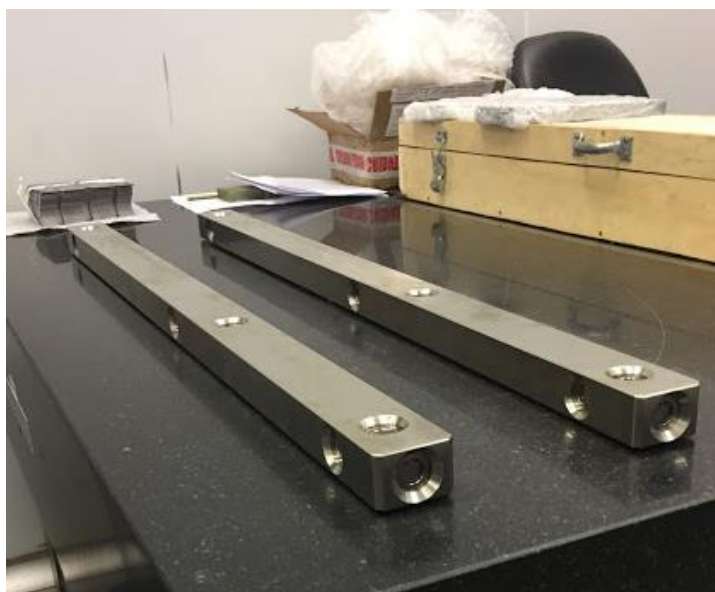


FIGURA 38 : MEDIDAS MATERIALIZADAS

Para a fabricação, foi escolhido um material de baixo coeficiente de expansão térmica, em consequência das variações de temperatura encontradas em um ambiente de medição de grandes volumes, sendo fabricado no material Invar (FeNi36), cujo coeficiente de dilatação é de $1,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, entre 0°C e 100°C .

Para sua utilização foi fabricado um suporte cinemático no qual utiliza três pontos de apoio distribuídos sobre sua base, para minimizar a deformação causado pelo seu próprio peso e permitir sua montagem sobre um tripé, para medição com *laser tracker*. Suas características dimensionais foram então calibradas em um laboratório de metrologia acreditado pelo Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, obtendo assim o valor verdadeiro convencional para as respectivas distâncias.

3. 1.2 EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO

Para a realização do controle dimensional, deve ser utilizado o *laser tracker* do fabricante leica *Geosystems* da série AT403, com uso de um refletor esférico de 1,5". O fabricante informa que o desempenho do equipamento pode ser calculado através da equação quatro, mais conhecida como MPE (*Maximum Permissible Errors*):

$$MPE = \pm 15\mu m + 6\mu m/m \quad (4)$$

3. 1.3 SOFTWARE DE MEDIÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Para controle do *laser tracker* e cálculos de propagação e ajustamento de redes de referência, será utilizado o software *SpatialAnalyzer* do grupo *Hexagon manufacturing Intelligence*. Este software é o mais utilizado em atividades relacionadas a metrologia e alinhamento de aceleradores de partículas. O software utilizado dispõe de ferramentas de método de mínimos quadrados, para encontrar a melhor solução para cada grau de liberdade, com os menores erros residuais possíveis.

Para segunda etapa de verificação do desempenho do *laser tracker*, será utilizado o software "*Tracker Pilot*", fornecido em conjunto com o equipamento pelo fabricante *Leica-Geosystems* do grupo *Hexagon manufacturing Intelligence*, sendo utilizado exclusivamente para gerenciar os acessórios de medição do instrumento e realizar procedimentos de avaliação do desempenho e compensações, quando necessárias.

3. 2 O MÉTODO DE PESQUISA

Conforme já definido, o método desta pesquisa é experimental, para o qual serão realizados três experimentos distintos que permitirão avaliar as diferentes aplicações do uso de medidas materializadas em medições que utilizam o *laser tracker* como sistema de medição por coordenadas de referência. Estes experimentos foram planejados para que respondam a cada um dos objetivos específicos propostos.

3. 2.1 EXPERIMENTO 01

O objetivo deste experimento é avaliar a confiabilidade metrológica do *laser tracker* em medições realizadas em ambiente de grandes volumes, como em um acelerador de partículas. A proposta deste experimento é atender as exigências das medições em um acelerador de partículas. A base técnica para este experimento é a norma ASME B.89.4.19-2006, porém não serão realizados todos os testes para erros geométricos pois o objetivo principal não é fazer uma avaliação completa da melhor capacidade do instrumento, mas avaliar tarefas específicas do uso do instrumento em atividades executadas dentro de um ambiente de grandes volumes.

A ideia fundamental do teste proposto neste experimento é medir distâncias 3D de uma medida materializada no espaço e compará-las com a distância de referência por meio das medidas materializadas. Além disso, este experimento prevê avaliar os sensores do sistema de medição angular e do sistema de medição de distâncias (ADM) do instrumento, para avaliar se estão dentro do limite de suas especificações ou se necessitam de algum tipo de compensação.

Para que fosse possível realizar estes procedimentos, as características dimensionais foram calibradas em uma máquina de medir por coordenadas da Mitutoyo, modelo Beyond-Crista-710, na empresa Aferitec, localizada na cidade de Piracicaba-SP. Trata-se de um laboratório de metrologia acreditado pelo

CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025. As principais distâncias calibradas entre os slots (Figura 39) estão apresentadas na Tabela 3.

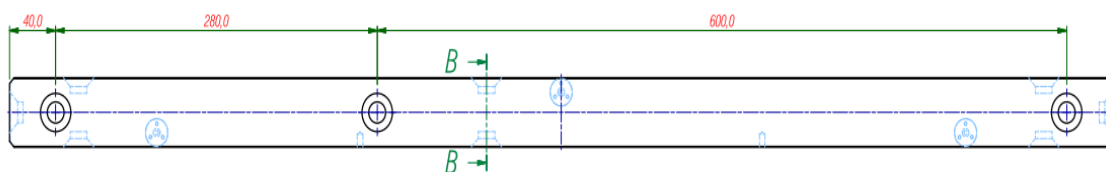


FIGURA 39 : CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS (DIMENSÕES EM MILÍMETRO)

TABELA 3 : DISTÂNCIAS CALBRADAS EM 20°C

Cota		Distância (mm)	U (mm)	K
01		880,846	0,008	2,01
02		280,286	0,004	2,01

Para sumarizar o Experimento 01 em etapas, a Figura 40 apresenta a sequência de procedimentos a serem realizados.

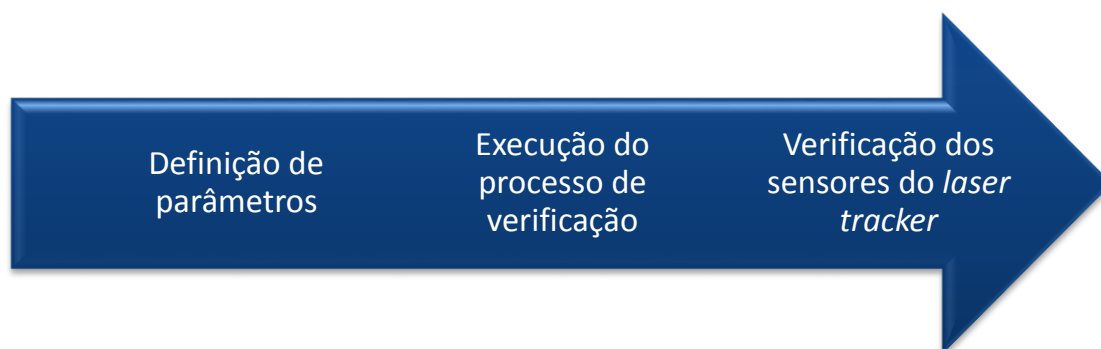


FIGURA 40 : SEQUÊNCIA ETAPAS DE VERIFICAÇÃO LASER TRACKER

Conforme ilustra a Figura 40, o experimento 01 será desenvolvido em três etapas principais, sendo que a primeira é a definição dos seguintes parâmetros: (i) orientação da medida materializada, (ii) distâncias de medição para a medida materializada, (iii) perfil do modo de aquisição dos pontos. Após esta primeira etapa os experimentos para a verificação do *laser tracker* são realizados por

meio das medidas materializadas finalizando com a verificação dos sensores angulares e de distância.

Antes de iniciar o experimento é necessário deixar o *laser tracker*, suporte cinemático, tripé e a medida materializada no ambiente para estabilização da temperatura no ambiente do experimento, cujo valor observado será usado para calcular a nova dimensão da medida materializada, conforme pode ser visto por meio da equação cinco:

$$\Delta L = L_0 * \alpha * \Delta \theta \quad (5)$$

$$\Delta L = 880,846 * 0,0000015 \text{ 1/}^\circ\text{C} * 4,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta L = 0,0054\text{mm}$$

Definiu-se duas posições de orientação para a medida materializada, conforme verifica-se na Figura 41: (a) transversal e (b) longitudinal. Essas posições permitem verificar possíveis influências dos *encoders* angulares e, conseqüentemente, possíveis distorções nos resultados de medição. Posicionamentos em diferentes ângulos de inclinação, não foram realizados devido à limitação do tripé disponível e do e suporte cinemático, que não permitem que a medida materializada fique posicionada em diferentes inclinações.



FIGURA 41 : POSIÇÕES DE ORIENTAÇÃO MEDIDA MATERIALIZADA (TRANSVERSAL E LONGITUDINAL)

Foram definidas quatro distâncias entre o instrumento de medição e a medida materializada: 2,5 m; 7,5 m; 40 m e 80 m, sendo cada uma delas aplicadas para as duas posições da medida materializada (transversal e longitudinal). A Figura 42 ilustra as respectivas distâncias de medição.

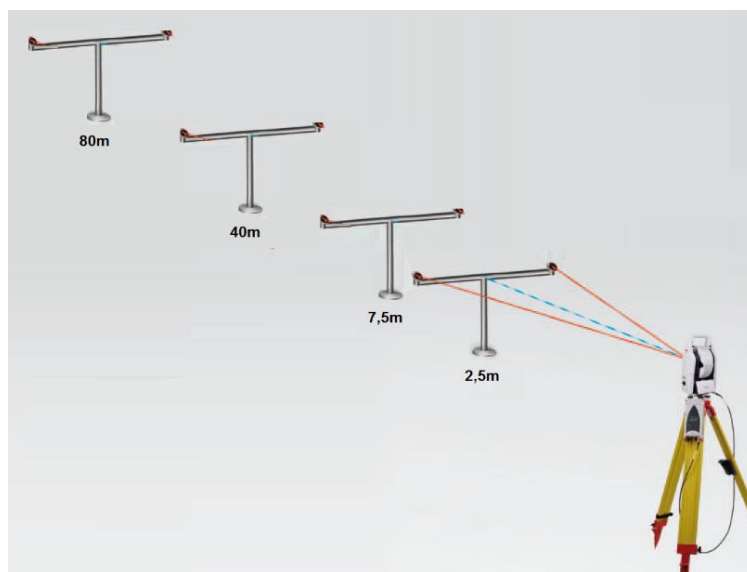


FIGURA 42 : ESQUEMÁTICO COM AS DISTANCIAS DE MEDIÇÃO DA MEDIDA MATERIALIZADA NA TRANSVERSAL

A escolha de longas distâncias é justificada pelas atividades de medição executadas no acelerador de partículas, no qual é possível mencionar a atividade de monitoramento do raio da blindagem do anel de armazenamento, na qual devem ser medidos cinco pontos de controle instalados na parede de concreto da blindagem, sendo executadas a uma distância de aproximadamente 80 m, conforme a Figura 43.



FIGURA 43 : MEDIÇÃO DE MONITORAMENTO DO RAIOS DA BLINDAGEM DO SIRIUS.

