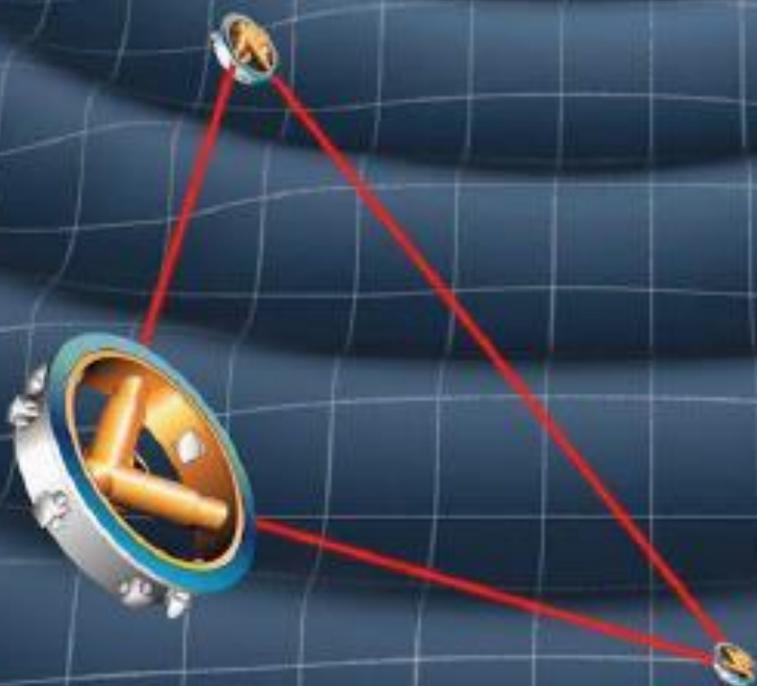


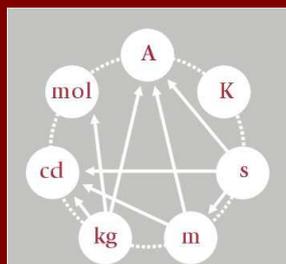
# Revista **MEDIÇÕES E ENSAIOS**

[www.spmet.pt](http://www.spmet.pt)

# SPMet

Sociedade Portuguesa  
de Metrologia





SPMet

Sociedade Portuguesa  
de Metrologia**Conselho Editorial**

Eduarda Filipe  
Álvaro Ribeiro  
Pedro Girão  
Isabel Godinho  
Olivier Pellegrino

**Propriedade e Redação**

Sociedade Portuguesa de Metrologia

**Contactos**

Sede:  
Rua Filipe Folque, 2 - 6º Dto.  
1050-113 Lisboa  
Tel. 213 139 840  
Fax: 213 139 841

Secretariado:  
Av. do Brasil, 101  
1700-066 Lisboa PORTUGAL  
Tel.: +351 - 218 443 201  
Fax: +351 - 218 443 011  
N.I.F. 506 461 696

E-mail: geral@spmet.pt  
Internet: www.spmet.pt

**Periodicidade**

Quadrimestral

**Distribuição**

Eletrónica

ISSN 2182-5424

Os artigos assinados são da res-  
ponsabilidade dos seus autores.

**Foto de Capa**

LISA: *Probing the Universe With Gravi-  
tational waves* (LISA-LIST-RP-436, 2007)

# Índice

EDITORIAL ..... 2

**METROLOGIA ESPACIAL - SISTEMAS DISTRIBUÍDOS NO ESPAÇO**

Manuel Abreu

Centro de Astronomia e Astrofísica da Universidade de Lisboa, FCUL ..... 3

**SISTEMA INTERFEROMÉTRICO MULTICANAL PARA CALIBRAÇÃO DE ACELERÓMETROS PADRÃO**

Catarina Silva<sup>1</sup>, Alexandre Cabral<sup>1,2</sup>, Manuel A. Abreu<sup>1,2</sup>, José Manuel  
Rebordão<sup>1,2</sup>, David Alves<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas, FCUL<sup>2</sup> Centro de Astronomia e Astrofísica (CAAUL), FCUL ..... 17**SENSOR ANGULAR BASEADO NAS MULTIPLAS REFLEXÕES DE UMA CAVIDADE ÓPTICA**

Catarina Silva<sup>1</sup>, Alexandre Cabral<sup>1,2</sup>, Manuel A. Abreu<sup>1,2</sup>, José Manuel  
Rebordão<sup>1,2</sup>, João M. P. Coelho<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas, FCUL<sup>2</sup> Centro de Astronomia e Astrofísica (CAAUL), FCUL,<sup>3</sup> Instituto de Biofísica e Engenharia Biomédica, FCUL, ..... 25**PADRÕES NACIONAIS DE FORÇA**

Isabel Spohr, Eduarda Filipe

Instituto Português da Qualidade (IPQ) ..... 32

**QUALIDADE METROLÓGICA DA MEDIÇÃO ÓPTICA DE DESLOCAMENTO DE PONTE SUSPensa DE ELEVADA DIMENSÃO**Luís Lages Martins<sup>1</sup>, José Manuel Rebordão<sup>2</sup>, Álvaro Silva Ribeiro<sup>1</sup><sup>1</sup> Centro de Instrumentação Científica, LNEC<sup>2</sup> Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas, Depart. Física, FCUL ..... 42

NOTÍCIAS E EVENTOS DA METROLOGIA ..... 55

Publicação apoiada por:

**FCT** Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CIÊNCIA

## Editorial

Caro leitor/a,

Com a realização da Conferência Nacional “CONFMET2014 - Domínios Emergentes da Metrologia” nos dias 26 e 27 de junho, no LNEC em Lisboa, a publicação do número de maio da Revista “Medições e Ensaios” sofreu algum atraso. Considerámos que seria mais razoável publicar um número duplo em setembro que incluísse algumas das comunicações desta conferência. Abrimos a revista com a comunicação convidada “Metrologia Espacial – Sistemas Distribuídos no Espaço” apresentada pelo Doutor Manuel Adler Abreu, Investigador Convidado e Docente no Departamento de Física – Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas, e do Centro de Astronomia e Astrofísica da Universidade de Lisboa, na *Workshop* “Medição de Grandes Estruturas Terrestres e Espaciais em Regime Dinâmico” da CONFMET2014. Fechamos com a secção de “Notícias e Eventos da Metrologia” que inclui pequenas notas sobre os próximos eventos e a publicação de documentos de interesse para a nossa comunidade.

Gostaria de noticiar que a Ordem dos Engenheiros aprovou a criação da “Especialização em Metrologia”, especialização a ser atribuída a engenheiros de diferentes colégios que se dedicam profissionalmente a este setor.

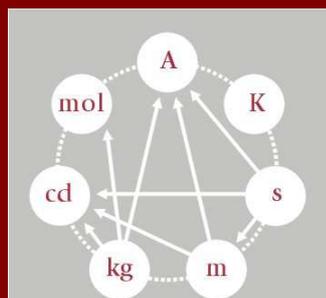
O Conselho Editorial agradece aos autores que nos facultaram os seus trabalhos e à Comissão Científica que desde sempre tem zelado pela qualidade das publicações da SPMet.

Desejamos uma leitura proveitosa deste oitavo número cheio de interesse da Revista Medições e Ensaios.

Lisboa, 30 de setembro de 2014

Eduarda Filipe

Presidente do Conselho Diretivo da SPMet



# SPMet

Sociedade Portuguesa  
de Metrologia

SPMet

ISSN 2182-5424

| nºs 8 e 9 | maio e setembro 2014

## FAÇA-SE SÓCIO

A SPMet tem quatro categorias de associados:

- **ASSOCIADOS HONORÁRIOS** - pessoas singulares ou coletivas às quais, pela sua categoria científica, a SPMet entenda dever conferir este testemunho de consideração.
- **ASSOCIADOS EFETIVOS** - pessoas singulares cuja atividade se processe no domínio da Metrologia ou das Ciências.
- **ASSOCIADOS INSTITUCIONAIS** - as entidades com atividade no domínio do ensino, da investigação, da indústria ou outros de algum modo relacionados com a Metrologia
- **ASSOCIADOS ESTUDANTES** - as pessoas singulares que frequentam o ensino superior e se interessam pelo estudo da Metrologia ou das Ciências afins

O número de associados de qualquer das categorias mencionadas nos números anteriores não será limitado.

Estão disponíveis no seguinte endereço [http://www.spmet.pt/inscricao\\_1024.htm](http://www.spmet.pt/inscricao_1024.htm)

As respetivas fichas de inscrição que, depois de devidamente preenchidas e enviadas para o secretariado de direção, serão analisadas para validação.

## METROLOGIA ESPACIAL – Sistemas Distribuídos no Espaço

Manuel Abreu, Alexandre Cabral, José Rebordão

Centro de Astronomia e Astrofísica da Universidade de Lisboa

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

### RESUMO

Em astronomia, ver mais longe significa também recuar no tempo para observar acontecimentos cada vez mais próximos da génese do universo, característica que depende, no limite, da dimensão física dos instrumentos, i.e. da sua área de coleção. Os telescópios e interferómetros em terra, que têm já dimensões inimagináveis relativamente a algumas décadas atrás, são no entanto limitados pelos efeitos adversos da propagação na atmosfera ou pelo ruído presente a nível da superfície terrestre.

