

Avaliação preliminar do uso de artefatos físicos para a realocação de laser trackers em ambientes confinados

Preliminary evaluation of physical artifacts to perform laser tracker relocations in confined environments

Douglas L. Passuelo^{a,b}, Henrique G. Paranhos^a, Gustavo R. Oliveira^a, Maria C. Oliveira^{b,c}, Rodrigo J. Leão^a

^a Laboratório Nacional de Luz Síncrotron – LNLS, Campinas, SP, Brasil;

^b Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, Santa Barbara d Oeste, SP, Brasil;

^c Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, Brasil;

E-mail: douglas.passuelo@lnls.br

Resumo: O objetivo deste artigo é avaliar um método de realocação de laser trackers em um ambiente confinado e de geometria complexa, caracterizado por linhas de visada restritas e configuração de realocação não trivial para a realização da medição de todo o conjunto. Este método de realocação consiste na utilização de artefatos físicos que materializam pontos de referência temporários. Os experimentos foram executados em uma estação experimental da fonte de luz síncrotron Sirius. O novo método de medição foi comparado a outros dois métodos, sendo um deles um arranjo convencional com um laser tracker, e o outro um sistema de medição de referência. Como métrica da qualidade da metodologia proposta, foram analisados os desvios de orientação e forma da estação experimental através dos três sistemas de medição. Os resultados obtidos com este estudo indicam boa resposta da nova configuração, quando comparado ao sistema de referência. Além disso, as estimativas da incerteza de medição mostram um ganho significativo de confiabilidade metrológica com o uso dos artefatos físicos.

Palavras-chave: Metrologia de grandes volumes, aceleradores de partículas, metrologia por coordenadas portátil, medição em ambientes confinados.

Abstract: This paper presents the results of experiments for the evaluation of a method of reallocating laser trackers in a confined environment and complex geometry, characterized by restricted lines of sight and not trivial reallocation configuration for the measurement of the whole set. The method consists of using physical artifacts that materialize temporary reference points. The experiments were performed at an experimental station of the Sirius synchrotron light source. The new setup was compared to two other methods, one being a conventional arrangement with a laser tracker, and the other a reference measurement system. As metric of the quality of the proposed methodology, the orientation and shape deviations of the experimental station were analyzed for the three measurement systems. A good response of the new configuration was obtained when compared to the reference system, and the measurement uncertainty estimated shows a significant improvement in metrological reliability with the use of physical artifacts.

Keywords: Large volume metrology, particle accelerators, portable coordinate metrology, measurement in confined environments

1. Introdução

A metrologia de grandes volumes enfrenta diversas dificuldades quanto à dimensão do mensurando e, muitas vezes, quanto à necessidade de se realizar medições em ambientes confinados. Na fabricação e inspeção de grandes objetos, como antenas de rádio, aeronaves e aceleradores de partículas, a medição por coordenadas portátil tem sido uma ferramenta muito utilizada [1, 2]. Puttock descreve que a metrologia de grande escala ou grandes volumes é um desafio para o metrologista uma vez que as dimensões lineares variam de dezenas a centenas de metros [3].

No entanto, se por um lado características como grande alcance de medição, alta precisão e medição em tempo real contribuem para que o laser tracker seja tipicamente utilizado na medição de grandes volumes [4], por outro lado, frequentemente encontramos a problemática relacionada a oclusão do feixe do laser. Por ser um sistema óptico, o laser tracker requer linhas livres de visada para a realização de medições (entre a objetiva/saída de laser e o objeto a ser medido). Sendo assim, a melhor solução é medir parcialmente o componente com o laser tracker realocado em diferentes posições. Dessa forma, com a união de diferentes posicionamentos, todos os pontos de interesse podem ser visualizados e assim medidos pelo instrumento.