Em relação à configuração do tempo de amostragem para medição dos pontos, foram considerados três tempos de amostragem, que utilizam apenas uma face de medição (500ms; 2000ms e 5000ms) além de três outras configurações (TwoFace_500ms; TwoFace_2000ms e Twoface_5000ms), no qual é considerado o perfil de *two-face*. Este perfil utiliza as duas faces de medição do instrumento e considera como medida a média entre as duas leituras realizadas com a inversão de 180° cada *encoder*, para eliminar possíveis desvios de excentricidade.

Operacionalmente, a verificação se inicia com a medida materializada orientada na posição longitudinal a uma distância inicial de 2,5 m em relação ao *laser tracker* e, na sequência são realizadas as medições considerando cada um dos seis perfis de tempo de amostragem. Para avaliar o erro de medição e a repetibilidade das medições, foi criado um sistema de coordenadas na própria medida materializada, para análise distinta de cada eixo de medição. Para cada ponto de medição considerou-se dez repetições. Para cada distância considerada para o experimento, a medida materializada é movimentada para as demais três distâncias de medição. Logo em seguida, a medida materializada é orientada na posição transversal, e toda a sequência de medição deverá ser repetida.

Após a conclusão da primeira etapa das verificações, com a medida materializada, realiza-se a avaliação do desempenho do instrumento, para avaliar a necessidade de compensação dos os erros geométricos do *laser tracker*. Nesta etapa deve-se usar o software *Tracker Pilot* fornecido em conjunto

com o equipamento pelo fabricante, para gerenciar os acessórios de medição do instrumento e realizar procedimentos de avaliação do desempenho e compensações quando necessárias. Segundo o fabricante, deve-se verificar o desempenho dos sensores de medição angular (*Angle check*) e de distância (*ADM check*).

O “*ADM check*” verifica o desempenho do sensor de medição de distância e realiza compensações quando o limite de tolerância especificado pelo fabricante for excedido. Para realizar este procedimento deve-se posicionar dois pontos distantes 4 metros entre eles e alinhados entre si. Os pontos devem ser medidos com o *laser tracker* posicionado dentro e fora dessa linha de referência, conforme pode ser observado na Figura 44. O procedimento de verificação do sensor de medição de distância (ADM) consiste em 3 passos



FIGURA 44 : VERIFICAÇÃO SENSOR DE MEDIÇÃO DE DISTÂNCIA (ADM) POSIÇÃO INTERNA

Conforme verificado na Figura 44, inicialmente o *laser tracker* é posicionado entre dois tripés com suportes fixos para acomodar o refletor esférico (*SMR*). Na sequência os dois pontos de medição apoiados sobre os tripés devem ser alinhados em relação aos eixos de inclinação do instrumento. Uma vez alinhado, estes tripés com os pontos não devem ser movimentados. Na

sequência, com os tripés já alinhados, deve-se medir estes dois pontos fixos (estação 01). Logo em seguida, o instrumento é levado para área externa destes dois pontos (estação 02), onde o *laser tracker* é alinhado com estes mesmos pontos, que são medidos na sequência. Na última etapa (estação 03) o instrumento retorna para a parte interna, sendo realizada novas medições dos dois pontos fixos, com o *laser tracker* alinhado a partir do meio dos dois pontos, semelhante ao realizado na estação 01. As orientações da medição estão apresentadas no quadro 02.

QUADRO 2: ESQUEMÁTICOS DAS ORIENTAÇÕES DAS ESTAÇÕES DE MEDIÇÃO

Estação	Ponto ID	Ângulo Horizontal[deg]	Ângulo Vertical[deg]	Distância[m]
Interno 01	1	~0	90	2.0
	2	~180	90	2.0
Externo	1	~0	90	2.0
	2	~0	90	6.0
Interno 02	1	~0	90	2.0
	2	~180	90	2.0

Se, após a conclusão do procedimento de verificação, o resultado declarado não estiver de acordo, sendo declarado pelo software como “*Not OK*”, deve-se realizar a compensação do sensor de medição de distâncias (*ADM*) do instrumento, repetindo todo o procedimento da Figura 46 até que o valor fique dentro do limite da tolerância especificada.

Na sequência deste procedimento, verifica-se o sensor angular “*Angle check*”. O objetivo é avaliar o desempenho das medições angulares do *laser tracker* e determinar a necessidade de realizar compensações. Primeiramente são realizadas medições de três pontos em ângulos pré-determinados, comumente próximos do nível do piso, posicionado em distâncias pré-estabelecidas. Em seguida, com o auxílio de um tripé para apoiar o refletor esférico, conforme Figura 45, deve-se medir outros três pontos em distâncias pré-estabelecidas, no ângulo de inclinação do eixo do *laser tracker*. Na Figura

46 é possível observar um esquemático com os ângulos e distâncias especificadas.



FIGURA 45 : PROCEDIMENTO DE VERIFICAÇÃO DO SENSOR DE MEDIÇÃO ANGULAR

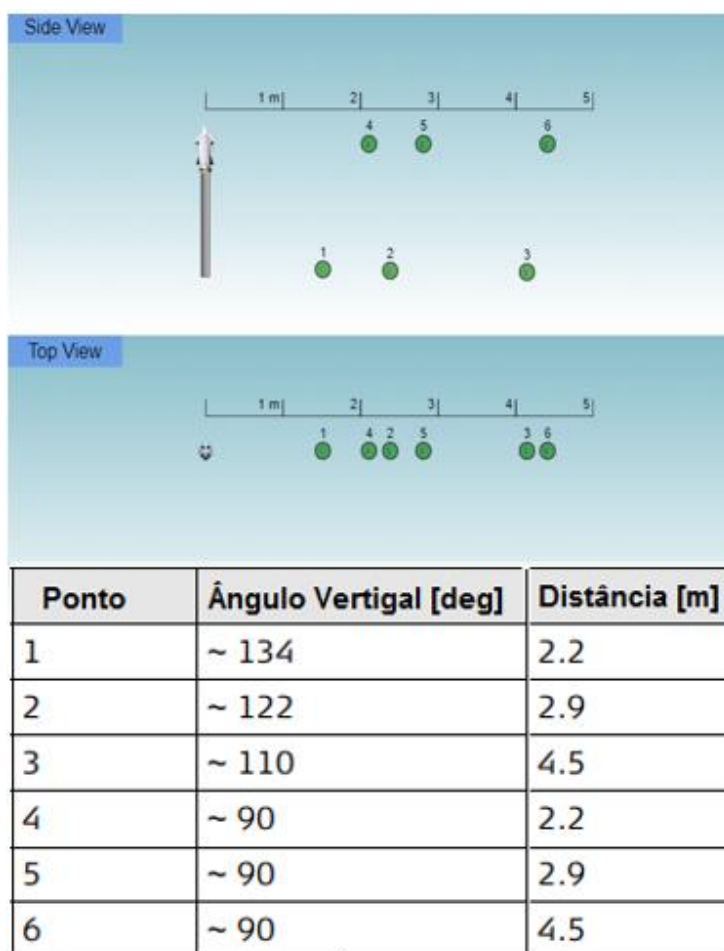


FIGURA 46 : SEQUÊNCIA DE MEDIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE VERIFICAÇÃO ANGULAR

Da mesma forma que no procedimento anterior, caso o resultado declarado pelo software for “*Not OK*”, deve-se realizar a compensação do sensor angular do instrumento, para o qual todo o procedimento é repetido até que o valor fique dentro do limite da tolerância especificada

3. 2.2 EXPERIMENTO 02

O objetivo deste experimento é avaliar a realocação de um instrumento, por meio de medidas materializadas. Os parâmetros considerados nesta análise são: localizações e desvios padrão. Para isso, o método de realocação é comparado a uma técnica mais comumente empregada, que utiliza uma rede de pontos de referência. O fluxograma da Figura 47, apresenta os procedimentos a serem realizados neste experimento.

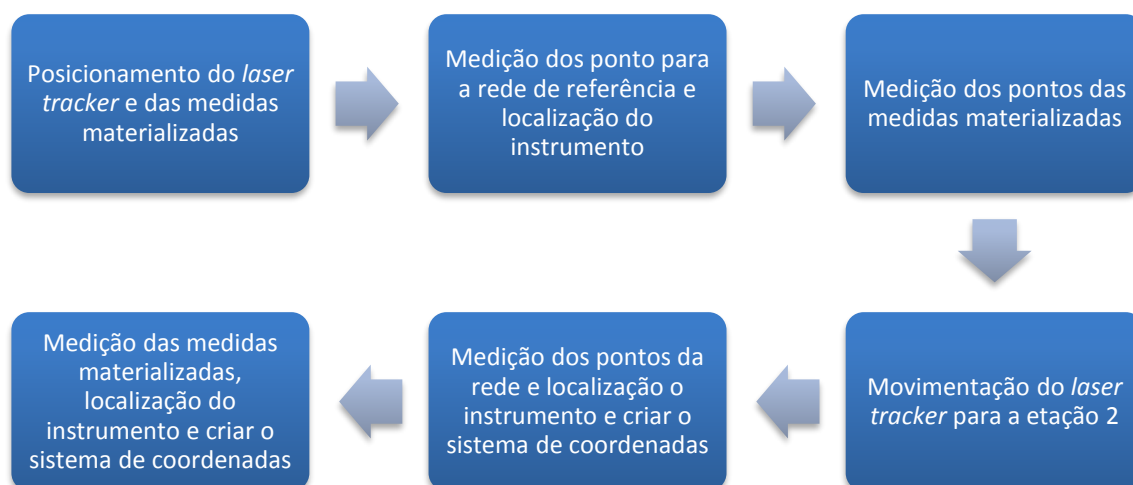


FIGURA 47 : SEQUÊNCIA DAS ETAPAS DO EXPERIMENTO 02

Para realizar o experimento, definiu-se três “*setups*” de medição, sendo que cada um deles possui um arranjo diferente do posicionamento de cada uma

das medidas materializadas no ambiente de medição. Esta definição é importante para estimar o melhor arranjo, para uma condição de ambiente confinado. O experimento deverá ser realizado em um local em que é possível fazer uso de uma rede de pontos de referência permitindo assim realizar as comparações necessárias. A Figura 48, apresenta os três diferentes posicionamentos das medidas materializadas.

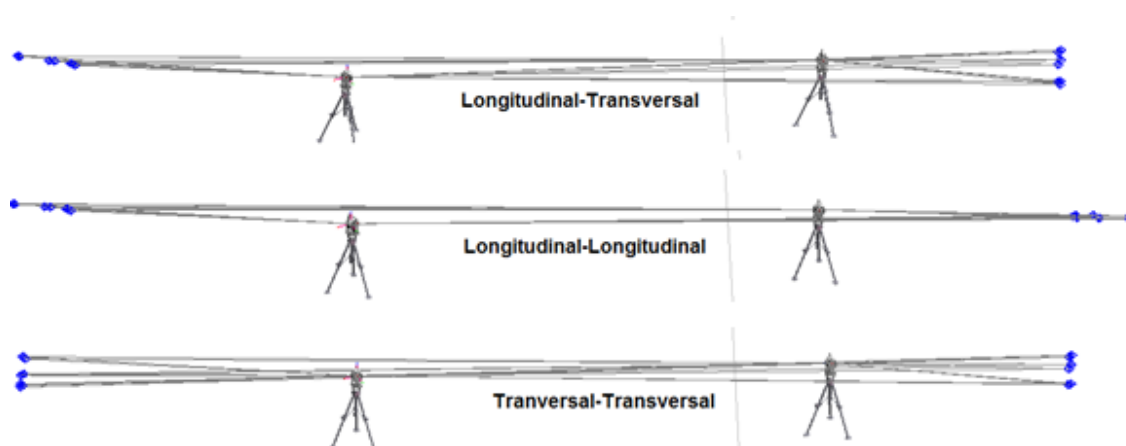


FIGURA 48 : DIFERENTES ORIENTAÇÕES DAS MEDIDAS MATERIALIZADAS PARA PROCESSO DE REALOCAÇÃO

Conforme ilustra a Figura 49, a estação 01 com as duas medidas materializadas é posicionada, sendo inicialmente orientadas na longitudinal e a outro na transversal, de maneira que possam ser vistas pelas duas estações de medição. Na sequência, a estação 01 realiza a medição de alguns pontos da rede de pontos de referência do *hall* experimental e conseqüentemente feita a localização do instrumento a partir destes mesmos pontos. Para todas as localizações a serem realizadas, deve-se deixar todos os graus de liberdade do instrumento livres, exceto para as rotações Rx e Ry (Nível), em decorrência do *laser tracker* ter recursos que permitem ele ser muito bem nivelado em relação à gravidade. Após a localização do instrumento são realizadas as medições das duas medidas materializadas, conforme mostra a Figura 49. Após estas etapas, o instrumento é movimentado para a segunda estação