A solução será a implementação destes instrumentos no espaço. Como seria de esperar, o custo e as dificuldades associadas à construção de estruturas de grandes dimensões no espaço vêm limitar grandemente o desenvolvimento deste propósito. Uma solução para este problema é o de construir sistemas distribuídos, constituído por instrumentos de pequenas dimensões, que no seu todo sintetizam um instrumento de grande dimensão. Este conceito, de abertura múltipla, não é mais do que conjuntos de satélites que voam em formação e cuja distribuição no espaço é rigorosamente medida e controlada.

Um caso paradigmático, e que leva ao extremo este conceito, é o sistema NGO – New Gravitational Wave Observatory, em desenvolvimento na ESA. Este instrumento, destinado a medir pela primeira vez as ondas gravitacionais previstas por Einstein, é um interferómetro constituído por três satélites em formação, numa geometria triangular, em que os satélites distam entre si cerca de 5 milhões de quilómetros!

Neste artigo iremos falar um pouco da evolução dos grandes instrumentos em astronomia, com especial atenção ao sistema NGO que representa, de facto, um caso extremo de Metrologia em grandes infra-estruturas no espaço.

### INTRODUÇÃO

Em astronomia, ver mais longe significa também recuar no tempo para observar acontecimentos cada vez mais próximos da génese do universo. Esta capacidade depende, no limite, da dimensão física dos instrumentos e da sua capacidade de colectar luz de objectos muito distantes.

De uma forma geral, são duas as características que definem a boa qualidade da observação astronómica de objectos distantes e pouco luminosos: poder de resolução angular (inversamente proporcional ao diâmetro da área colectora de luz) e sensibilidade (maior quantidade de radiação colectada num menor tempo de exposição, associada a grandes superfícies de colecção de luz).

Estes dois factores levam a que se tenda a construir instrumentos de cada vez maior dimensão, com maior área colectora de luz, de modo a garantir a observação de objectos cada vez mais distantes.

Os telescópios e interferómetros em terra são entanto limitados pelos efeitos adversos da propagação na atmosfera ou pelo ruído acústico presente a nível da superfície terrestre.

A atmosfera terrestre limita as observações astronómicas pelo facto de ser opaca a algumas bandas de comprimentos de onda e por outro, devido a não homogeneidades da massa de ar e pelo efeito da turbulência, reduzindo o poder de resolução angular do instrumento. Por esta razão os telescópios mais modernos têm sido instalados no topo de montanhas, a grandes altitudes, de modo a reduzir o efeito da atmosfera nas observações astronómicas.

O ruído acústico representa de facto ruído ou perturbações mecânicas na estrutura do telescópio, induzindo vibrações e deslocamentos entre componentes do instrumento e degradando a qualidade da medição efectuada. Este efeito é especialmente grave em instrumentos funcionando em comprimentos de onda mais pequenos (na banda do visível) e em interferómetros. Este ruído pode ter origem sísmica ou ser devido à propagação de vibrações na estrutura em frequências baixas, inferiores a algumas dezenas de kHz.



Figura 1: ESO-Very Large Telescope no Paranal, Chile. a) Sistema de 4 telescópios do VLT. b) Espelho primário monolítico de 8 metros que equipa cada telescópio.



Figura 2: ESO- European Extremely Large Telescope em Armazones, Chile. a) E-ELT - maquete b) Espelho primário composto por 798 segmentos de 1.4 metros, perfazendo uma superfície de cerca de 40 m de diâmetro.

Parece ser óbvio que a solução para estes problemas poderá passar pela implementação destes instrumentos no espaço. Como seria de esperar, o custo e as dificuldades associadas à construção de estruturas de grandes dimensões no espaço vêm limitar grandemente o desenvolvimento deste propósito

No entanto, e de modo análogo ao que se faz com alguns instrumentos específicos em terra, é possível utilizar a técnica de abertura sintética para, de algum modo, conseguir atingir uma eficácia semelhante à de um instrumento de grandes dimensões. Recorre-se aqui à utilização de estruturas menores, distribuídas numa superfície, de modo conhecido e correlacionados entre si, simulando o comportamento de um instrumento único.

Estes sistemas, também designados por sistemas distribuídos, podem ser utilizados no espaço, com a vantagem de reduzir enormemente os custos e as dificuldades associadas à construção de um grande instrumento na órbita terrestre.

A formação em voo é uma técnica operacional em que satélites separados operam como uma única entidade, segundo a filosofia dos sistemas distribuídos, potenciando novas missões que seriam impossíveis de realizar com uma única estrutura.

A Agência Espacial Europeia (ESA) tem tido como plano a longo termo a realização de uma série de missões de formação em voo, com o objectivo de realizar uma serie de operações associadas à procura e análise de exo-planetas em orbita de estrelas próximas (Darwin), procura de buracos negros gigantes (Xeus) e outras missões que requerem a formação em voo com elevado rigor, como a do telescópio de raios X planeado para a missão Symbol-X. É absolutamente crucial para o sucesso destas missões a capacidade das constelações de satélite poderem produzir um alinhamento e posicionamento relativo de modo autónomo e síncrono, com capacidade de medir distâncias inter-satélite com exactidões da ordem do micrómetro para várias centenas de metros de separação.

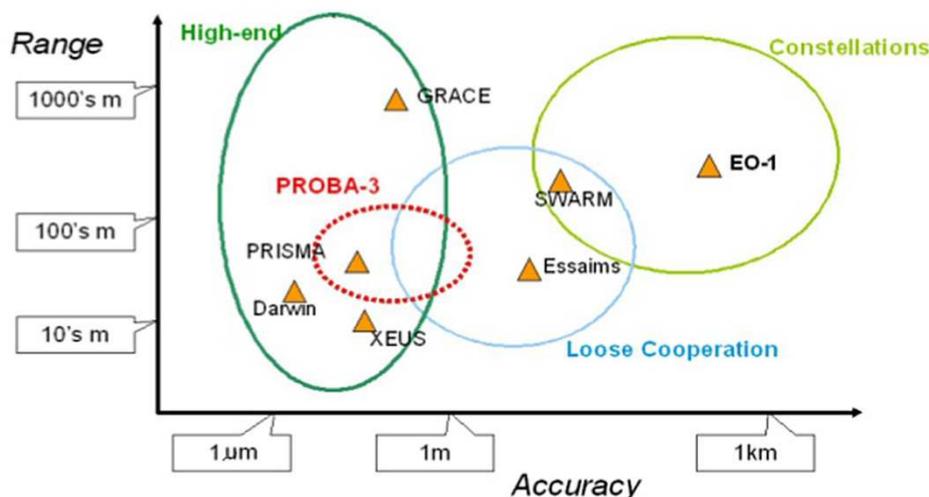


Figura 3: Requisitos para a medida de distância nas várias missões de voo em formação.

Das missões referidas na figura anterior, apenas a missão PRISMA foi entretanto lançada e a PROBA-3 se encontra na fase final de desenvolvimento, estando as restantes adiadas por motivos operacionais. Estas duas missões têm no entanto o propósito específico de testar técnicas de metrologia e controlo de modo a assegurar as premissas da formação em voo, obedecendo a requisitos específicos em termos de controlo de distância e de atitude de voo (orientação angular) entre as duas naves que constituem a missão.

Em termos de planeamento das grandes agências espaciais, existe um conjunto de missões em estudo baseadas no conceito dos sistemas distribuídos e de satélites em formação, que tem diferentes requisitos cada vez mais elevados em termos do posicionamento relativo entre os vários elementos que compõem o sistema.

A tabela seguinte refere algumas das missões planeadas, indicando os principais requisitos em termos do sistema metrológico e do número de naves envolvidas.

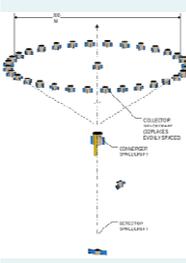
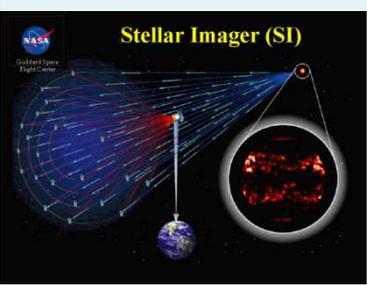
	2012 (+)	2019	2022	2024	2028
<b>Ciência</b>	Magnetosfera	Detecção e identificação de planetas	Imagem em Buracos Negros	Astro-sismologia	Imagem de planetas
	Formação distribuída (MMS)	Posicionamento relativo na ordem do sub-micrometro com posicionamento de 5 satélites (TPI)	Navegação relativa com exatidão na ordem do micrometro para 25 satélites (MAXIM)	Navegação relativa com exatidão na ordem do nanometro para 30 satélites (Stellar Imager)	Navegação relativa com exatidão inferior ao nanometro para +30 satélites (Planet Imager)
					

Tabela 1: Missões de voo em formação planeadas para o futuro próximo (Ref. 1).