Para a realocação de estações em medições de grandes volumes, geralmente utiliza-se uma rede de pontos permanente. Porém, dado que normalmente deve-se haver uma distribuição uniforme dos pontos no volume de medição para se obter alta precisão de orientação [5], a técnica mencionada pode apresentar dificuldades do ponto de vista das geometrias do produto e ambiente de medição, já que nem sempre é possível visualizar todos os pontos da rede. Nesse estudo, é proposta a utilização de artefatos físicos para auxiliar na realocação de laser trackers, de modo a permitir: que os mesmos sejam localizados dentro de ambientes confinados e que dois trackers sejam utilizados de forma concomitante e bem conectados entre si, com a criação de um setup robusto de medição. O desempenho deste método é comparado a uma técnica convencional de realocação e a um sistema de medição de referência. A caracterização do disco de confusão de uma estação

experimental de um acelerador de partículas é utilizada como caso de estudo. Este artigo descreve o planejamento e a execução dos experimentos, bem como os resultados que permitirão demonstrar o campo de aplicação do sistema de realocação utilizando os artefatos físicos. Além disso, o trabalho compara a exatidão dos resultados obtidos através dos três métodos por meio de cálculos de incerteza de medição dos pontos coletados.

2. Objeto de estudo

O experimento foi planejado de modo a avaliar os erros de retitude e orientação da trajetória de um sistema de movimentação interno a uma câmara de vácuo com 30 m de comprimento, ao longo de um eixo de referência, conforme Figura 1. Esta medida é denominada disco de confusão.

A câmara faz parte de uma das estações experimentais do Sirius, a nova fonte de luz síncrotron brasileira em desenvolvimento em Campinas, SP [6]. Essa estação experimental será dedicada à técnica de espalhamento de raios X a baixos ângulos (SAXS, da sigla em inglês *Small-Angle X-ray Scattering*). No interior da câmara será montado o detector de raios-x da linha de luz, em um sistema de movimentação capaz de percorrer os 30 m ao longo do eixo longitudinal (Z), além de movimentos nos eixos transversais (X e Y).

Conforme estabelecido no projeto do sistema, a tolerância do disco de confusão é de 1 mm de diâmetro, tendo como eixo de referência para o alinhamento, a posição nominal do feixe de raios-x da linha de luz.

Após o pré-alinhamento dos trilhos no interior da câmara, foi realizada a medição da trajetória do sistema de movimentação utilizando-se um laser tracker de maneira convencional, montado em uma das extremidades da câmara e localizado através de pontos de uma rede de referência permanente instalada ao longo da estação experimental (setup 1). Um setup inovador, composto por dois laser trackers conectados via pontos de referência de artefatos físicos, foi proposto para a redução da incerteza de medição e para uma melhor avaliação da orientação da câmara (setup 2). Ambos os setups foram comparados à uma medição dita de referência, na qual um sistema de alinhamento a laser foi utilizado para mapear os desvios de forma (retitude bidirecional) do sistema de movimentação do detector.

O software de medição SpatialAnalyzer foi utilizado para o controle dos laser trackers e para a análise dos dados. O algoritmo de propagação de incertezas e ajuste de redes de medição, desenvolvido por Calkins [7] e implementado no software, foi utilizado para a conexão entre as estações e para a estimativa da incerteza de medição dos setups 1 e 2.

Deve-se ressaltar que, para a avaliação de conformidade, é de extrema importância considerar as incertezas de medição envolvidas no processo, de modo a garantir que não haja um cenário com falsa aprovação do sistema [8]. Ainda, outro ponto a se considerar é a confiabilidade do processo de medição, que poderia levar, num outro cenário, à reprovação de um sistema que está, na verdade, dentro do especificado.

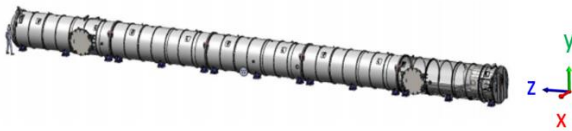


Figura 1. Modelo 3D Câmara SAXS.
Fonte. Joachim Léonardon [9]

3. Sistema de medição de referência

O sistema de alinhamento a laser do fabricante Hamar Laser, modelo L-743 *Ultra-Precision Triple Scan*, possui grande aplicação para verificação de erros de forma (planeza e retitude) e foi utilizado como referência entre os processos de medição aplicados, pois, entre suas vantagens, ele oferece um setup de montagem rápida, possui uma exatidão geométrica com nível de planeza de até 0,0013 mm/m, além do alcance de medição radial de 30,5 m. Esse sistema de medição é comumente utilizado para o alinhamento de geometrias de máquinas ferramentas e grande equipamentos.