FIGURA 49 : ESTAÇÃO 01 MEDIDA MATERIALIZADA LONGITUDINAL-TRANSVERSAL

Após a movimentação do *laser tracker* para estação 02, e sem movimentar as duas medidas materializadas, o instrumento mede os os pontos da rede, destacando-se que devem ser medidos exatamente os mesmos pontos já medidos na estação anterior, para que assim seja possível fazer a localização do instrumento. Uma vez localizado o instrumento na rede de pontos, deve-se construir um sistema de coordenadas de referência na base do instrumento, para saber sua real posição. Ainda na estação 02, realiza-se a medição dos pontos das duas medidas materializadas para a localização do instrumento. Com o instrumento localizado pelas medidas materializadas, deve-se construir um novo sistema de coordenadas na base do instrumento. Para avaliar os desvios de localização e os desvios padrão, realiza-se uma comparação dos dois sistemas de coordenadas criados a partir de cada localização. Com isso é possível avaliar os desvios nos seis graus de liberdade, sendo três translações e três rotações (T_x , T_y e T_z ; R_x , R_y e R_z) e, conseqüentemente a magnitude desses desvios ($dMag$).

Na Figura 50 é possível observar um esquemático com o layout de medição. Este procedimento será repetido cinco vezes para cada uma das configurações previamente definidas.

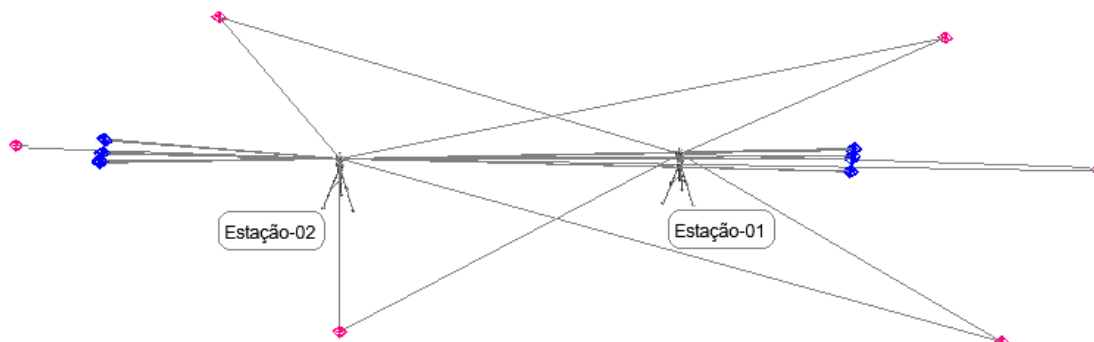


FIGURA 50 ESQUEMÁTICO DO LAYOUT DE REALOCAÇÃO LASER TRACKER

Os procedimentos descritos na Figura 47 para realocação do instrumento são válidos para os três setups de posicionamento das medidas materializadas, longitudinal-transversal, longitudinal-longitudinal e transversal-transversal.

3. 2.3 EXPERIMENTO 03

O objetivo deste experimento 03 é avaliar o uso de medidas materializadas para conectar as duas principais redes de pontos de referência: (i) rede de pontos do anel de armazenamento (ii) rede de pontos do hall experimental. Para isso, devem ser considerados furos na parede da blindagem para realocação do instrumento, por meio das medidas materializadas. Este novo método de realocação será comparado com outra técnica já empregada, que consiste na orientação mútua entre dois *laser trackers*. Como métrica da qualidade da metodologia proposta, serão analisados os desvios nos pontos de conexão entre as redes, além da comparação do desvio global da rede de referência criada a partir das duas técnicas. O fluxograma da Figura 51, apresenta os procedimentos a serem realizados no experimento 03.

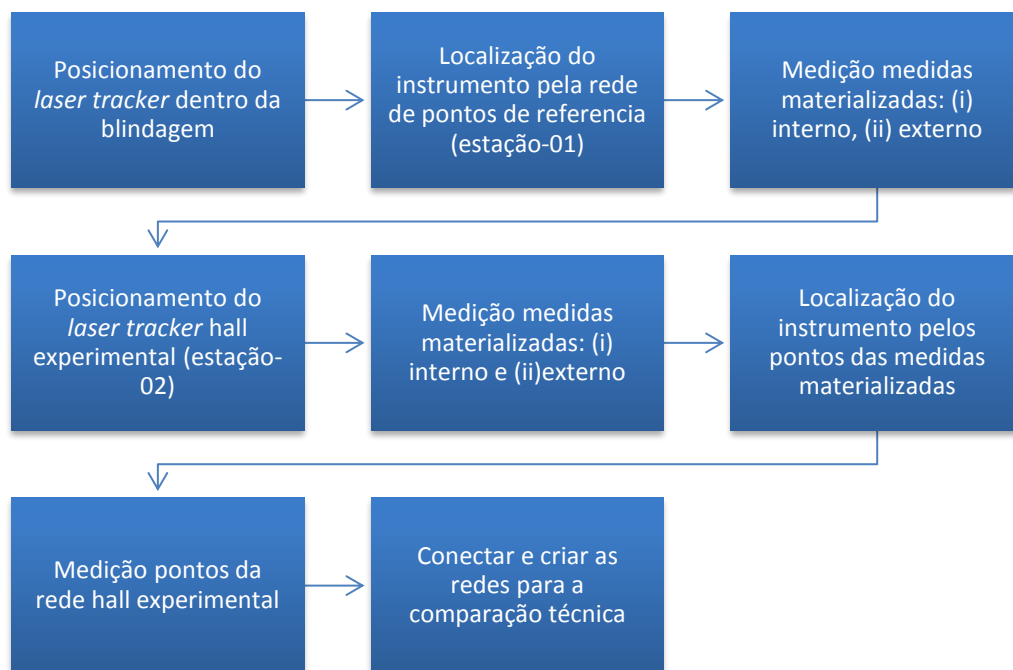


FIGURA 51 : SEQUENCIAS DA ETAPA DO EXPERIMENTO 03

Conforme mostra a Figura 51, as três primeiras etapas são realizadas com o *laser tracker* posicionado dentro do anel de armazenamento. Para isso, primeiramente deve-se posicionar as duas medidas materializadas (a) longitudinal e (b) transversal, para permitir que eles sejam medidos pelas duas estações do *laser tracker*. Para esta primeira etapa é necessário que o *laser tracker* esteja posicionado em frente ao furo da blindagem, de tal maneira, que consiga medir pontos da rede de referência do anel de armazenamento, além de realizar a medição das duas medidas materializadas, conforme ilustra a Figura 52.

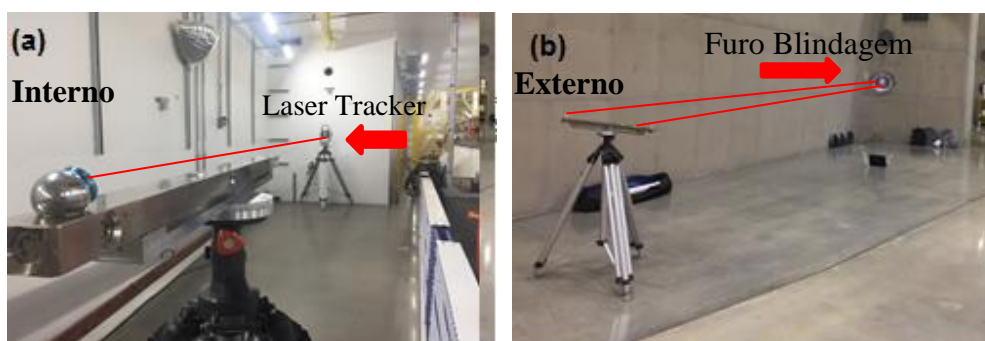


FIGURA 52 : POSICIONAMENTO DO *LASER TRACKER* NO ANEL DE ARMAZENAMENTO, E MEDIDAS MATERIALIZADAS POSICIONADAS NO INTERIOR E EXTERIOR DA BLINDAGEM

Em seguida, o instrumento é reposicionado no *hall* experimental, em frente ao furo da blindagem, para que se tenha visibilidade e assim permita capturar os mesmos pontos e de ambas as medidas materializadas, medidos na etapa inicial, conforme pode ser visto na Figura 53. Este procedimento permite que o *laser tracker* seja realocado no hall experimental, utilizando as referências da rede de dentro do anel de armazenamento.

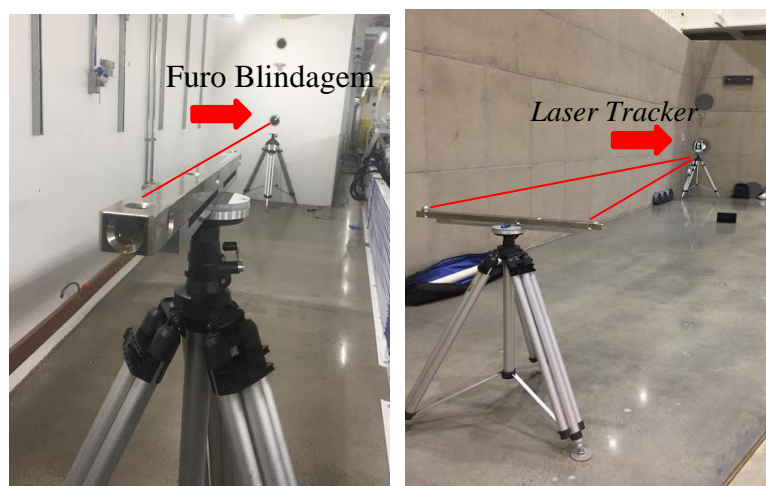


FIGURA 53 : POSICIONAMENTO LASER TRACKER HALL EXPERIMENTAL, E MEDIDAS MATERIALIZADAS POSICIONADAS NO INTERIOR E EXTERIOR DA BLINDAGEM

Na sequência, já com o *laser tracker* localizado no *hall* experimental deve-se realizar medições de um ponto em específico no piso do *hall* experimental. Este ponto serve para avaliar os desvios em relação à técnica já aplicada. Conforme pode ser visto na Figura 54, este procedimento deve ser repetido em quatro posições (furos na parede da blindagem) pré-estabelecidas em toda circunferência do anel de armazenamento, para possibilitar conectar a rede interna e a rede externa do *hall* experimental.