Um caso limite não referenciado acima é o sistema NGO – New Gravitational Wave Observatory, em desenvolvimento na ESA. Este instrumento é um interferómetro constituído por três satélites em

formação, numa geometria triangular, em que os satélites distam entre si cerca de **5 milhões de quilómetros!**

Falaremos um pouco mais à frente do enorme desafio que representa esta missão em termos metrológicos.

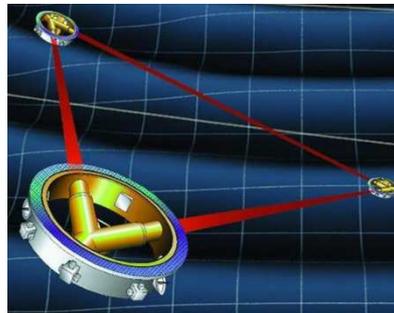


Figura 4: Sistema NGO – LISA.

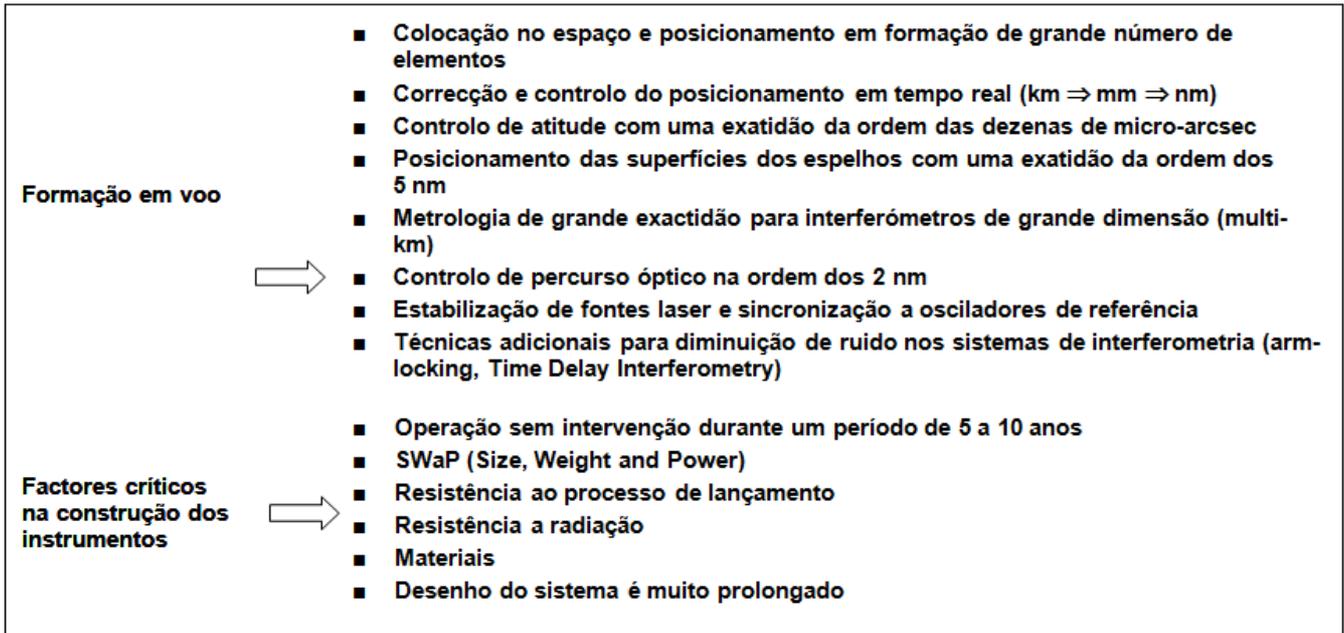
## TENDÊNCIAS ...

No contexto do desenvolvimento de sistemas distribuídos para o espaço, poderia ser definido de um modo muito geral um conjunto de tecnologias críticas que deverão ser a base da operacionalização destes instrumentos:

<b>Maior sensibilidade para objectos longínquos</b>	⇒	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Maiores áreas de captação de luz</li> <li>■ “deployable optics”</li> </ul>
<b>Aumento da resolução angular</b>	⇒	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Maiores áreas de captação de luz</li> <li>■ Formação em voo</li> </ul>
<b>Maior gama dinâmica em sistemas de imagem</b>	⇒	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Melhor controlo das superfícies ópticas</li> <li>■ Óptica Adaptativa</li> <li>■ Óptica multi-abertura</li> </ul>

Qualquer uma das linhas de desenvolvimento requerem sistemas de metrologia cada vez mais sofisticados, quer para os processos de validação das técnicas, quer em termos operacionais dos futuros sistemas instalados nas naves.

Alguns dos requisitos tecnológicos a obedecer para o sucesso do desenvolvimento destas linhas de acção são mostrados no seguinte quadro.



E o mais desafiante dos requisitos tecnológicos para as missões de sistemas distribuídos:

→ **Como se testa e valida um sistema destes no solo, antes do seu lançamento?**

**Sem dúvida que toda a infraestrutura metrológica deverá ser capaz de assegurar a validação dos princípios de funcionamento e os requisitos em termos das incertezas de medição, posicionamento e controlo de modo a que o sistema funcione como previsto quando colocado no espaço.**

## **SISTEMAS DE DETECÇÃO DE ONDAS GRAVITACIONAIS**

Há presentemente um outro caso de ciência que está em estudo na ESA e na NASA, que é paradigmático quanto aos requisitos exigidos para os sistemas de formação em voo: a detecção de ondas gravitacionais.

As ondas gravitacionais, uma das previsões mais exóticas da teoria da relatividade geral de Einstein, podem vir a ser comprovadas durante os próximos 5 anos. As ondas gravitacionais são basicamente “rugas” na curvatura espaço-tempo e devidas a massas em aceleração, nomeadamente de corpos celestes de grandes dimensões.

Prevê-se que estas ondas se apresentem num espaço de frequências alargado, desde  $10^{-17}$  Hz (para a radiação cósmica de fundo) até  $10^3$  Hz (devidas a formação de estrelas de neutrões).

De onde vem este interesse na descoberta das ondas gravitacionais?

- Comprovação das previsões da relatividade geral
- Permitirá obter informação muito importante sobre processos astrofísicos.
- Permitirá recuar no limite do universo visível e observar mais próximos da gênese do universo
- +++

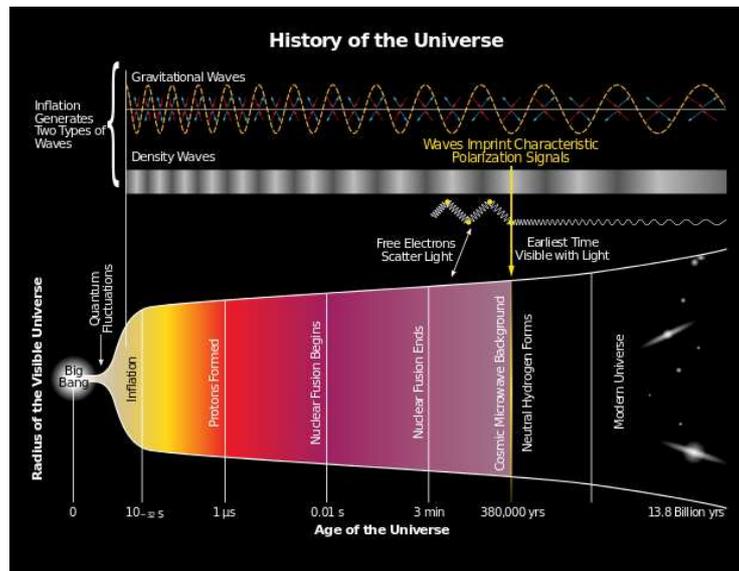


Figura 5: História do Universo e a gênese das ondas gravitacionais.

O efeito das ondas gravitacionais entre duas massas na terra ou no espaço resulta na alteração da sua separação  $L$ . A amplitude das ondas gravitacionais produz um deslocamento relativo<sup>1</sup> definido por  $h$ :

$$h = 2\Delta L / L$$

O problema na detecção destas ondas é que se prevê que  $h$  tenha um valor na ordem dos  $10^{-21}$  ou menor, mesmo para os mais violentos eventos astrofísicos de que há conhecimento. Os modelos teóricos correntes preveem ainda que seja apenas possível detectar 2 ou 3 acontecimentos desta ordem de grandeza por ano e que se manifestam apenas durante alguns milissegundos.

<sup>1</sup> A quantidade  $h$  é definida em língua inglesa como *strain*, (distorção,tensão), traduzida aqui de um modo mais livre, baseado na respectiva formulação, por deslocamento relativo.

Esta escala de tempo implica uma largura de banda de cerca de 1 kHz, uma sensibilidade da ordem dos  $10^{-22}$ , o que leva a ter um detector com um nível de ruído com uma densidade espectral linear inferior a  $10^{-23}/\sqrt{\text{Hz}}$

### Detectores de ondas gravitacionais

As opções presentes passam pela utilização de barras de Al ressonantes ou por Interferómetros de grandes dimensões. Os sistemas interferométricos apresentam no entanto melhores sensibilidades para uma gama de frequências mais elevada. Utilizam massas de prova, suspensas de modo a isolar ruído sísmico. As figuras seguintes mostram os dois tipos de detectores de ondas gravitacionais actualmente em operação.