Pode-se dividir o equipamento em duas partes: um cabeçote emissor, que gera planos de laser através da rotação de três eixos; e sensores PSD (do inglês *Position Sensitive Device*) que fornecem uma saída analógica. O centro de energia do feixe de laser é detectado na área de varredura do sensor e assim convertido em um sinal elétrico proporcional a sua localização na superfície do alvo, conforme a Figura 2. Conseguise com este método, alta velocidade de alinhamento, além da exibição de dados em tempo real,

assim qualquer desvio ao longo de um eixo de movimentação provocará deslocamentos que serão medidos pelos sensores PSD.

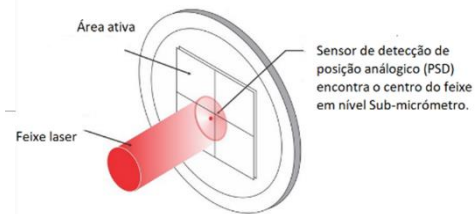


Figura 2. Princípio de detecção sensores PSD.
Adaptado de: <https://www.hamarlaser.com>

Para a realização da medida do disco de confusão utilizando o sistema de alinhamento de referência, inicialmente foram fixados 2 sensores PSD, sobre o carro de movimentação. Em seguida foi realizado o alinhamento dos planos de laser rotativos gerados pelo emissor com o eixo de movimentação.

Finalizado o processo de alinhamento do sistema, é realizada a medição do disco de confusão, registrando observações a cada 1 m no eixo longitudinal, em toda sua extensão. A montagem experimental pode ser melhor entendida com a ajuda da Figura 3.



Figura 3. Montagem do setup utilizando Hamar Laser. (a) Posição sensores PSD e (b) cabeçote emissor dos planos de laser.

4. Métodos de medição investigados

O laser tracker teve seu desenvolvimento no início da década de 1980, no Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia Americano (NIST). Trata-se de um equipamento portátil de medição por coordenadas capaz de medir longas distâncias. O laser tracker utiliza como alvo uma SMR (do inglês *Spherically Mounted Reflector*) e é capaz de medir seu posicionamento tridimensional no espaço enquanto a mesma é movimentada. Executa suas medições em coordenadas polares, ou seja, ângulo vertical, ângulo horizontal e distância do centro de giro do cabeçote até o centro

da SMR. Por ser um equipamento portátil e dinâmico, é empregado em vários segmentos da indústria, como aeronáutico, naval, automotivo e de grandes máquinas e equipamentos.

O uso cotidiano de máquinas de medição portáteis como o laser tracker eventualmente se depara com situações em que as visadas livres para o objeto a ser medido são escassas, como no caso de ambientes confinados. Há algumas soluções propostas para este problema, baseadas, por exemplo, em técnicas de orientação mútua entre trackers [10]. Neste trabalho explorou-se a possibilidade de se utilizar artefatos físicos para a realocação de instrumentos. Foram utilizados laser trackers da linha AT40X do fabricante Leica Geosystems.

4.1. Setup-1 – Realocação utilizando rede de pontos.

Para medição do disco de confusão no setup 1, foi utilizado apenas um laser tracker, fazendo-se as realocações iniciais através de uma rede de pontos permanente e pontos temporários fixados no interior da cabana experimental, conforme esquemático representado na Figura 4 (as linhas de visada deste setup foram omitidas da figura para fins de simplificação). Em seguida, uma terceira estação foi posicionada dentro da cabana experimental e localizada utilizando os pontos temporários previamente medidos, pois dentro da cabana não há visada para a rede permanente. Com a terceira estação, foi realizada a medida do disco de confusão, capturando-se pontos a cada 1 metro em todo eixo longitudinal do túnel.