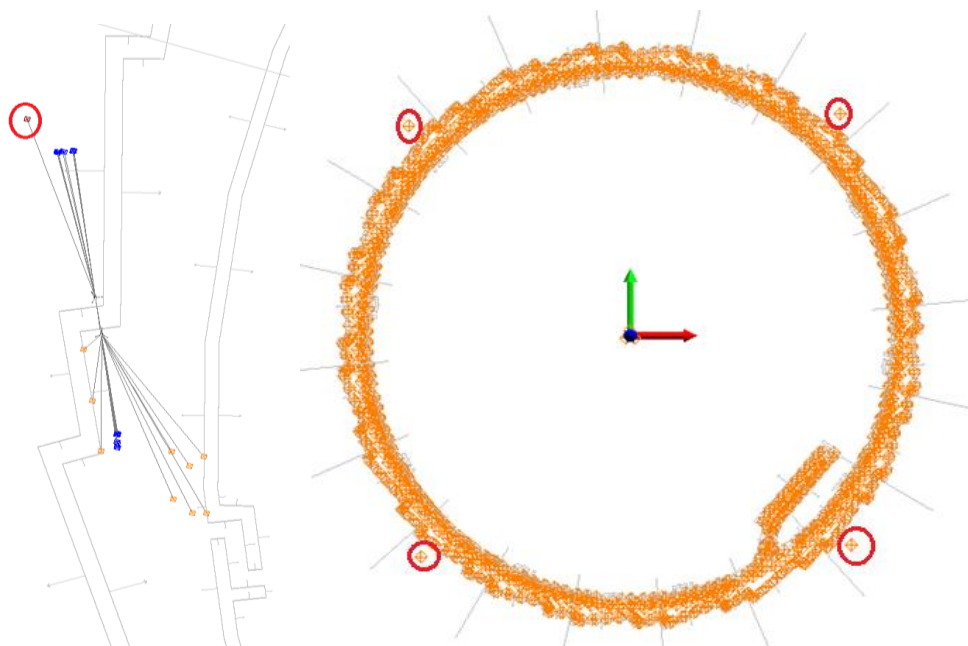


FIGURA 54 : QUATRO PONTOS DE CONEXÃO PARA REDES DE REFERÊNCIA DO SIRIUS

Para conexão entre as duas principais redes de referência deve ser usado o algoritmo desenvolvido por Calkins (2002) denominado USMN (*Unified Spatial Metrology Network*) do software *SpatialAnalyzer*, que calcula a propagação e ajustamento de redes de pontos. Primeiramente o algoritmo deve ser aplicado para cada uma das quatro estações pré-estabelecidas, sendo que em cada uma delas, deve-se deixar todos os graus de liberdade livres, exceto para R_x e R_Y (Nível), deste modo é criado a melhor estimativa espacial (coordenadas X, Y e Z) para todos os pontos medidos por estas estações, inclusive os quatro pontos para conexão.

Na sequência uma nova rede do Anel de armazenamento é calculada, por meio de um arquivo com todas as estações de mapeamento do anel de armazenamento, sendo agora inserido as quatro estações de conexão, com seus respectivos pontos de medição no *hall* experimental.

Com isso, uma nova rede do *hall* experimental é calculada, considerando, as estações de mapeamento do *hall* experimental e os quatro pontos de conexão calculados anteriormente, tendo assim pontos em comum entre as duas redes de referência.

Com isso, a rede do hall é conectada à rede interna do anel de armazenamento, mantendo o mesmo sistema de coordenadas de referência, conforme mostra a Figura 55.

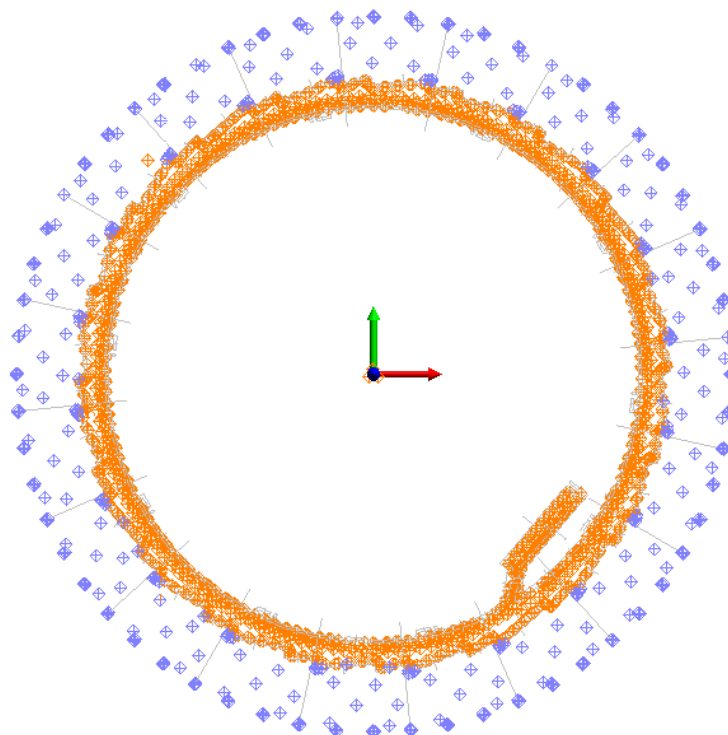


FIGURA 55 : COMBINAÇÃO REDES DE REFERÊNCIA SIRIUS

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico, são apresentados os resultados da pesquisa e discussões acerca dos mesmos. Os resultados podem ser descritos em 3 etapas distintas.

4. 1 RESULTADOS DO EXPERIMENTO 01

O resultado deste primeiro experimento realizado para verificação do *laser tracker*, por meio de medidas materializadas está apresentado graficamente pelas estimativas dos erros de medição. Estes erros foram estimados pela diferença entre a média dos pontos medidos e a distância nominal. Também estão apresentados os gráficos com a repetibilidade observada nas medições para cada eixo de medição (horizontal, longitudinal e vertical). A Figura 56, apresenta os erros com a medida materializada na posição longitudinal.

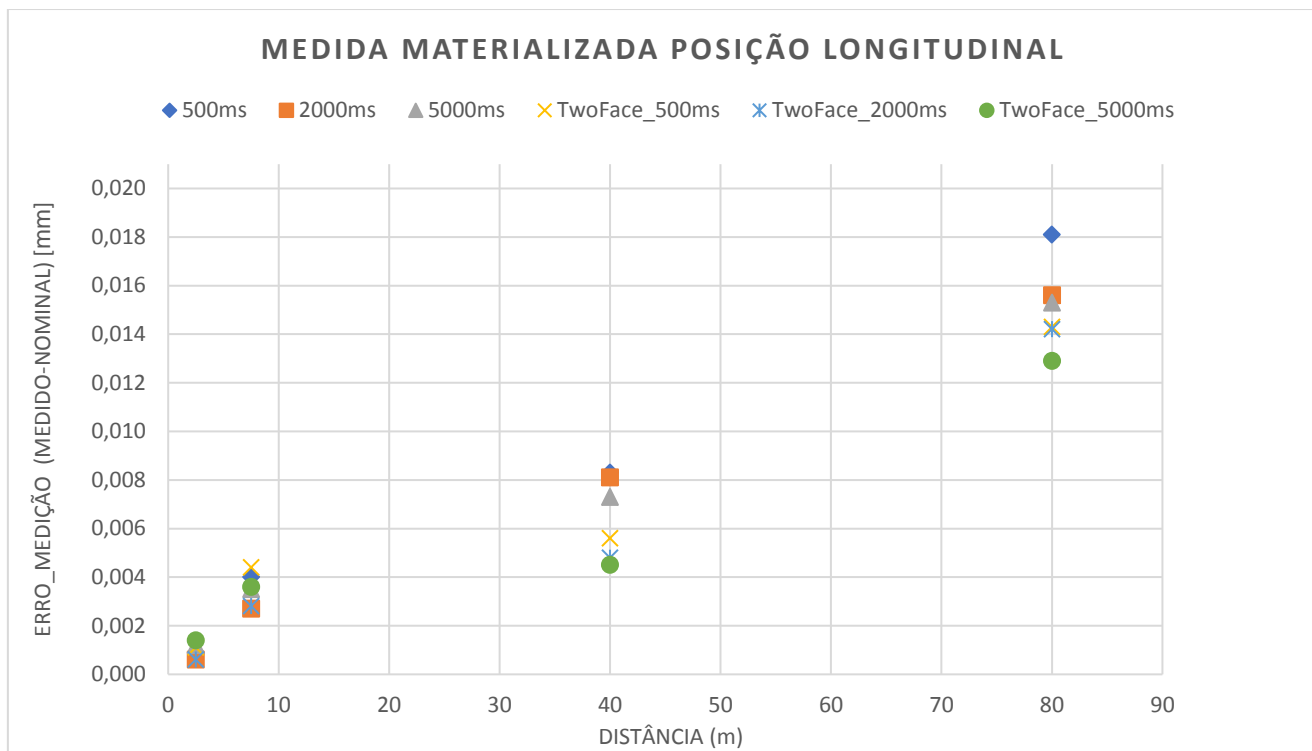


FIGURA 56 : ESTIMATIVA DOS ERROS DE MEDIÇÃO POSIÇÃO LONGITUDINAL

Observa-se na Figura 56 que o erro de medição aumenta proporcionalmente à distância da medição, como era esperado para o *laser tracker*. Também se observa uma tendência indicando que o erro de medição diminui à medida que o tempo de amostragem aumenta. Nota-se que ao analisar as longas distancias (40m e 80m), as medições que utilizaram o perfil *twoface*, que utilizaram as duas faces de medição do instrumento, apresentaram um erro ligeiramente menor. Isso pode ser decorrente do método de medição, que utiliza a média entre as duas leituras e com isso permite eliminar possíveis desvios de excentricidade.

A estimativa da repetibilidade foi realizada de maneira distinta para cada um dos eixos de medição sendo considerando as dez medições, com o desvio padrão sendo multiplicando pelo coeficiente de *t-student*. O gráfico pode ser visto na Figura 57.