### Cilindro de Weber (1966)

Sistemas actuais (Auriga, It,) são constituídos por um cilindro de Al, com cerca de 3000 kg, arrefecido a 0,1 K. Têm uma frequência de ressonância de 900 Hz, com uma sensibilidade de  $3 \times 10^{-19}$ .

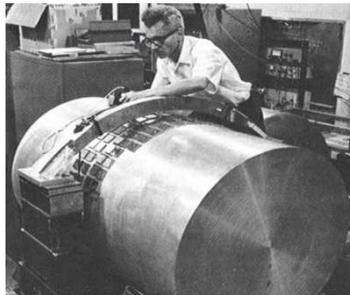


Figura 6: O detector de ondas gravitacionais de Weber.

Joe Weber (1919-2000), um dos pioneiros na detecção de ondas gravitacionais. A fotografia ilustra Weber trabalhando no detector formado por um cilindro metálico isolado do ruído terrestre. A passagem de uma onda gravitacional tenderá a alterar os modos de ressonância do cilindro, possibilitando a sua medida através de instrumentos de electrónicos de alta sensibilidade (Ref. 2)

### Interferómetro de Michelson

Existem vários sistemas montados em terra, com dimensões até aos 4 km, que podem atingir sensibilidades de  $10^{-21}$  para frequências superiores a 10 Hz (Ligo, US).

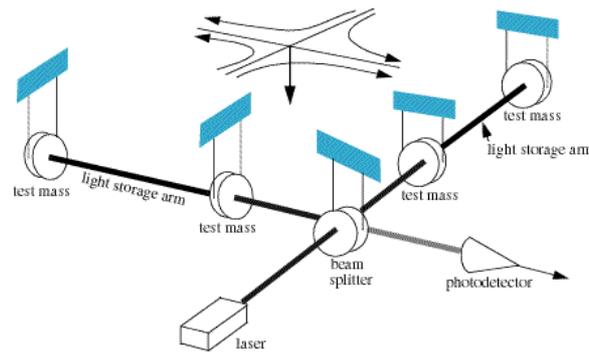


Figura 7: O interferômetro de Michelson para detecção de ondas gravitacionais.

Esquema do interferômetro do LIGO. Quando as ondas passam pelo interferômetro provocam alterações na distância entre as massas de prova. Essas alterações são da ordem do  $10^{-18}$  metro e produzem alterações nas condições de interferência do feixe que luz que percorre os dois braços do interferômetro, permitindo a sua detecção. (Ref. 3)

### Resposta do interferômetro a OG

Quanto maior for o braço do interferômetro, maior é a sua sensibilidade, só sendo válido quando o comprimento de onda da onda gravitacional (OG) for menor do que  $\frac{1}{4}$  do comprimento do interferômetro. No entanto, para uma OG de frequência 100 Hz, o comprimento ótimo do braço do interferômetro é 750 km!

A diferença de fase entre os braços do interferômetro, para o comprimento ideal é de:

$$I_{pd} = \frac{I_{in}}{2} \left( 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} 4\Delta L\right) \right)$$

Em que  $\Delta L \propto hL$

Como é óbvio, não será praticável construir interferômetros em terra com braços da ordem da centena de quilômetros. As alternativas para conseguir o comprimento ideal passam por ter cavidades tipo Fabry Perot em cada braço, simulando grandes distâncias através de múltiplas reflexões nos braços do interferômetro.

É com base neste princípio que foram construídos nas últimas duas décadas vários sistemas de detecção de OG.

A figura seguinte ilustra alguns dos grandes instrumentos para detecção de ondas gravitacionais instalados em diversas localizações no nosso planeta.

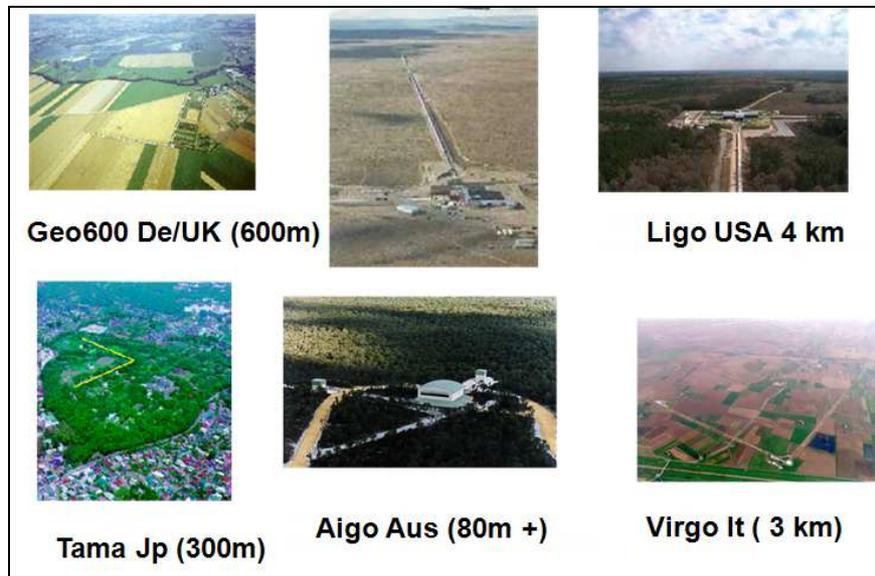


Figura 8: Sistemas interferométricos para detecção de ondas gravitacionais instalados nos vários países.

Como exemplo, de modo a ilustrar o nível de ruído presente no sistema e a sensibilidade requerida para a detecção das ondas gravitacionais, o gráfico da figura seguinte mostra as várias componentes de ruído e a resultante densidade espectral, para a banda de frequência de trabalho do sistema LIGO.

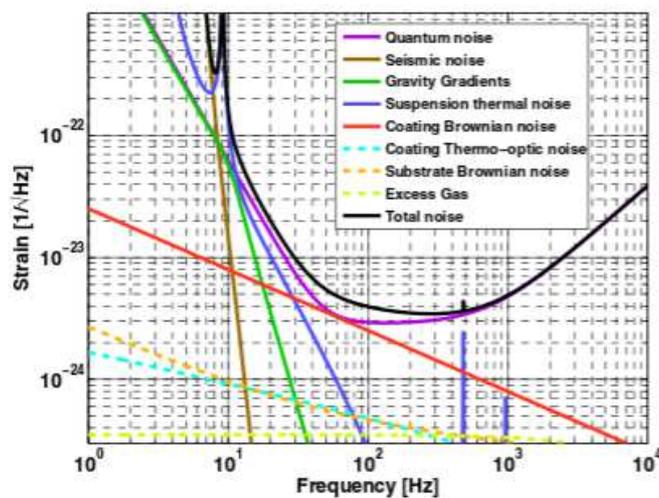


Figura 9: Sensibilidade do sistema LIGO e as várias fontes de ruído intervenientes no sistema (Ref. 4).

É ainda interessante avaliar quais os tipos de acontecimentos astronómicos podem dar origem a ondas gravitacionais e quais as frequências e sensibilidade requerida para a respectiva detecção. Este conjunto de factores determina a arquitectura e tipo de detector de ondas gravitacionais e, tendo em conta o comprimento de onda respectivo, a sua viabilidade de implementação na terra ou no espaço. Lembra-se aqui que os critérios de optimização do interferómetro para detecção das ondas gravitacionais requerem que o comprimento dos braços do instrumento seja da ordem de  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda.

A figura seguinte mostra precisamente como varia o deslocamento relativo – *strain* - com a frequência das ondas gravitacionais geradas, para os vários tipos de entidades astronómicas.

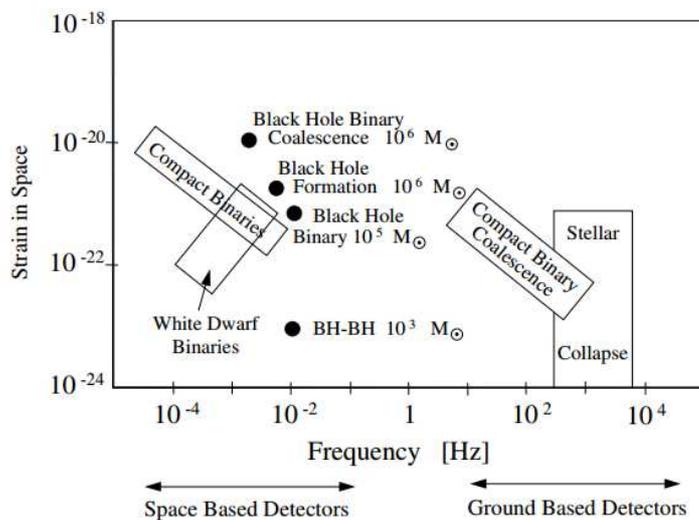


Figura 10: Sensibilidade requerida para os vários tipos de fontes de ondas gravitacionais (Ref. 5).