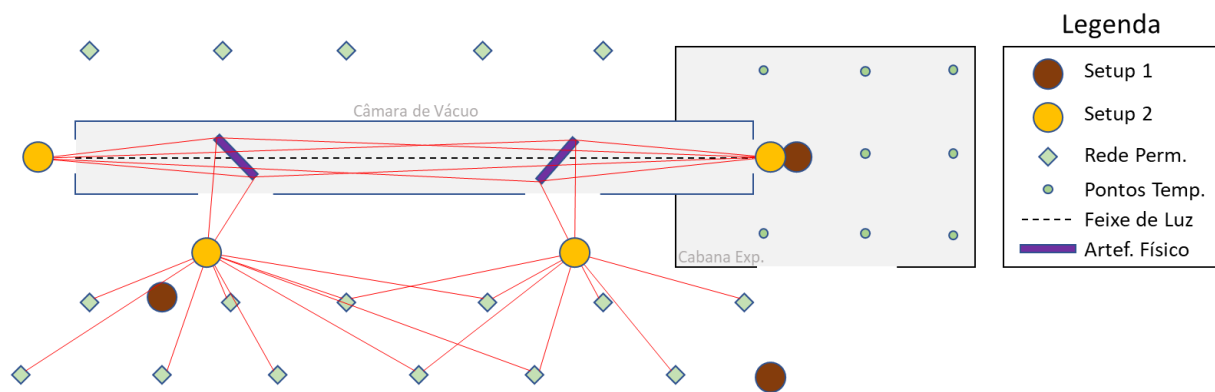


Figura 4. Esquemático dos setups de medição.

4.2. Setup-2 – Realocação utilizando artefatos físicos.

As configurações do setup 2 foram elaboradas visando aprimorar o método de realocação descrito na seção anterior, tido como mais usual em diversas aplicações. Levando em conta o volume de medição e o ambiente confinado, esse procedimento buscou garantir um melhor arranjo na distribuição dos pontos e, conseqüentemente, um melhor resultado na realocação do laser tracker.

Considerando que a incerteza de medição do laser tracker aumenta com a distância, vislumbrou-se uma configuração de layout que utilizaria, simultaneamente, duas estações para a realização da medida, localizadas nas extremidades da câmara de vácuo. Para que as medidas

realizadas pelas duas estações possam ser utilizadas em conjunto, é necessário garantir uma boa orientação entre os dois instrumentos. Essa condição, no entanto, garante apenas a possibilidade de se medir erros de forma. Assim, para que seja possível avaliar também a orientação da câmara em relação ao sistema de coordenadas do acelerador, se faz necessário que ambas as estações estejam bem orientadas também em relação à rede de pontos permanente. Portanto, para realização deste método, dividiu-se o procedimento em duas etapas. A Figura 4 ilustra, também, a configuração do setup 2, incluindo as linhas de visada de cada estação.

Na etapa 1 foi feita a localização de dois laser trackers utilizando-se a rede de pontos per-

manentes e, em seguida, medição de dois artefatos físicos, posicionados no interior da câmara, conforme Figura 5.

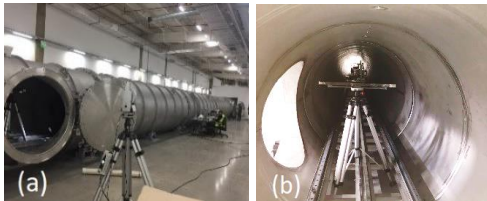


Figura 5. Setup 02. (a) medição artefato físico e (b) posição do artefato físico.

Na etapa 2 foi realizada a realocação dos dois instrumentos, posicionando-os nas extremidades da câmara, permitindo assim a realocação através da medição dos dois artefatos físicos (medidos nas estações anteriores). Com os equipamentos realocados, foi realizada a medida do disco de confusão, com aquisição de pontos a cada 1 m no eixo longitudinal. A Figura 6 mostra o posicionamento das duas estações utilizadas nas extremidades da câmara.