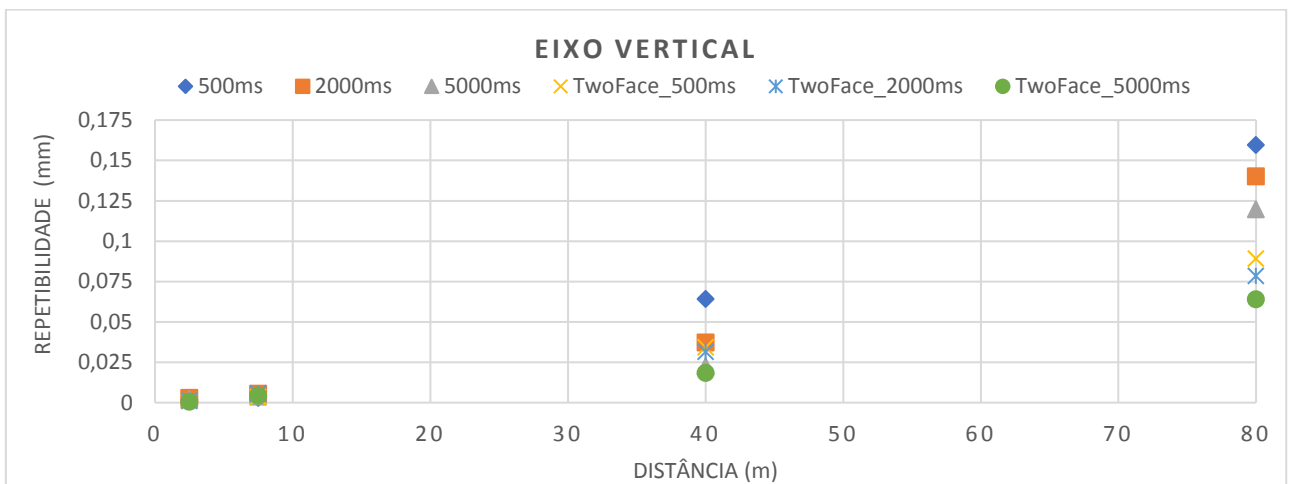
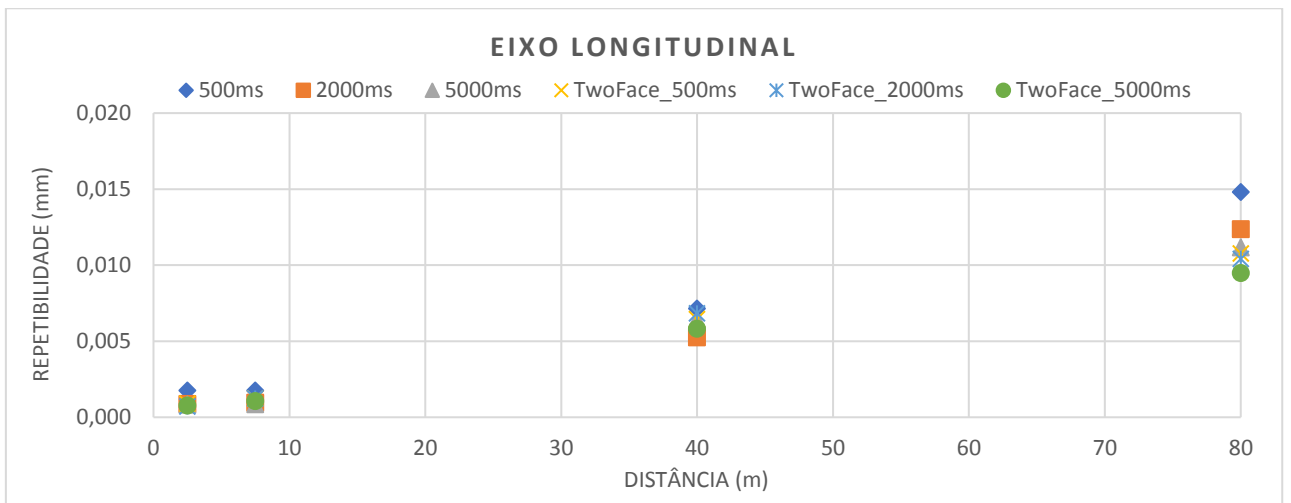
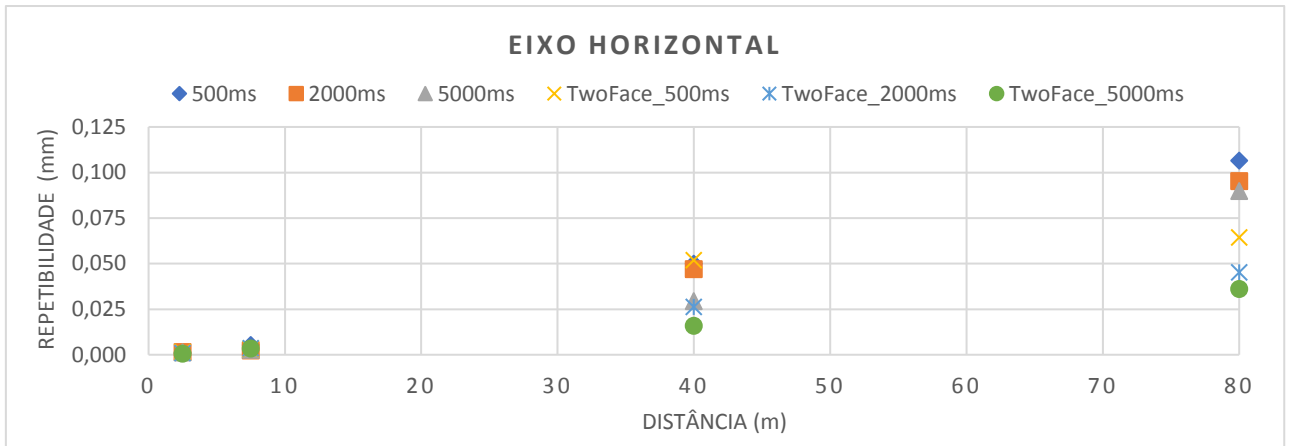


FIGURA 57 : ESTIMATIVA DA REPETIBILIDADE EIXOS (HORIZONTAL, LONGITUDINAL E VERTICAL) MEDIDA MATERIALIZADA POSIÇÃO LONGITUDINAL

Ao analisar a estimativa da repetibilidade de maneira distinta para cada eixo de medição, é possível identificar maior variabilidade nos resultados dos eixos de medição horizontal e vertical, sendo a maior variabilidade nas medições realizadas em longas distâncias (80 metros). Para distâncias mais curtas, é possível observar uma variabilidade menor, sendo de poucos milésimos de milímetros. Porém, o eixo longitudinal, apresenta desvios na faixa de algumas dezenas de milésimos de milímetro, mesmo nas distâncias mais longas. Uma hipótese para este fato é que os maiores desvios nos eixos horizontal e vertical são em decorrência do uso dos *encoders* angulares horizontal e vertical. Em relação ao menor desvio observado no eixo longitudinal, pode-se dizer que é pelo uso puramente do ADM (*Absolute Distance Meter*) consequentemente tendo uma menor variabilidade e sendo o mais recomendado para longas distâncias.

Em todos os casos o *laser tracker* apresentou resultados dentro do limite de especificação, de acordo com o MPE e declarado pelo fabricante. Outro item a ser observado é em relação às medições à longas distâncias (80 metros), que apresentou uma variabilidade maior nas medições que utilizam o perfil de amostragem com uma única face (500ms; 2000ms e 5000ms), em relação aos demais perfis de medição que utilizam o perfil “*two face*”, que apresentam variabilidade menor. Deste resultado, recomenda-se não utilizar o perfil de medição que utiliza somente uma face de medição em medições a longas distâncias.

As Equações 6, 7, 8 e 9 mostram os limites especificados do MPE e informado pelo fabricante, em função das distâncias utilizadas no experimento.

$$MPE (2,5m) = \pm 15\mu m + 6\mu m / 2,5m = 0,030mm \quad (6)$$

$$MPE (7,5m) = \pm 15\mu m + 6\mu m / 7,5m = 0,060mm \quad (7)$$

$$MPE (40m) = \pm 15\mu m + 6\mu m / 40m = 0,255mm \quad (8)$$

$$MPE (80m) = \pm 15\mu m + 6\mu m / 80m = 0,495mm \quad (9)$$

Outro resultado deste experimento são os gráficos dos erros de medição e repetibilidade com a medida materializada orientada na posição transversal, conforme pode ser visto pela Figura 58.

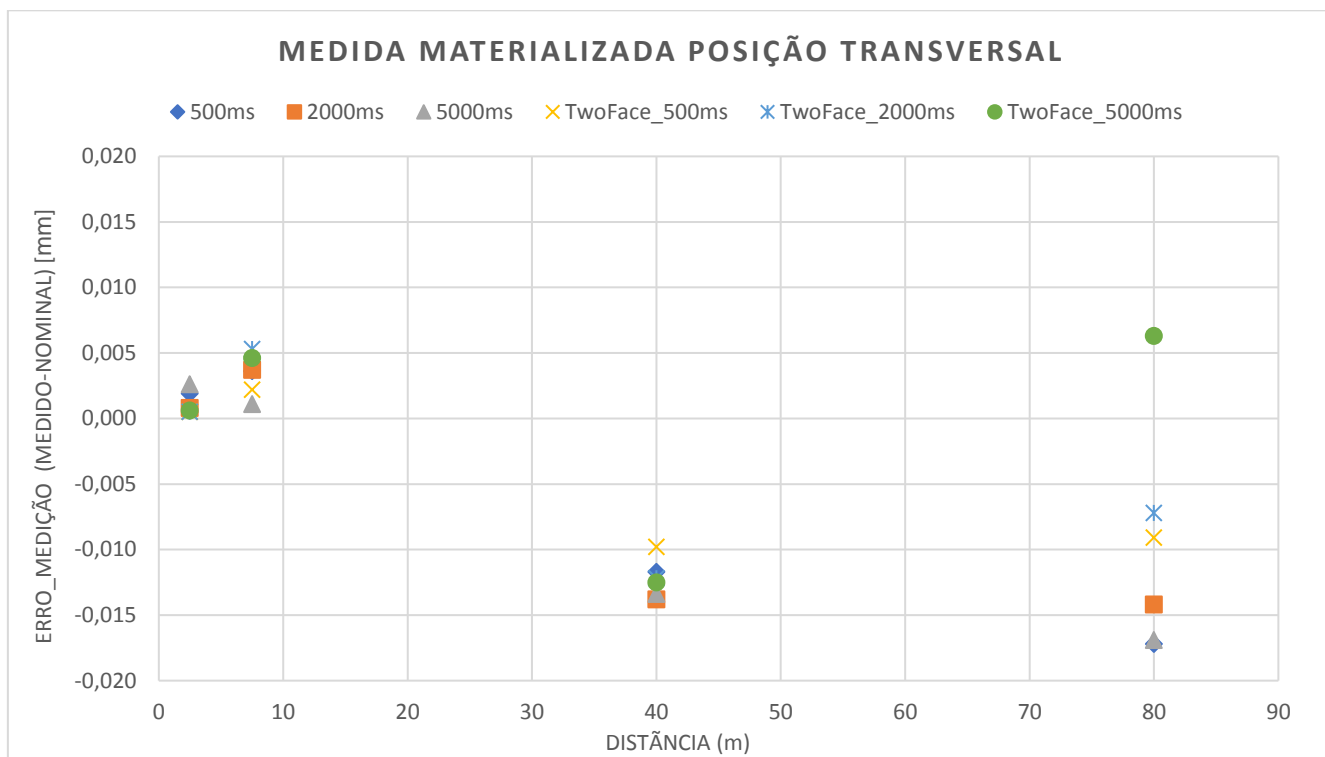


FIGURA 58 : ESTIMATIVA ERROS DE MEDIÇÃO ARTEFATO TRANSVERSAL

Na Figura 58, é possível observar que o erro de medição nas duas primeiras distâncias de medição tem resultado de aproximadamente 0,005 mm, porém conforme a distância de medição aumenta, o erro de medição apresenta uma tendência decrescente, com valor próximo de -0,015 mm. Nota-se também que ao final dos 80 m apenas o perfil de duas faces, com 5000 ms, apresenta desvio positivo. Tal comportamento, pode ser explicado pela orientação na posição transversal da medida materializada, indicando que o uso dos encoders resultam um desvio sem tendência, de qualquer forma, todos os resultados estão dentro do MPE especificado pelo fabricante.

As estimativas para a repetibilidade para a medida materializada na transversal são apresentados Figura 59.