## CONCEITO DO NGO-LISA

O sistema NGO-Lisa é um instrumento de detecção de ondas gravitacionais dedicado à detecção de estruturas com massas mais elevadas e que provocam perturbações com frequências inferiores ao Hertz, requerendo sensibilidades da ordem dos  $10^{-22} 1/\sqrt{\text{Hz}}$ . Para estas frequências é necessário que o sistema otimizado tenha comprimentos do braço do interferómetro da ordem de  $5 \times 10^6$  km. O sistema será formado por um conjunto de 3 satélites em formação que realizam uma órbita heliocêntrica, tal como é mostrado na figura seguinte.

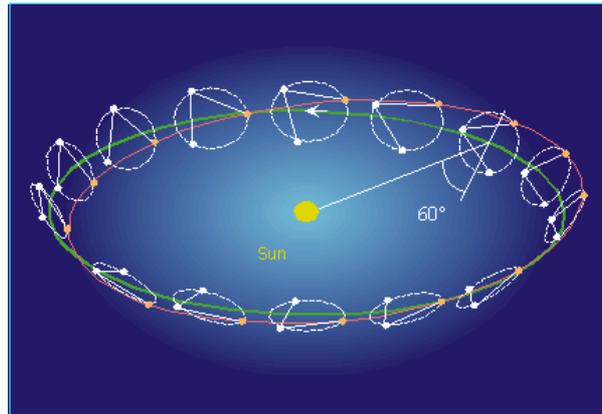


Figura 11: O Conceito no NGO- Lisa.

Para sistemas com esta dimensão, a potência do laser que chega ao satélite que forma cada um dos braços do interferômetro é diminuta, pelo que não é possível constituir um sistema interferométrico convencional, com espelhos. Deste modo, é utilizado um sistema de retransmissão, em que é utilizado um outro laser que é re-emitido de volta, sincronizado em fase com o feixe que é recebido. Tal obriga a requisitos excepcionais de ruído de fase, de modo a garantir a coerência entre o feixe que é recebido e o que é re-emitido.

Existem outras implicações associadas às dimensões gigantescas deste sistema: o facto de a luz demorar cerca de 16 segundos no percurso entre satélites e a distância dos braços do interferômetro entre os 3 satélites não ser igual (nem estável no tempo), obriga ainda que o processo interferométrico se faça de modo electrónico, em pós-processamento, recorrendo a técnicas específicas designadas de “arm locking” e de “time delayed inteferometry”.

O quadro seguinte mostra resumidamente as principais características do sistema NGO-LISA (Ref. 6).

<b>Características base do NGO-LISA</b>	⇒	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Distância entre satélites: 5 000 000 km</li> <li>■ Gama de frequências: 1 mHz a 0.1 Hz</li> <li>■ Fontes: sistemas de anãs brancas, coalescência de buracos negros</li> <li>■ Configuração óptica: retransmissor de luz</li> </ul>
<b>Tecnologias críticas</b>	⇒	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Interferometria de alta exactidão: 10 pm / <math>\sqrt{\text{Hz}}</math> @ <math>5 \times 10^6</math> km</li> <li>■ Massas de prova “drag free”</li> </ul>

Para efeitos comparativos, a ilustração seguinte mostra as sensibilidades requeridas para o sistema LIGO (terra) e o sistema LISA (espaço), operando em bandas de frequências distintas e portanto com fontes de ondas gravitacionais diferentes.

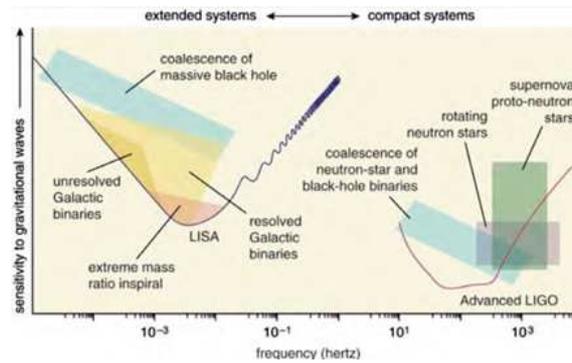


Figura 12: Sensibilidade do sistema Ligo e do sistema NGO-LISA (Ref. 7).

A título de exemplo, evidenciando os requisitos críticos que devem ser obedecidos em todo o processo metrológico, são de seguida descritas algumas das especificações em termos da estabilidade em frequência do laser utilizado neste instrumento:

<p><b>Alocação inicial de ruído para o laser:</b> 2 pm Hz<sup>-1/2</sup></p>	<p>⇒</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Convertido para ruído de fase:</b> <math>\partial\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \partial L = 1.2 \times 10^{-5} \frac{\text{rad}}{\sqrt{\text{Hz}}}</math></li> <li>■ <b>Convertido para ruído em frequência:</b> <math>\partial\nu = \frac{\partial L}{\Delta L} \nu = 1.1 \times 10^{-5} \frac{\text{Hz}}{\sqrt{\text{Hz}}}</math></li> <li>■ <b>Ruído laser em free running:</b> <math>\frac{10\text{kHz}}{f} \frac{\text{Hz}}{\sqrt{\text{Hz}}}</math></li> </ul>
<p><b>Como se reduz o ruído em frequência em mais de 12 ordens de magnitude?</b></p>	<p>⇒</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <b>Estabilização e bloqueamento a fonte de referência (USO, Fabry Perot, Linha molecular ...)</b></li> <li>■ <b>Arm Locking</b> - o comprimento dos braços são mais estáveis do que as fontes de referência para a banda de funcionamento do LISA <math>\frac{\partial L}{L} \approx 10^{-21} \frac{1}{\sqrt{\text{Hz}}}</math></li> <li>■ <b>Time delay interferometry</b> - para compensar diferenças entre os braços do interferómetro</li> </ul>

Só em termos de nota final, de referir que Portugal está envolvido também no projecto NGO-LISA, através de um consórcio liderado por uma empresa portuguesa, a Lusospace, que tem como responsabilidade o desenvolvimento e produção do modelo de engenharia de um dos componentes dos satélites da formação NGO-LISA.

Esse componente é a *Laser Head*, correspondendo ao sistema laser que emite o feixe utilizado no interferómetro. Este subsistema deve obedecer aos requisitos estritos de estabilidade em frequência e potência, de modo a poder vir a validar o conceito e a solução de engenharia em ambientes de operação próximos daqueles que vão ser encontrados quando o instrumento for lançado. A Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (UL), através do grupo de Instrumentação do Centro de

Astronomia e Astrofísica da UL, participa também neste consórcio, nas tarefas associadas à modelação e simulação do sistema de controlo de todos os componentes ópticos activos que são responsáveis pela estabilização do laser utilizado nesta missão.

## CONCLUSÕES

O conceito de sistemas distribuídos e das grandes estruturas em astronomia, nomeadamente nos sistemas para o espaço, vêm trazer enorme complexidade para os sistemas metrológicos.

Dada a natureza destes sistemas, será necessário desenvolver novas tecnologias e métodos de medida que permitam simular e medir com a exactidão requerida os sistemas em terra.

Os níveis de ruído e de incerteza requerida para os sistemas metrológicos no espaço são, pela natureza dos observáveis, muito para além do que tem sido possível obter noutras situações.

## Referências

Ref.1: Technology Development for Future Sparse Aperture Telescopes and Interferometers in Space.

White Paper submitted to the US Decadal Survey (<http://exoplanet.eu/bibliography/reports/?page=2&>)

Ref.2: [http://www.personal.soton.ac.uk/dij/GR-Explorer/Grav\\_Waves/GW-detection.html](http://www.personal.soton.ac.uk/dij/GR-Explorer/Grav_Waves/GW-detection.html)

Ref.3: [http://www.ligo.caltech.edu/LIGO\\_web/about/factsheet.html](http://www.ligo.caltech.edu/LIGO_web/about/factsheet.html)

Ref.4: S. Hild, Beyond the second generation of laser-interferometric gravitational wave observatories, Class. Quantum Grav. 29 124006 doi:10.1088/0264-9381/29/12/124006

Ref.5: : Matthew Pitkin *et al*, Gravitational Wave Detection by Interferometry(Ground and Space).Living Rev. Relativity, 14, (2011), 5 (<http://www.livingreviews.org/lrr-2011-5>)

Ref.6: Laser Interferometer Space Antenna: A Cornerstone Mission for the observation of gravitational waves. System and Technology Study Report ESA-SCI(2000)11, July 2000

Ref.7: LISA Science Case LISA-LIST-RP-436 Version 1.0 (<http://sci.esa.int/lisa/41272-lisa-probing-the-universe-with-gravitational-waves/#>).