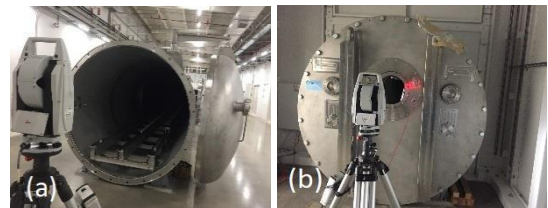


Figura 6. Setup 2 - medição disco de confusão (a) Posição posterior à câmara (b) Posição anterior à câmara.

5. Resultados e discussões

A análise dos diversos dados obtidos com os diferentes procedimentos pôde ser realizada em três etapas distintas. Em um primeiro momento, avaliou-se os resultados absolutos de orientação e erros de forma do sistema de movimentação, em relação à referência nominal do feixe de raios-x. Numa segunda etapa foi realizada a estimativa e comparação das incertezas de medição para os diferentes métodos. Por fim, consolidando as informações descritas nas etapas anteriores, os resultados dos diferentes discos de confusão obtidos foram investigados.

5.1. Orientação e erro de forma

Os resultados que revelam erros de forma e orientação dos diversos setups foram compilados nos gráficos da Figura 7:

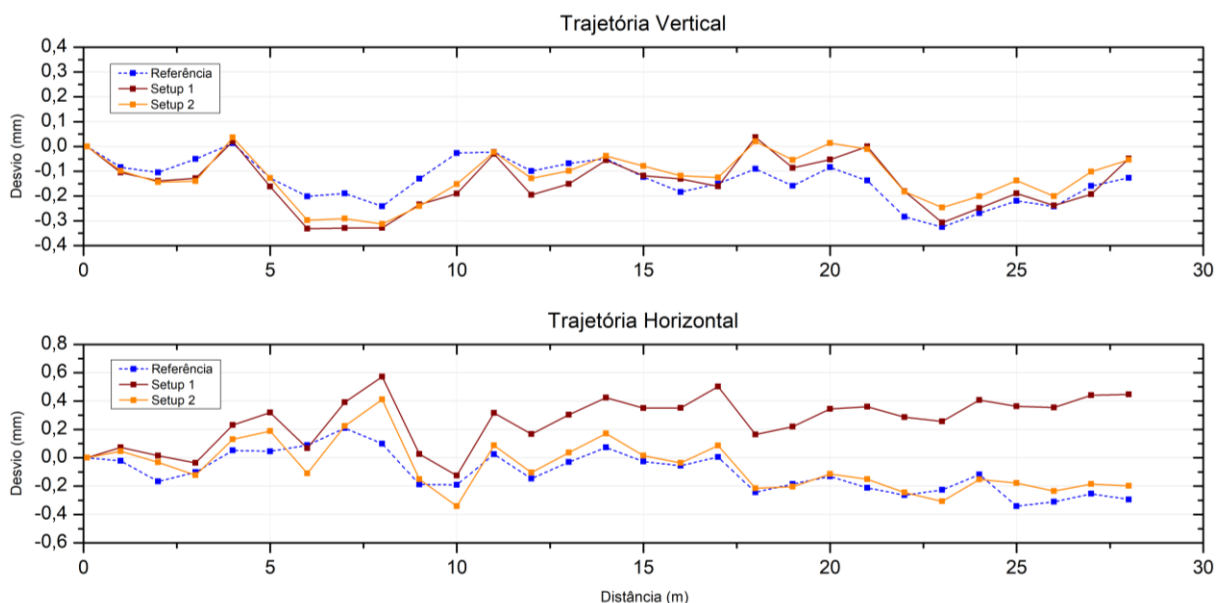


Figura 7. Desvios de trajetória dos diferentes métodos avaliados.

Observa-se que, apesar de todos os setups serem capazes de medir com exatidão os erros de forma e a orientação vertical, não se pode afirmar o mesmo para a medida da orientação horizontal do sistema de movimentação com relação ao eixo de referência.