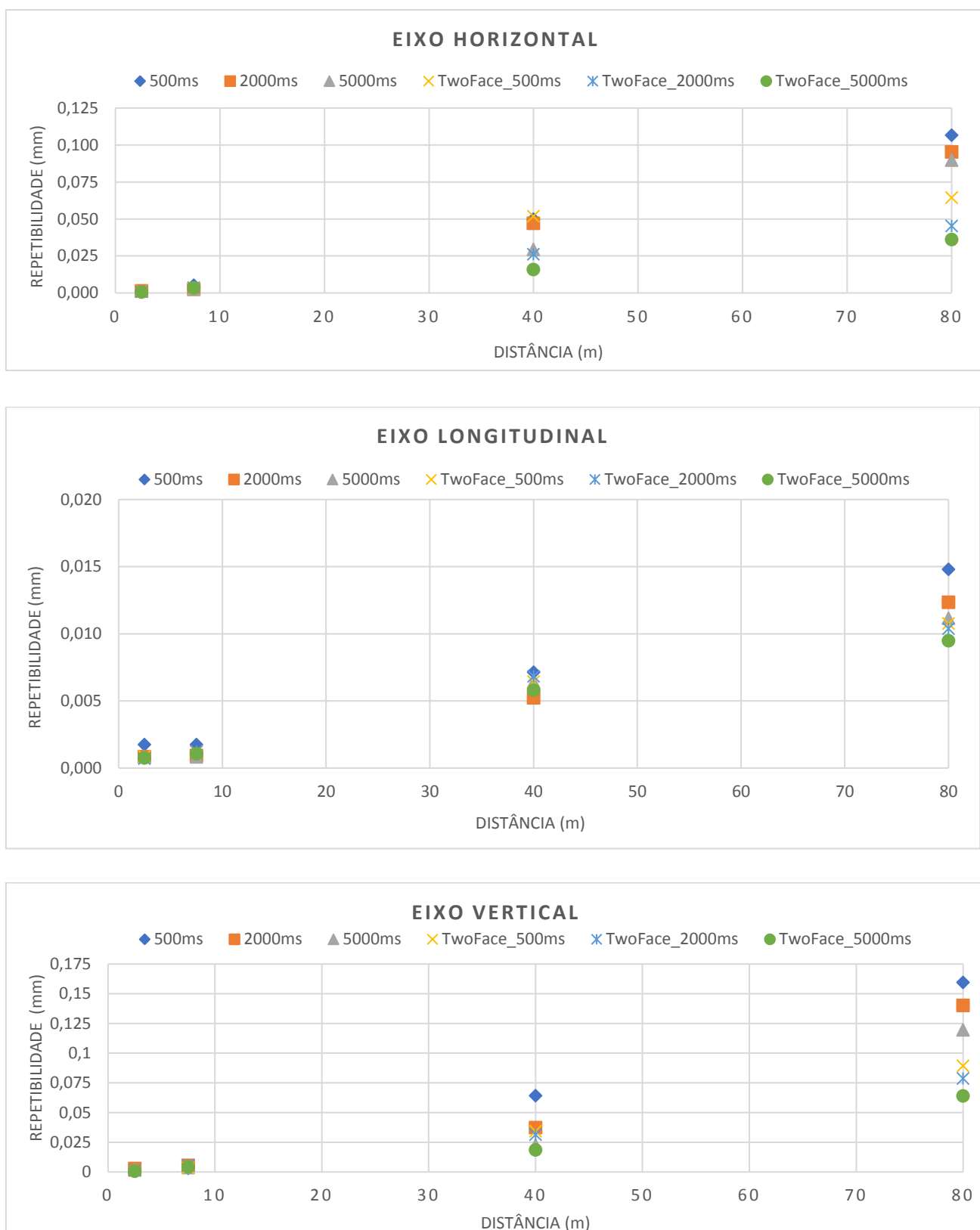


FIGURA 59 : ESTIMATIVA DA REPETIBILIDADE EIXOS (HORIZONTAL, LONGITUDINAL E VERTICAL) MEDIDA MATERIALIZADA POSIÇÃO TRANSVERSAL

Os gráficos da repetibilidade para cada um dos eixos, medidos com a medida materializada posicionada na transversal, mostram maior variação nos eixos horizontal e vertical. Este fato, fato pode ser em decorrência do erro angular dos *encoders*. O menor desvio no eixo longitudinal - medição distância, é devido a utilização somente do ADM. Observa-se também que nas medições de longas distâncias (80 metros) a variabilidade dos resultados é maior nas medições que utilizam o perfil de amostragem com uma única face (500ms; 2000ms e 5000ms), em relação aos demais perfis de medição que utilizam o perfil “*two face*”. Deste modo indica-se utilizar somente perfis que utilizam as duas faces de medição “Two face”, quando forem realizadas medições em longas distâncias ou próximas de 80 metros.

Ainda sobre os resultados da avaliação do desempenho do *laser tracker*, para a qual foram realizadas verificações dos sensores de medição angular “*Angle Check*” e do sensor de medição de distâncias “*ADM*”, os resultados mostram a porcentagem da tolerância utilizada e as suas respectivas incertezas. Considerando que é necessário realizar a compensação quando o nível de tolerância utilizada atingir níveis igual ou superior a 100%. Os resultados observados neste experimento indicou um desvio de -0,003 mm em relação ao valor ativo e declarado o uso de 80% da tolerância, conforme mostra o Apêndice A. Deste modo não é necessário realizar a compensação.

Os resultados da verificação do sensor angular “*Angle check*” indicou que o nível da tolerância utilizada foi de 68% sendo assim, também não é necessário realizar a compensação do sensor angular do instrumento, pois está dentro dos limites especificados pelo fabricante, conforme mostra o Apêndice B.

4. 2 RESULTADOS DO EXPERIMENTO 02

Os resultados do Experimento 02 permitem avaliar a realocação do *laser tracker*, por meio do uso de medidas materializadas. Busca-se nestes resultados compreender quais são os erros de localização e os desvios padrão da técnica de realocação. Esta análise considera as estimativas da magnitude do desvio de

translação (dMag) e da rotação (Rz), além dos desvios padrão para cada um dos três setups de medição, considerados no experimento. Os erros e desvios para cada setup de orientação das medidas materializadas podem ser visto na Tabela 4.

TABELA 4: DESVIOS DOS DIFERENTES SETUPS DE ORIENTAÇÃO DAS MEDIDAS MATERIALIZADAS

	LONGITUDINAL- LONGITUDINAL	TRANSVERSAL- TRANSVERSAL	LONGITUDINAL- TRANSVERSAL
ERRO			
LOCALIZAÇÃO (mm)	0,055	0,035	0,030
DESVIO PADRÃO (mm)	0,026	0,014	0,015
ROTAÇÃO-RZ (mrad)	0,003	0,001	0,001

Conforme pode ser visto na Tabela 4, o setup com as duas medidas materializadas orientadas na longitudinal, mostram desvios importantes em relação aos outros dois setups de orientação, tanto para desvios de rotação (Rz), como para as translações (dMag) e para o desvio padrão. Esse resultado já era o esperado pelo fato de os pontos das duas medidas materializadas não estarem bem distribuídos no volume de medição devido ao fato da disponibilidade somente em linha com pontos em ambos os lados do *laser tracker*.

Com relação aos outros dois setups avaliados, os resultados são bem próximos entre eles, mostrando diferenças de poucos milésimos de milímetro. Porém, é possível observar magnitude levemente melhor no erro de localização do instrumento na orientação Longitudinal-transversal 0,030 mm comparado ao erro de localização da orientação transversal-transversal 0,035 mm. Está diferença pode ser atribuída ao fato de as duas medidas materializadas não estarem posicionados exatamente na mesma orientação, o que aumenta a

robustez no processo de realocação. O desvio na rotação Rz é igual para ambos os setups, tendo o desvio de 0,001 mrad. Para os desvio padrão de ambos os setups, os valores são muito próximos e adequados para os processos de realocação em um ambiente de grandes volumes, mostrando que os dois setups poderiam ser aplicados em um processo de realocação em ambiente confinado, no qual não é possível utilizar uma rede de pontos de referência.

4. 3 RESULTADOS DO EXPERIMENTO 03

No experimento 03 foi realizada a conexão entre as duas redes de referência: (i) rede do anel de armazenamento e (ii) rede do hall experimental, por meio de furos de visada da parede de proteção radiológica, utilizando a técnica de realocação que utiliza medidas materializadas. Esta técnica foi comparada à técnica de orientação recíproca entre dois *laser tracker*, no qual são medidos pontos de uma calota esférica, sendo essa técnica já empregada para conexão entre as duas redes de referência.

As técnicas foram comparadas, verificando os desvios encontrados nos quatro pontos de conexão. Os resultados dos desvios, podem ser vistos na Figura 60.

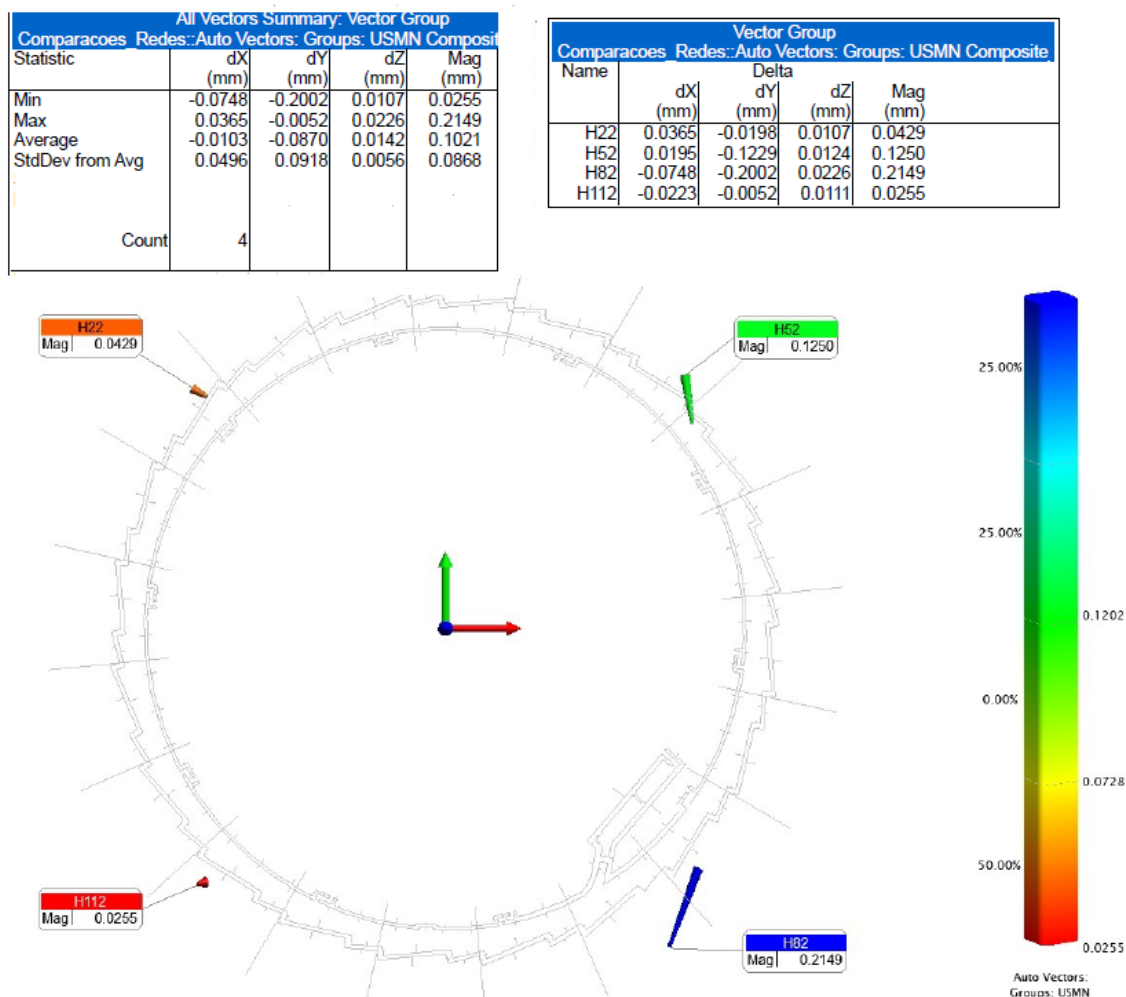


FIGURA 60 : DESVIOS PONTOS DE CONEXÃO, TÉCNICAS UTILIZADAS PARA CONEXÃO DE REDES

Os desvios observados nos pontos de conexão entre as duas técnicas apresentam uma magnitude média de aproximadamente 0,102 mm, sendo o desvio menor na translação no eixo Z (eixo vertical). Este fato pode ser atribuído ao fato de que ambas as técnicas utilizam o *laser tracker*, instrumento no qual permite ser muito bem nivelado em relação a gravidade.

Observa-se também que existe desvio maior no ponto de conexão “H82”. Uma hipótese apontada para este desvio é um potencial movimentação aleatória no tripé de acomodação do suporte da medida materializada. Este fato não pode ser verificado, pois a fonte de Luz Sirius se encontra atualmente em fase de comissionamento, não sendo possível realizar novos testes.

Em relação à rede de pontos de referência do hall experimental, foi realizada uma comparação da rede de pontos gerada a partir da técnica de realocação utilizando as medidas materializadas com a rede de pontos gerada pela técnica de realocação utilizando a conexão mútua entre dois *lasers tracker* (técnica de referência). Os desvios são observados na Figura 61.