**Manuel Adler Abreu** ([maabreu@fc.ul.pt](mailto:maabreu@fc.ul.pt)) é licenciado em Engenharia Física pela Universidade Nova de Lisboa (1989) e é doutorado em Engenharia Física pela Universidade Técnica de Lisboa - IST (1996). Trabalhou no INETI (Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação) desde 1987, como estagiário de investigação e posteriormente como investigador convidado, em áreas como a óptica, optoelectrónica, metrologia óptica e lasers. É actualmente Investigador Convidado e Docente no Departamento de Física – Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas, e do Centro de Astronomia e Astrofísica da Universidade de Lisboa. Tem tido como principal actividade as áreas de I&D associadas a instrumentação e sensores de base óptica/optoelectrónica para sistemas de metrologia, radar e laser, em aplicações sob contracto no âmbito da ESA (European Space Agency), ESO (European Southern Observatory), EDA (European Defence Agency ) e da Indústria Nacional. A sua principal área de actividade está relacionada com o desenvolvimento de sistema de sensores e de instrumentação aplicada a metrologia, com base em tecnologia óptica e lasers.



## SISTEMA INTERFEROMÉTRICO MULTICANAL PARA CALIBRAÇÃO DE ACELERÓMETROS PADRÃO

Catarina Silva<sup>1</sup>, Alexandre Cabral<sup>1,2</sup>, Manuel A. Abreu<sup>1,2</sup>, José Manuel Rebordão<sup>1,2</sup>, David Alves<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

<sup>2</sup>Centro de Astronomia e Astrofísica (CAAUL), Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa,

### RESUMO

A calibração de acelerómetros padrão, por interferometria óptica, tem por base o movimento oscilatório (sinusoidal) proveniente de um *shaker* eletrodinâmico. Contudo, o movimento gerado pelo *shaker*, não sendo idealmente uniaxial origina o efeito de balanço e, conseqüentemente, introduz um erro que pode ser significativo dependendo da localização do ponto de medição. Com vista a ultrapassar esta limitação, foi implementado um sistema interferométrico multicanal para calibração primária de acelerómetros. O sistema baseia-se num interferómetro de Michelson heteródino, que efetua o processamento de quatro canais em paralelo, permitindo a medição simultânea da aceleração em diferentes pontos de superfície. Deste modo obtém-se o valor médio do deslocamento (e, conseqüentemente, da aceleração) o ângulo do vetor de deslocamento que caracteriza o efeito de balanço. O sistema demonstrou ter uma exatidão ao nível dos décimos de nanómetro em deslocamento e sub arco segundo para a componente angular normal à superfície.

### 1. Introdução

Nos últimos anos, a interferometria laser heterodina tem demonstrado ser uma técnica valiosa na medição de deslocamentos com elevado grau de exatidão, em particular na calibração primária de acelerómetros [1]. Acelerómetros são transdutores normalmente utilizados para captar vibrações mecânicas. Existem vários tipos de acelerómetros e, devido à sua versatilidade, possuem uma ampla variedade de aplicações em áreas tão distintas como a Saúde e a Indústria. O procedimento para a calibração de transdutores de vibração está descrito na norma ISO 16063 (Methods for the calibration of vibration and shock transducers) [2]. O constante avanço tecnológico dos equipamentos usados nesse tipo de calibração, tem possibilitado a diminuição da influência de algumas incertezas envolvidas no processo. O conhecimento das componentes de incerteza, e a sua correta caracterização, é essencial para o processo de calibração deste tipo de equipamentos.

Tipicamente, a calibração primária de acelerómetros por interferometria, utiliza um movimento oscilatório gerado por um *shaker* electrodinâmico. Esta técnica de calibração baseia-se na medição da amplitude do deslocamento, considerando um movimento sinusoidal uniaxial (ao longo do eixo de oscilação) a uma dada frequência. Na realidade, o movimento gerado pelo sistema de excitação contém também componentes perpendiculares ao eixo do movimento, introduzindo assim um efeito de balanço

(em inglês "rocking motion") [3]. O efeito de balanço do movimento é um aspeto crítico quando se pretende efetuar medidas de elevada exatidão. Este efeito aumenta com a frequência e, acima de um determinado valor, a sua influência no resultado final pode tornar-se significativa.

Para caracterizar este efeito, e assim reduzir a sua influência no resultado final, implementou-se um sistema multicanal capaz de medir simultaneamente o deslocamento em quatro pontos, possibilitando também a medição da variação angular da normal à superfície. A configuração apresentada reduz a complexidade devido ao uso simultâneo de unidades comuns (fonte laser, moduladores acusto-ópticos e algumas ópticas) mantendo a elevada resolução associada à interferometria com deteção heteródina.

## 2. Calibração de acelerómetros por interferometria óptica

A calibração absoluta de acelerómetros padrão, com base em interferometria laser, consiste no cálculo da aceleração a partir da medição do deslocamento, considerando um movimento alternativo com amplitude sinusoidal. Na determinação de deslocamentos por interferometria, duas configurações comuns podem ser utilizadas, os interferómetros homódinos e heteródinos. A determinação da amplitude do deslocamento, por deteção homodina, baseia-se na contagem de máximos de intensidade ao longo do tempo. Uma vez que o valor da amplitude do deslocamento varia inversamente com o quadrado da frequência de excitação [1], para valores superiores a 1 kHz, dependendo da aceleração, a amplitude do deslocamento pode ser inferior ao comprimento de onda do laser do interferómetro (tipicamente  $\lambda = 632,8$  nm). Desta forma, a utilização de deteção homodina não é viável para frequências elevadas. Consequentemente, para frequências superiores a 1 kHz, um sistema heteródino é uma das soluções mais adequadas, permitindo a medição de amplitudes até o nível do nanómetro [1-3].

Num sistema heteródino, o deslocamento é obtido a partir da variação de fase resultante da diferença de percurso óptico (DPO) entre o feixe de medição e o feixe de referência do interferómetro. A interferência entre os dois sinais (de referência e de medição) produz um sinal sinusoidal com uma frequência de batimento – designada por frequência heteródina. A variação de fase do sinal de batimento é proporcional à variação da DPO resultante entre os dois feixes. Conhecendo o comprimento de onda da radiação laser no vácuo,  $\lambda$ , é possível obter a variação do deslocamento,  $d$ , através da equação (1):

$$d = \frac{1}{2} \times \frac{\lambda}{n} \times \frac{\phi}{2\pi} \quad (1)$$

sendo  $\phi$  a diferença de fase entre os dois sinais obtidos e  $n$  o índice de refração do ar.

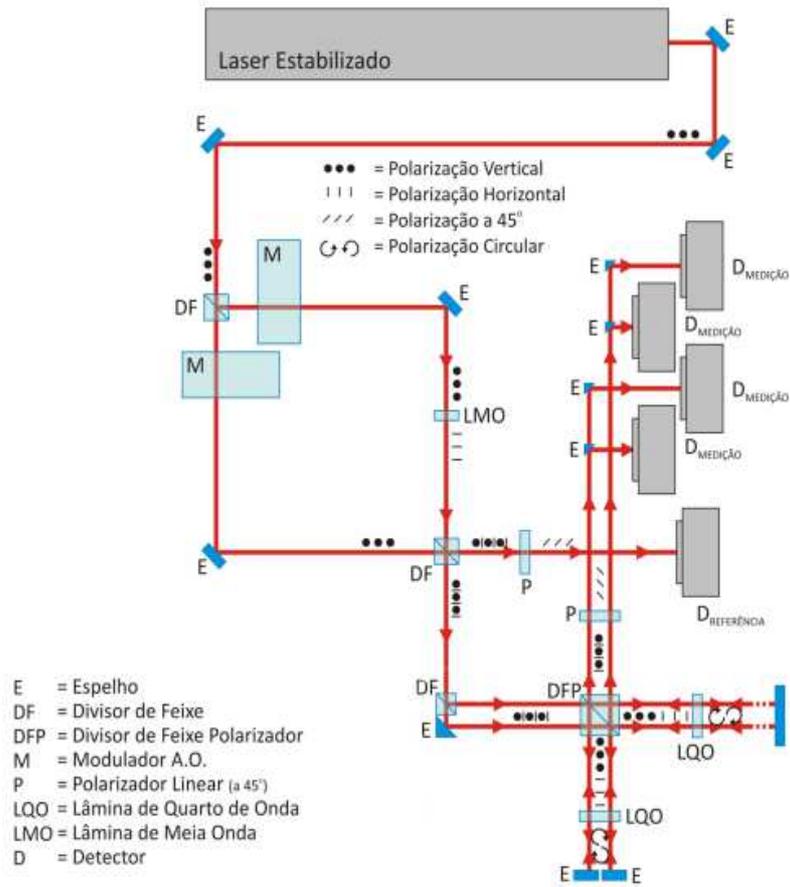
### 3. Implementação Experimental e Resultados