A curva de referência, mostrada em azul na Figura 7, foi obtida através da medida do erro de forma utilizando-se o sistema laser de referência, juntamente com a medida de orientação obtida através de uma estação de laser tracker localizada diretamente pela rede permanente e com curta distância de medição (baixa incerteza).

Na direção vertical, pode-se explicar a alta exatidão de ambos os setups pelo fato de todas as estações estarem bem niveladas com relação à gravidade. Já na direção horizontal, pode-se ver que apenas o setup 2 é capaz de replicar a orientação indicada pela curva de referência. O fato de as duas estações de laser tracker neste setup terem sido localizadas através dos artefatos físicos, significa uma localização indireta

pela própria rede de pontos permanentes. Esse fato resulta na boa orientação com relação ao sistema de coordenadas do acelerador, aliadas à uma boa orientação mútua entre as estações dada pela medida cruzada dos dois artefatos. Além disso, a configuração proposta prevê os artefatos posicionados ao longo da própria linha de visada do sistema de movimentação, o que aumenta de forma significativa a robustez do setup.

5.2. Incertezas de medição

A estimativa das incertezas foi realizada de maneira distinta para cada um dos setups. Para o laser de referência utilizou-se o cálculo do desvio padrão considerando 3 aquisições para cada ponto de interesse. Já para os setups com laser tracker, foi utilizado o algoritmo previamente mencionado. Os resultados das avaliações das incertezas de medição dos diferentes setups podem ser visualizados na Figura 8:

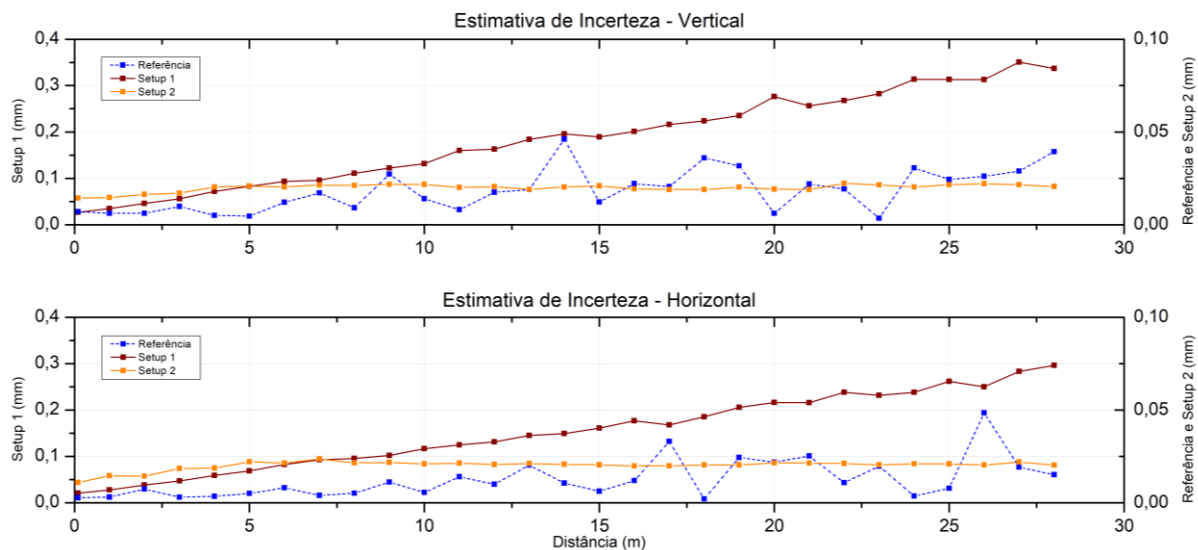


Figura 8. Incertezas estimadas expressas para uma probabilidade de abrangência de 95,45 %.

Vale ressaltar que os gráficos apresentam dois eixos verticais. No eixo da esquerda está representada a incerteza do setup 1, enquanto o eixo da direita representa os setups de referência e o setup 2.