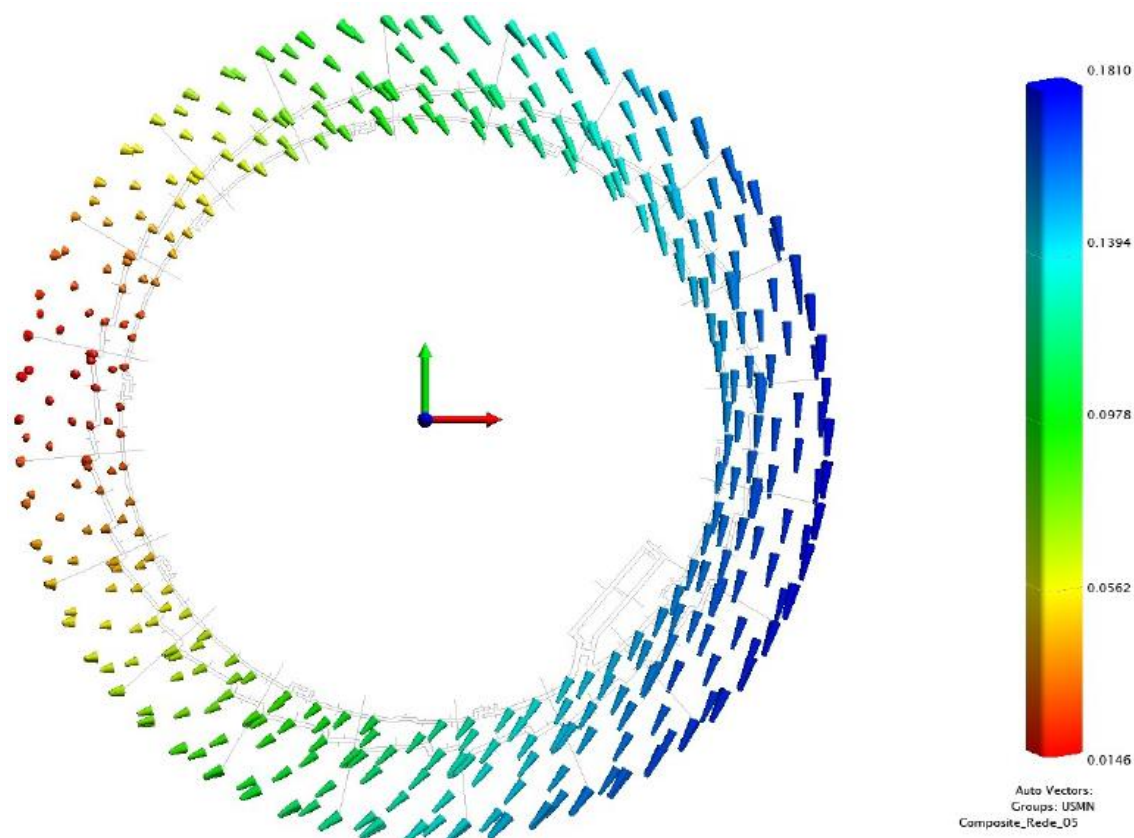


FIGURA 61 : COMPARATIVO ENTRE REDES DE REFERÊNCIA HALL EXPERIMENTAL

Os maiores desvios podem ser observados na região do ponto de conexão “H82”, apresentando uma leve rotação, consequência do maior desvio observado neste ponto de conexão.

Os desvios entre as duas redes de referência, podem ser visto na Tabela 5. As redes aqui comparadas indicam uma magnitude média de aproximadamente 0,1 mm nos 509 pontos do piso do hall experimental. De forma geral, os resultados dos desvios observados entre as redes indicam correlação entre as técnicas aplicadas, sendo que esses desvios observados estão dentro

da incerteza média da rede de referência do hall experimental, estimada em 0,2 mm (2σ).

TABELA 5: COMPARAÇÃO REDES DE PONTOS HALL EXPERIMENTAL

	Desvio-X	Desvio-Y	Desvio-Z	Desvio-Magnitude
Mínimo (mm)	-0,101	-0,179	0,013	0,014
Máximo (mm)	0,078	0,005	0,015	0,181
Média (mm)	-0,012	-0,086	0,014	0,109

5. CONCLUSÃO

O objetivo geral deste estudo foi avaliar diferentes aplicações do uso de medidas materializadas em medições que utilizam o *laser tracker* como sistema de medição por coordenadas de referência, tendo em vista as problemáticas enfrentadas no ambiente de medição de um acelerador de partículas de luz síncrotron. Os resultados observados mostram que apesar de já existirem normas específicas para estas verificações, a proposta deste estudo de usar uma medida materializada contribui de forma importante para a avaliar a confiabilidade metrológica de um *laser tracker*.

Por meio do procedimento dedicado a tarefas realizadas em grandes volumes, como a realização de medição com distâncias mais longas e a avaliação dos perfis de tempo para aquisição de pontos, verificou-se que é possível observar qual o melhor tempo de amostragem para cada atividade de medição e qual o perfil de medição mais apropriado. Além disso, os resultados aqui observados mostraram que podem ser usadas medidas materializadas para a execução de verificações periódicas, que são exigidas pelo fabricante do *laser tracker*.

Este estudo também buscou avaliar o desempenho do uso de medidas materializadas no processo de realocação de um *laser tracker*, em ambientes confinados. Este novo método permite que uma localização seja feita dentro de um ambiente de medição restrito, como em uma blindagem de proteção radiológica onde o espaço é limitado por um pequeno e estreito furo na parede de concreto. Portanto é adequado para uso em espaços confinados onde os métodos convencionais de localização não são aplicados. A avaliação da técnica foi estabelecida por experimentos, buscando compreender quais são os erros de localização e os desvios padrão da técnica de realocação. A partir dos resultados, pode-se afirmar que a realocação através de medidas materializadas foi plenamente satisfatória, tendo boa correlação com a técnica de referência (utilizando a rede de pontos de referência do Sirius). Também foi possível observar que o melhor *layout* de orientação das medidas materializadas, foi a orientação longitudinal-transversal. Sendo assim, os resultados obtidos,

encorajam a aplicação do uso das medidas materializadas para atividades nas chamadas linhas de luz, local onde o acesso a rede de ponto de referência é restrito, em consequência do ambiente confinado.

Por fim, este estudo também buscou avaliar o uso das medidas materializadas para conexão entre duas redes de pontos de referência de alinhamento de aceleradores de partículas. A fonte de luz Sirius, possui duas principais redes de pontos de referência, sendo utilizadas em atividades de medição e alinhamento. Uma rede de referência está contida dentro da blindagem e a outra ao lado externo da blindagem e ambas precisam ser conectadas. Por meio de procedimentos dedicados à conexão entre as redes de referência, verificou-se que a técnica utilizada obteve resultados satisfatórios, obtendo um desvio médio de 0,1mm comparado à técnica de referência. Observou-se também uma leve rotação nos pontos da nova rede do *hall* experimental quando comparadas com a rede de referência, sendo provavelmente originada em consequência de uma instabilidade na conexão do eixo "H82", porém os desvios apresentados se encontram dentro da incerteza média da rede de referência do hall experimental.

A técnica de conexão utilizando medidas materializadas, também se mostrou satisfatória pelo fato de utilizar apenas um *laser tracker*, sendo que o número de equipamentos é limitado em consequência do seu alto custo de aquisição, demonstrando assim uma limitação da técnica de referência (conexão mútua entre dois *laser tracker*), além de apresentar um tempo de execução do procedimento menor em relação a técnica de referência. Sendo necessário levar em consideração, o pouco tempo disponível para atividades de ajustes ou manutenção do acelerador de partículas. Deste modo, os desvios estimados sugerem que o método, é prático e tem boa qualidade dimensional.

Como sugestão para trabalhos futuros, os resultados deste estudo indicaram as seguintes possibilidades:

1. Desenvolver e fabricar um novo suporte cinemático para acomodar as medidas materializadas em posições inclinadas, podendo assim,

posicioná-los em diversas outras posições, permitindo avaliações mais completas do desempenho do *laser tracker*.

2. Estimar a incerteza de medição de forma mais detalhada para o processo de relocação com medidas materializadas, de tal forma que seja possível analisar as diversas fontes de incerteza do processo de realocação.

6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society of Mechanical Engineers. ASME B.89.4.22- 2004 – Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines, 2004

BERRY, D. W. Precise surveying in the construction of Nimrod. The Charterer Surveyor, April 1961

BORGES, A. C. Topografia. 2.Ed. São Paulo:Blucher,1977 v1.

BNL. Site oficial do Brookhaven National Laboratory. Disponível online em: <https://www.bnl.gov/bnlweb/history/nobel>. (último acesso em 27/05/2020)

CALKINS, J. Quantifying Coordinate Uncertainty Fields in Coupled Spatial Measurement Systems. PhD Thesis, Virginia Tech, 2002

CARLÉ, P.; JEANSSON, J.; NILSSON, A. Magnet alignment and survey in CRYRING Nucl. Instrum. Methods Phys. 1995

DOBERS, T.; JONES, M.; MUTTONI, Y. Using a laser scanner for the control of accelerator infrastructure during the machine: International Workshop on Accelerator Alignment. Geneva: [s.n.], 2004

EGGERT, D. W.; LORUSSO, A.; FISHER, R. B. Estimating 3D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms *Mach. Vis. Appl.* **9** .1997

ESTLER, W. T.; EDMUNDSON, K.L.; PEGGS, G.N.; PARKER, D.H. Large-Scale Metrology - An Update (2002).

FERRUCCI,F.;MURALIKRISHNAN,B.;SAWYER,D.; PHILLIPS, S.; PETROV,P.; YAKOVLEV,Y. A.; ASTRELIN, S. Evaluation of a laser scanner for large volume coordinate metrology-A comparison of results before and after factory calibration. Article in Measurement Science and Technology · September 2014

FRANCESCHINI, F.; GALETTO, M.; MAISANO, D.; MASTROGIACOMO, L.; PRALIO, B. Distributed Large-Scale Dimensional Metrology-New Insights. 2011

FRANCESCHINI, F.; MAISANO, D. The evolution of large-scale dimensional metrology from the perspective of scientific articles and patents, 2013.

FRANCESCHINI, F.; GALETTO, M.; MAISANO, D.; MASTROGIACOMO, L. Large-Scale Dimensional Metrology (LSDM): from Tapes and Theodolites to Multi-Sensor Systems (2014)

FRIEDSAM, H. 1994 A new accelerator alignment concept using laser trackers
Proc. of the European Particle Accelerator Conf. (London)

FUSS, B. COCQ, C. L. RULAND, R.; STAIGER, R. INVESTIGATION ON LASER SCANNERS. In: International Workshop on Accelerator Alignment. Geneva: [s.n.], 2004.

GAO, Y.; KYLE, S.; LIN, J.; YANG, L.; REN, Y and ZHU, J. Laser tracker orientation in confined space using on-board targets, Measurement Science and Technology, 2016

GAYDE, J. C.; HUMBERTCLAUDE, C. LASSEUR, C. Prospects of Close Range Digital Photogrammetry in large physics installations. In: International Workshop on Accelerator Alignment. [S.l.: s.n.], 1997

GALLAGHER, B.B.; Optical shop applications for laser tracker metrology systems, A Thesis Submitted to the Faculty of the Department of optical sciences, 2003

GERALDES, R. R. Desenvolvimento de bancada de alinhamento magnético pela técnica do fio vibrante para o Projeto Sirius. Dissertação de Mestrado Profissional em Física com Ênfase em Instrumentação Científica. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas Coordenação de Física Aplicada CBPF/RJ, 2015.

GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. Elementary Surveying - An Introduction to Geomatics Thirteenth. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2012. ISBN 9780132554343

GREENWOOD, T. A., MR&D Optics Engineer, Boeing Commercial Airplane Group, Seattle, Washington - "Rapid Contour Measurement of Composite Structures Utilizing a 3D Tracking Interferometer". 1993.

GONÇALES, R. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia, 2007.