#### 3.1 Sistema experimental implementado

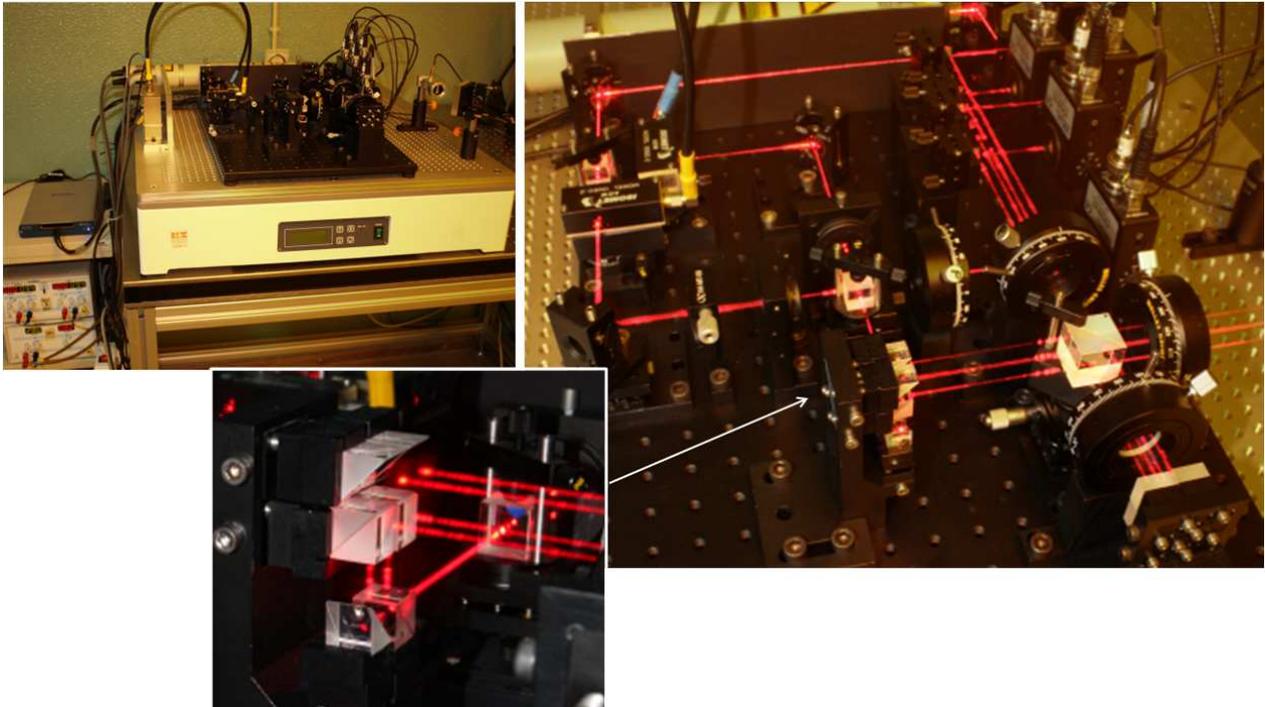
A representação esquemática e o sistema experimental implementado são apresentados na figura 1. Como fonte luminosa, foi utilizado um feixe com 1mW, proveniente de um laser de HeNe ( $\lambda = 633 \text{ nm}$  no ar,  $\nu_0 = 474 \text{ THz}$ ) polarizado e estabilizado em frequência ( $\pm 5 \text{ MHz}$  ( $10^{-8}$ ), para 30 min).

O feixe laser inicial é dividido em dois na passagem pelo divisor de feixe, DF. A diferença de frequência (óptica) é introduzida entre os dois feixes através de dois moduladores acusto-ópticos, AOM1 e AOM2 (Isomet – 1205C). Estes operam a uma frequência rádio frequência de 80 MHz e 80.1 MHz, resultando uma frequência heteródina de 100 kHz.

O feixe proveniente de cada um dos moduladores atravessa uma lâmina de meia onda (LMO), que roda a polarização de  $90^\circ$ , ficando assim com polarizações ortogonais. Um segundo divisor de feixe (DF) recombina os dois feixes, com polarizações ortogonais e valores distintos de frequência, direccionando um deles (com ambas as frequências e polarizações ortogonais) para o detector de referência (DR) e o outro para o interferómetro de *Michelson*. O feixe encaminhado para a configuração de *Michelson* é dividido em 4 de igual intensidade através de uma sequência de espelhos e divisores de feixe colocados num sistema opto-mecânico com diversos graus de liberdade (Fig. 1.b)). O alinhamento angular dos 4 feixes foi efectuado de forma interferométrica, garantindo o seu paralelismo. São utilizados 4 detectores para a agregação do sinal resultante do percurso heteródino dos 4 canais do interferómetro.



a)



b)

Figura 1 – a) Representação esquemática e b) montagem experimental do sistema óptico implementado.

O sistema é controlado através de um computador com uma placa de aquisição de 12 bit, taxa de amostragem de 2 MS/s e 5 canais. A aquisição, o tratamento e a análise de dados foram desenvolvidas em ambiente *LabView*. Os resultados aqui apresentados foram obtidos através da utilização de um sistema piezoelétrico (S-316-PI), com três actuadores associados a um controlador de posicionamento (modelo: E-509.E3-PI) e a um amplificador (modelo: E-503.00-PI).

### 3.2 Resultados experimentais

Por forma a caracterizar a performance e demonstrar a sensibilidade do sistema óptico implementado, este foi sujeito a vibrações provenientes de diferentes fontes de ruído. Nesta secção são apresentados alguns dos resultados obtidos. Na figura 2, é visível a presença de uma vibração devida ao funcionamento do equipamento de climatização. A vibração proveniente do funcionamento deste tem uma amplitude de aproximadamente 60 nm.



Figura 2 – Resposta do sistema implementado ao funcionamento do equipamento de climatização.

De forma idêntica à apresentada anteriormente, a figura 3 apresenta a resposta do sistema a um ruído sonoro (voz) durante 100 ms. A análise do comportamento do sistema no período de 20 ms permite visualizar uma vibração com amplitude entre os 10 e 16 nm.

Em repouso, o sistema apresenta algum ruído mecânico com uma amplitude até 0,5 nm. Note-se que a influência deste ruído na exatidão poderia ser reduzida recorrendo a processamento de sinal (filtragem) e ao isolamento dos referidos equipamentos. No entanto, e para o fim a que o sistema se destina, a exatidão obtida garante já que esta componente é desprezável face a outras componentes presentes na calibração de acelerómetros.

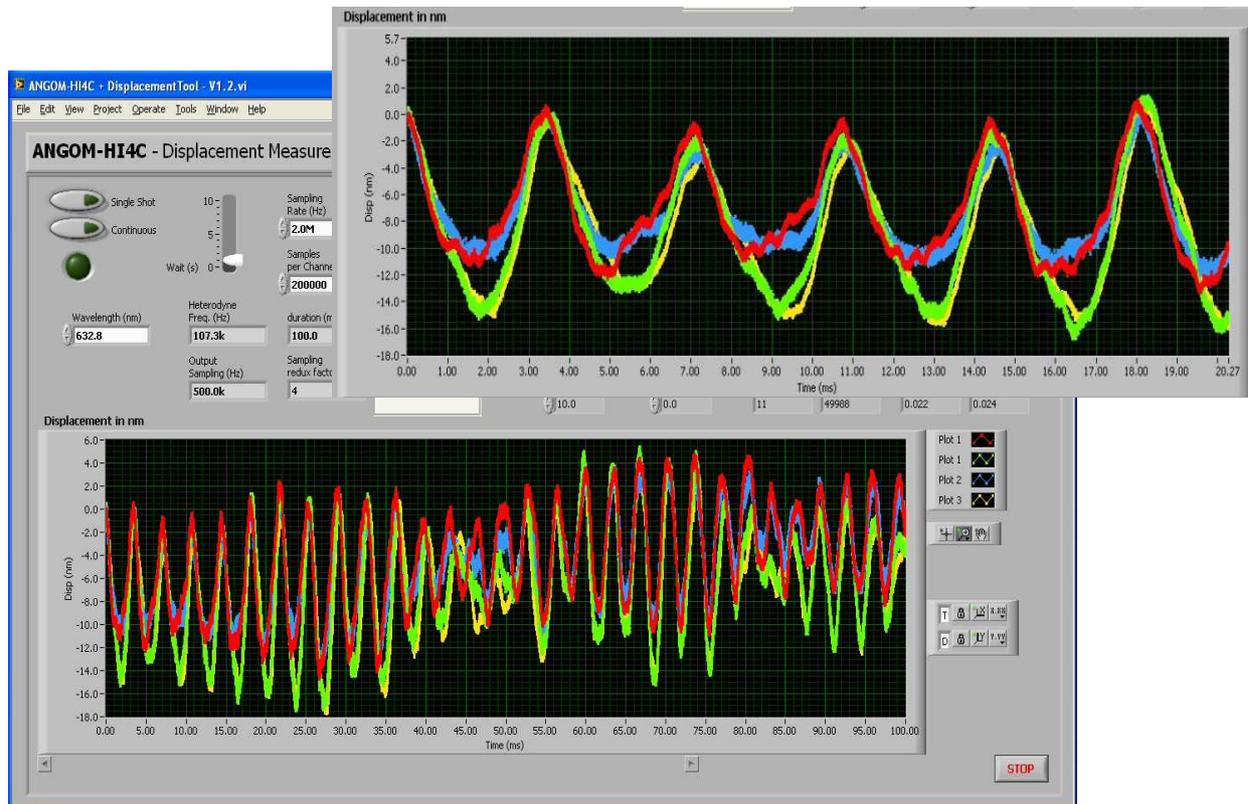


Figura 3 – Resposta do sistema implementado a um ruído sonoro.