Em relação ao sistema de referência, verifica-se que há uma pequena tendência de aumento da incerteza com a distância de medição. Mesmo assim, os valores calculados através do desvio padrão são satisfatoriamente baixos para a aplicação, mantendo-se abaixo de 0,05 mm.

Considerando-se o setup 1, observa-se que a incerteza aumenta proporcionalmente à distância, como é o esperado para laser trackers. Ainda, o algoritmo utilizado faz a propagação da incerteza inerente à rede permanente, e por isso observa-se valores significativamente altos, com um máximo de 0,35 mm.

Ao analisar o setup 2, nota-se que há uma expressiva diminuição nos valores de incerteza quando comparados ao setup 1. Isso se dá pela diferente metodologia de realocação empregada neste método, que consistiu na utilização dos artefatos físicos alocados internamente ao volume de medição de interesse. Com estes artefatos, foi possível fazer com que as estações pudessem se conectar com a rede através de pontos em comum na mesma direção de visada na qual ocorreu a medida do disco de confusão. Outro ponto interessante é o comportamento da curva, no qual se observa uma pequena rampa nos primeiros 5 m e em seguida a manutenção dos valores de incerteza ao longo de toda a câmara. Uma hipótese levantada para este comportamento é que a utilização simultânea de dois trackers é capaz de anular o efeito de aumento da incerteza com a distância, já que as estações estão medindo em sentidos contrários. Outra hipótese é que a rampa inicial possa estar relacionada com a distância entre a primeira estação e o artefato físico, fazendo com que entre os artefatos os valores se mantenham constantes. No entanto, futuros estudos devem ser conduzidos para elucidar estas questões.

5.3. Disco de confusão

O disco de confusão é uma forma de unificar as informações de trajetória, orientação e incerteza. A tolerância exigida para o sistema em questão é um disco com diâmetro de 1 mm.

Na figura abaixo representa-se, para os três setups, os discos de confusão obtidos. Vale ressaltar que os diâmetros considerados levam em consideração a incerteza radial do ponto mais extremo englobado pelo círculo.

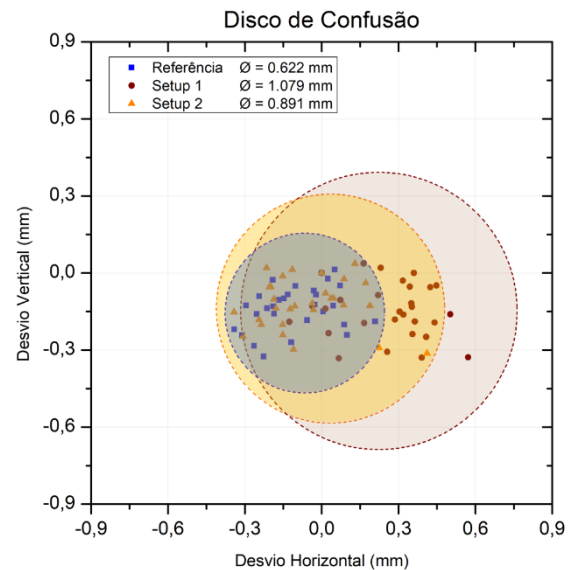


Figura 9. Discos de confusão medidos através dos três setups.

Pode-se observar no gráfico que os resultados obtidos estão muito próximos à tolerância solicitada, podendo resultar em interpretações errôneas. Esse fato reforça a criticidade de se realizar uma análise de incertezas adequada. No caso do setup 1, por exemplo, evidencia-se o cenário em que, ao considerar os valores de incerteza, o diâmetro do disco de confusão fica acima do tolerado. Além disso, o mesmo setup apresentou desvios elevados em relação à medida de referência, levando à reprovação de um sistema que está dentro do especificado.

Nota-se também uma boa correlação entre os pontos de referência e os medidos no setup 2, indicando que a realocação dos trackers através dos artefatos físicos funcionou de maneira satisfatória.