GONÇALVES, C. R. L. Um estudo comparativo de sistemas de medição aplicáveis ao controle dimensional de superfícies livres em peças de médio e grande porte - Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial-2006

Guia para Expressão da Incerteza de Medição (GUM). Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). 3ª Edição Brasileira (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement). 2012.

HARTLEY, R.; and ZISSERMAN, A. 2003 *Multiple View Geometry in Computer Vision* (Cambridge: Cambridge University Press)

HEXAGON METROLOGY 2012, Leica absolute interferometer. Disponível em: Arquivos internos da empresa NMS do Brasil.

HOCKEN, R.; PEREIRA, P. Coordinate Measuring Machines and Systems. Second. Boca Raton: CRC Press, 2012. ISBN 9781420017533.

KELLER, R. 1991 Survey and alignment of the advanced light source in Berkeley Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 56/7 422–6

KYLE, S. A.; ROBSON, S.; CHAPMAN, D. P.; CROSS, P. A.; ILIFFE, J. C.; OLDFIELD, S. Understanding large scale metrology. In: National Measurement Conference. [S.l.: s.n.], 2001.

KYLE, S. Direct connections between instruments for improved measurement networks: accuracy/speed/flexibility 2018.

LAU, K.; Hocken, R.; HAYNES, L. Robot performance measurements using automatic laser tracking techniques. Robot Comput Integr Manuf 1985;2(3/4):227–36.

LAU, K.; HOCHEN, R.; and HAIGHT, W.C. "Automatic laser tracking interferometer system for robot metrology," Precision Engineering, Vol. 8, no. 1, pp. 3-8, 1986.

LAU K and R. J. HOCKEN, Three and Five Axis Laser Tracking Systems, United States Patent 4,714,339, granted December 22, 1987

LAZAR, M. The Boeing Company, Photogrammetry Measurements of Airplane Passenger Entry Doors, THE JOURNAL OF THE CMSC, 2015.

L. LIU, H. WESTFAHL Jr., "Towards diffraction limited storage ring based light sources", in Proc. 8th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'17), Copenhagen, Denmark, May 2017,

L.LIU, MILAS.N, MUKAI.A.H.C, RESENDE. X. R, SÁ.F.H. The Sirius Project; J Sychrotron Radiant, 2014.

L. LIU. et al. Sirius: a 5BA low emittance lattice with superbends for the new Brazilian Synchrotron Light Source. Synchrotron Radiation News, p. 34 - 38, 2013. LNLS.

L. LIU, NEUENSCHWANDER. R. T, RODRIGUES. A. .R .D, CASTRO. A. R. D, GONÇALVES. C. E. T, KUNIYOSHI. H, MESA. A. L.; AND BASÍLIO, R. Alignment for the LNLS synchrotron light source. Proceedings of the fifth European Particle Accelerator Conference, 1996.

LEÃO, R. J. 2017 Uncertainty evaluation for the alignment of particle accelerators: application to the Brazilian synchrotron light source Sirius PhD Thesis Aeronautics Institute of Technology, Brazil

LEÃO, R. J.; BALDO, C. R.; REIS, L.C.C.; TRABANCO, J. L.A.; RODRIGUES, F.; NEUENSCHWANDER, R. T. Magnet alignment on a common girder: Development of a length artefact for measurement accuracy improvement, 2017

LEÃO, R. J.; NEUENSCHWANDER, R.; TRABANCO, J.L.A.; Reis, M.L.C.C- Network survey simulations for planning the alignment of a particle accelerator-xxi imeko World Congress “Measurement in Research and Industry” August 30 – September 4, 2015, Prague, Czech Republic

LIMA, C.R.G. Estudo Comparativo de Sistemas de Medição Aplicáveis ao Controle Dimensional de Superfícies Livres em Peças de Médio e Grande Porte, Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de Mestre em Metrologia, 2006.

LIN, P.D and LU. C.H, Modeling and sensitivity analysis of laser tracking system by skew-ray tracing method, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. 127 (3), 654-662 654-662 (2005).

LUHMANN, T.; ROBSON, S.; KYLE, S.; and HARLEY, I.; “Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications,” Wiley, 2006

MAYOUD, M. Large Scale Metrology for research and Industry- Application to particle accelerators and Recent developments In:Fig Congress. 2004

MARBS, A.; BOOCHS, F.; PSCHORN, I. Final concept of the photogrammetric alignment system ralf for high-radiation areas of fair. In: International Workshop on Accelerator Alignment. Tsukuba: [s.n.], 2008.

MARCONI, M.A; LAKATOS, E.M. Fundamentos de metodologia científica. 7.ed. São paulo, 2010.

MARTIN, D. Review of Accelerator Alignment. Proceedings of FIG Congress – Facing the Challenges – Building the Capacity. Sydney, Australia, 11-16 2010

MENG, G.; TIEMIN, L.; WENSHENG, Y. “Calibration method and experiment of Stewart platform using a laser tracker,” in Proc. IEEE Int. Conf. Syst., Man Cybern., vol. 3. Oct. 2003, pp. 2797–2802

MIGUEL, P.A.C., Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações. Elsevier Brasil. 2 a Edição 1996.

MUELANER, J. E.; Cai B and MAROPOULOS P G 2010 Large-volume metrology instrument selection and measurability analysis Proc. Inst. Mech. Eng. B 224 853–68

MURALIKRISHNAN, B.; STEVE, P.; SAWYER, D. Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review. *Precision Engineering* 44 (2016) 13–28

MURALIKRISHNAN, B.; SAWYER, D.; BLACKBURN, C.; PHILLIPS, S.; BORCHARD T.B.; ESTLER, W. T., ASME B89.4.19 Performance Evaluation Tests and Geometric Misalignments in Laser Trackers, (2009)

MUSKE, S.; SALISBURY, D.; SALERNO, R.; and CALKINS J., “747 data management system development and implementation,” in *Proc. CMSC Conf. Boeing Large Scale Metrol. Conf.*, Long Beach, CA, USA, 1999, pp. 1–6.

National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC) Taiwan. Disponível em: <http://www.nsrcc.org.tw/english/lightsource.aspx>. Acesso em 29 de Dezembro de 2020.

NASR, K.M.; FORBES, A.B.; HUGHES, B.; LEWIS, A, ASME B89.4.19 Standard for laser tracker Verification Experiences and Optimisations, 2012

NBR 13133 Execução de Levantamento Topográfico. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994

OLIVEIRA, R.G.; LUCKE, S.; Validação de conexão recíproca entre Laser Trackers usando a técnica de calotas esféricas, Projeto Fim de Curso, Engenharia Mecânica. 2020.

PUTTOCK, MJ (1978) Large-Scale Metrology. *CIRP Annals* 27(1):351–356.

RAMOS, D. Geodésia na Prática. 3ª Edição. MData Informática. Araraquara: 1999.

RODRIGUES, A.R.D.; ARROYO, F.; BAGNATO, O.R.; CITADINI, J.F.; FARIAS, R. H. A.; FRANCO, J.G.R.S.; LEÃO, R.J.; L. Liu.; MARQUES, S.R.; NEUENSCHWANDER, R.T.; RODRIGUES, C.; RODRIGUES, F.; SERAPHIM, R.M.; SILVA, O.H.V. Sirius light source status report, 2018

ROQUE, A.J; WESTFAHL, H.J, Projeto Sirius. Inovação/Tecnologia/Artigos, 2017.

SAWYER, D.S.; FRONCZEK, C. Laser tracker compensation using displacement interferometry. In: *Proceedings of the ASPE 18th Annual Meeting*. 2003.

SCHMITT, R.H.; PETEREK .M, MORSE. E, KNAPP.W, GALETTO .M, HARTIG. F, GOCH .G, HUGHES .B, FORBES A., ESTLER W.T. *Advances in Large-Scale Metrology – Review and future trends*, 2016

SILVA, T.F.; MARTINS, M.N. Statistical treatment of misalignments in particle accelerators. *Computer Physics Communications* 182 (2010) 679–682. Synchrotron Soleil, França; Disponível em: <https://www.synchrotron-soleil.fr>

Acesso em 29 de dezembro de 2020.

SOUSA, A. R.; OROSCO, D. B.; GIAMMUSSO, L. Avaliação da Incerteza Volumétrica de Braços de Medição Por Coordenadas. Congresso Metrologia-2003 – Metrologia para a Vida, Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM), Recife, 2003.

SPIESS, S.; VINCZE, M.; and M. AYROMIOU, “On the calibration of a 6-D laser tracking system for dynamic robot measurements,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 47, no. 1, pp. 270–274, Feb. 1998.

STEERE, A. R. A timeline of major particle accelerators. Michigan State University, 2005, <http://bt.pa.msu.edu/pub/papers/steeremsc/steeremsc.pdf> , 06/06/2020

TOMMASELLI, A. M. G. Um Estudo Sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3D a Curta Distância. GEODÉSIA Online - Revista da Comissão Brasileira de Geodésia. 4 / 2003

VAN DEN HEUVEL, F. A, KROON, R. J. G. A., LE POOLE, R. S., 1992, Digital Close-Range Photogrammetry Using Artificial Targets, *International Archives of Photogrammetry* 8, *Remote Sensing* 28IB5: 222-9

VIEIRA, Paulo Rogério. A utilização de máquinas opto-eletrônicas de longo alcance para medição tridimensional como fator de otimização fabril.

Wan, An, Xu .J, Member, IEEE, Dongjing Miao, and Ken Chen, An Accurate Point-Based Rigid Registration Method for Laser Tracker Relocation, 2017

WANG, Z, MASTROGIACOMO. L, FRANCESCHINI. F, and MAROPOULOS. P, “Experimental comparison of dynamic tracking performance of iGPS and laser tracker,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 56, no. 1, pp. 205–213, Sep. 2011

WIEDEMANN, H. Particle Accelerator Physics. 3a. ed. New York: Springer, 2007.

WINICK HERMAN. FOURTH GENERATION LIGHT SOURCES, STANFORD LINEAR ACCELERATOR CENTER STARNFORD ,CA 94309, USA

YONATH, A. et al. Structure of Functionally Activated Small Ribosomal Subunit at 3.3 Å Resolution. *Cell*, volume 102, issue 5, p. 615-623, 2000.

YU, C. Smoothing based on best-fit transformatoin. In: International Workshop on Accelerator Alignment. Beijing: [s.n.], 2014.

Zhang, D.; Rolt S and MAROPOULOS P G 2005 Modelling and optimization of novel laser multilateration schemes for high-precision applications *Meas. Sci. Technol.* **16** 2541

Folha de São Paulo, Disponível em: <https://ciencia.estadao.com.br/noticias/geral,novo-acelerador-de-eletrons-coloca-brasil-na-fronteira-da-ciencia-mundial,70002602598>, acesso dia 02/01/2021.

APÊNDICES

APÊNDICE A: RELATÓRIO TRACKER PILOT PARA VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DISTÂNCIAS

ADM Check Report




Name: 2020-12-10 09-13 ADM Check

Results

Tolerance Used: 80 %

Measurements: 6

	New	Active	Deviation	Standard Deviation
ADM Offset [mm]	90.207	90.210	-0.003	0.004

Tracker

Product Name: AT403

Serial Number: 393586

IP Address: 192.168.250.1

Compensation: 2019-10-29 14-17

Target

Product Name: Red Ring Reflector 1.5 Inch

Id	U(95) [mm]
In1-1	0.002
In1-2	0.001
Out-1	0.002
Out-2	0.003
In2-1	0.002
In2-2	0.001

APÊNDICE B: RELATÓRIO TRACKER PILOT PARA VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO ANGULAR.

Angle Check Report



Name: 2020-12-09 10-34 Angle Check

Results

Tolerance Used: 68 %

Measurements: 6

Tracker

Product Name: AT403

Serial Number: 393586

IP Address: 192.168.250.1

Compensation: 2019-10-29 14-17

Target

Product Name: Red Ring Reflector 1.5 Inch

Id	U(95) [mm]
1	0.005
2	0.007
3	0.006
4	0.004
5	0.003
6	0.015