O método de ajuste aqui utilizado baseia-se em otimizações da posição e orientação de instrumentos levando-se em consideração a incerteza de medição. Desse modo, o algoritmo pesa diferentemente as observações de acordo com a distância da linha de visada. Além dos setups estudados, o setup 1 foi analisado de forma alternativa, através de ajuste por mínimos quadrados de forma convencional (*best-fit*). Através dessa técnica, além de a propagação de incerteza da rede de pontos permanente não ser direta, a orientação do sistema de movimentação não pôde ser corretamente estimada. Para efeito de comparação, através do *best-fit*, um disco de

confusão de aproximadamente 0,95 mm de diâmetro foi encontrado, passando a 1,3 mm se considerada a incerteza de medição, ainda que a incerteza da rede de pontos permanente seja desconsiderada.

6. Conclusões

Este trabalho buscou analisar os aspectos envolvidos na realocação de laser trackers utilizando artefatos físicos, comparando esta técnica com um setup convencionalmente utilizado, baseado na utilização de redes de pontos (permanentes e/ou temporários). Para isso, e devido à demanda específica da aplicação, foi proposto um método de realocação que permitisse o uso simultâneo de dois trackers em um volume de medição de aproximadamente 30 m, cujas visadas para medição são limitadas. Com um sistema de referência, caracterizou-se o erro de forma e a orientação do sistema de movimentação a ser analisado. Em seguida, a medida do disco de confusão foi realizada utilizando-se dois setups diferentes.

Através das análises realizadas, pode-se afirmar que a realocação através de artefatos físicos foi plenamente satisfatória, com boa correlação com as curvas de referência. O fato de se utilizar os artefatos dentro do ambiente que seria medido, com pontos em comum entre as duas estações e ao longo da visada de interesse, colaborou para otimizar a orientação das estações no processo de realocação. Observou-se também uma redução significativa nas incertezas envolvidas quando comparadas às do setup tradicional.

Os resultados obtidos neste trabalho encorajam o uso de artefatos físicos para outras aplicações. Vislumbra-se, por exemplo, aplicar a técnica desenvolvida para possibilitar a conexão entre a rede de pontos de referência interna ao anel de armazenamento do Sirius e a rede das estações experimentais, ambientes fisicamente separados por paredes de concreto com furos longos e estreitos. Esse cenário de aplicação é de grande interesse devido às tolerâncias de alinhamento exigidas para o correto funcionamento de um acelerador de partículas.

Por fim, evidencia-se a possibilidade de se reduzir as incertezas de medição através da oti-

mização da geometria do experimento ao utilizar instrumentos portáteis de medição por coordenadas.

Referências

- [1] Muralikrishnan B, Phillips S, Sawyer D. *Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review*, Precision Engineering, Volume 44, April 2016, Pages 13-28
- [2] 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
- [3] Puttock MJ, 1978 Large-Scale Metrology. CIRP Annals 27(1):351–356
- [4] S. Spiess, M. Vincze, 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.
- [5] Hartley R and Zisserman A, 2003, *Multiple View Geometry in Computer Vision* (Cambridge: Cambridge University Press).
- [6] Liu L, Neuenschwander RT, Rodrigues ARD. 2019. *Synchrotron radiation sources in Brazil*. Phil. Trans. R. Soc. A 377:20180235
- [7] Calkins, J. *Quantifying Coordinate Uncertainty Fields in Coupled Spatial Measurement Systems*. Tese de doutorado, Virginia Tech, 2002
- [8] *Evaluation of measurement data — The role of measurement uncertainty in conformity assessment*, JCGM 106, BIPM, October 2012. [Online]. Available: https://www.bipm.org/utls/common/documents/jcgm/JCGM_106_2012_E.pdf
- [9] Léonardon J, Van Vaerenbergh P, Narayanan T, Sztucki M, Boesecke P, Gorini J, Guillet S, Berkvens P, Dabin Y, Goirand L, Morse J, Martin D, *Design of a new detector tube for wide, small and ultra small-angle X-ray scattering*, 2014
- [10] Gao Y, Kyle S, Lin J, Yang L, Ren Y and Zhu J, *Laser Tracker Orientation in confined space using on-board targets*, 2016