A figura 4 apresenta a resposta do sistema a uma oscilação forçada, no qual é visível um deslocamento de  $\sim 6\mu\text{m}$  e uma variação de ângulo entre 0 e  $\sim 2$  arco-segundo para o referido deslocamento.

Os resultados obtidos demonstram que o sistema tem a capacidade de medir amplitudes com resolução inferior a décimo de nanómetro e uma incerteza de  $\pm 0.1$  nm, para uma amplitude até  $10\mu\text{m}$ , sendo essencialmente limitada pelo ruído mecânico.

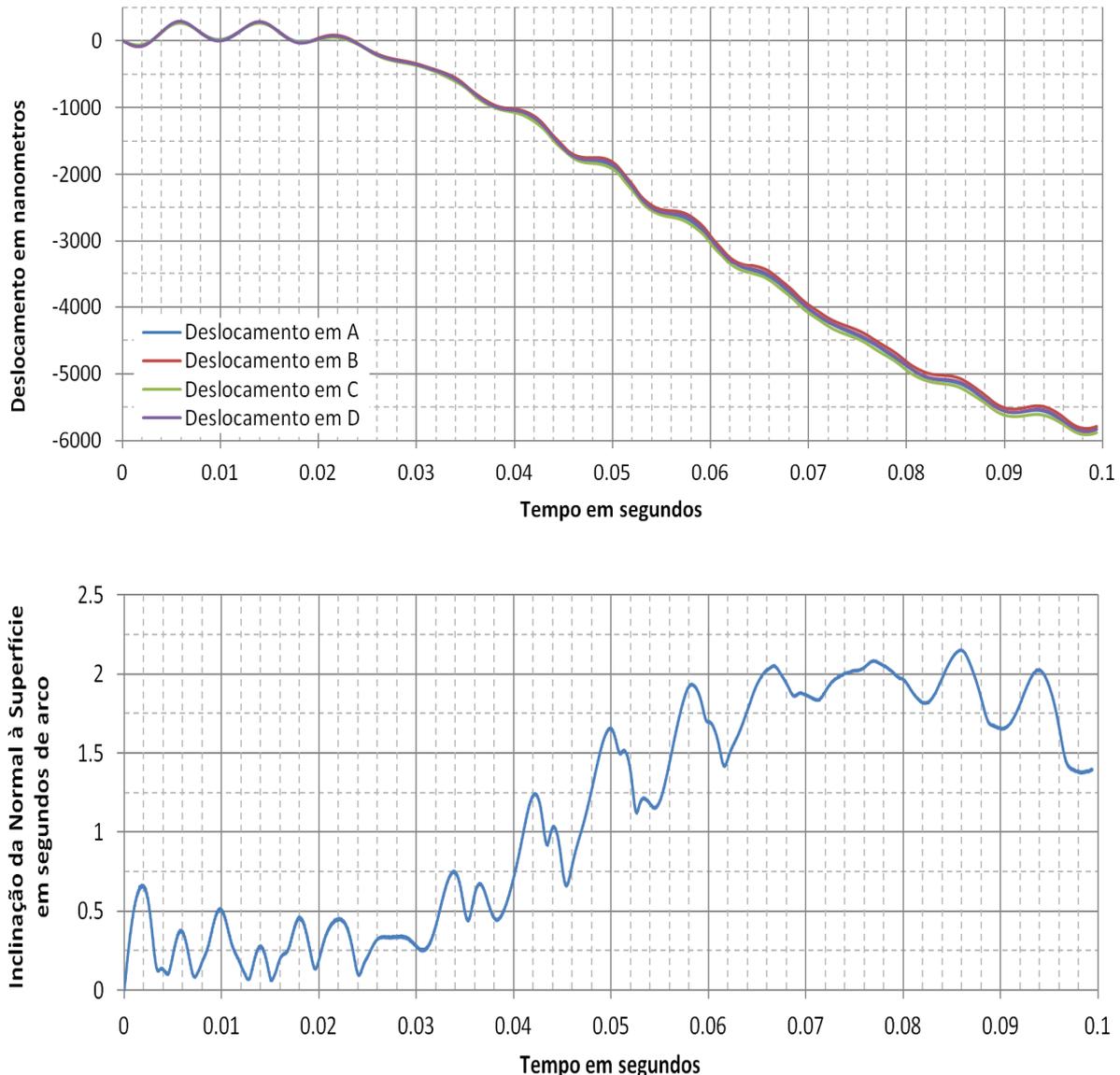


Figura 4 – Resposta do sistema a um ruído sonoro (a) deslocamento, (b) ângulo da normal à superfície.

### 3.3 Balanço de Incertezas

No cálculo das incertezas considerou-se a determinação da amplitude do deslocamento através da equação (1). As grandezas de entrada são: a determinação da fase e o comprimento de onda do laser. O erro associado às condições ambientais não ideais pode ser um fator na limitação da metrologia de elevada exactidão, pelo que a sua influência no comprimento de onda do laser utilizado foi considerada.

A componente da incerteza referente à medição da diferença de fase é de  $4.7 \times 10^{-4}$ . Esta componente não altera ao longo da distância. Note-se que, uma vez que a frequência heteródina é medida continuamente, a sua influência na medição da diferença de fase é desprezável.

A componente de incerteza do comprimento de onda da radiação laser utilizada foi definida tendo em conta a estabilidade em frequência do laser e a influência das condições ambientais (temperatura

ambiente, pressão atmosférica e humidade relativa) na variação do índice de refração do ar (a partir da equação de *Edlén*) [4]. Apesar da estabilidade do laser ser inferior a  $10^{-8}$  [5] a influência das condições ambientais aumenta esta componente de incerteza para cerca de  $1,6 \times 10^{-5}$  ( $10^{-2}$  nm). A variação desta componente aumenta com o deslocamento. No entanto, num deslocamento de  $\sim 10$   $\mu\text{m}$  o seu valor não é significativo.

A componente de incerteza associada ao deslocamento pode ser majorada tendo em vista a aplicação na calibração de acelerómetros (distâncias 10  $\mu\text{m}$ ) para um valor de  $\pm 0.2$  nm.

#### 4. Conclusões

Foi implementado um sistema metrológico para calibração primária de acelerómetros padrão através da medição simultânea do deslocamento em 4 pontos da superfície, de forma a poder caracterizar o efeito de balanço. Os resultados alcançados demonstram um elevado grau de desempenho, com uma exatidão sub-nanométrica. O próximo passo é a integração deste sensor no sistema de calibração primária de acelerómetros padrão existente no Laboratório de Aceleração e Vibrações do IPQ.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia o financiamento do Projecto PTDC/FIS/102610/2008 que permitiu desenvolver e implementar o sistema interferométrico apresentado.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Cabral, A., Rebordão, J., Oliveira, V., Godinho, I., Nunes, M., "Heterodyne Interferometry for Calibration of Standard Accelerometers in High Frequency Regime" - *in* Proceedings da 7ª Conferência Vibration Measurements by Laser Techniques", Ancona - Italia, 2006, pp. 19-22.
- [2] ISO 16063 – 11: 1999, "Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 11: Primary Vibration Calibration by Laser Interferometry".
- [3] Cabral A., Godinho M. I., Oliveira V., Rebordão, J.M. e Nunes M.C. "Primary laser vibration metrology: evaluation of the rocking motion impact in the accuracy of acceleration measurements", *in* Proceedings da Conferência SPIE 7098, Eighth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, 70980Z, 2008.
- [4] Birch, K.; Downs M.; "An Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air", *Metrologia* nº 30, páginas 155-162, 1993.
- [5] Model 117A; Stabilized Helium-Neon Laser Instructions Manual; Spectra-Physics; Test Data Sheet, Fevereiro 2005.

## SENSOR ANGULAR BASEADO NAS MULTIPLAS REFLEXÕES DE UMA CAVIDADE ÓPTICA

Catarina Silva<sup>1</sup>, Alexandre Cabral<sup>1,2</sup>, Manuel A. Abreu<sup>1,2</sup>, José Manuel Rebordão<sup>1,2</sup>, João M.P. Coelho<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

<sup>2</sup> Centro de Astronomia e Astrofísica (CAAUL), Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa,

<sup>3</sup> Instituto de Biofísica e Engenharia Biomédica, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências,

### RESUMO

Os avanços na tecnologia têm aumentado significativamente a necessidade de obter sistemas de medição de distâncias e ângulos com elevado grau de exatidão. A medição de campos angulares na ordem dos miliradiano e com exactidão na ordem do nanoradiano, sem contacto, é usualmente feita através de sistemas baseados em interferometria ou autocolimação. No entanto, estas técnicas, não permitem obter, simultaneamente, uma elevada resolução numa ampla gama de medição, mantendo a simplicidade do instrumento.

Neste trabalho, é proposta a utilização de um sensor angular baseado nas múltiplas reflexões que ocorrem numa cavidade óptica que através do processamento de sinal de um CCD bidimensional, permite obter sem grande complexidade a informação angular absoluta. Relativamente à configuração usual, o sistema proposto permite obter medições com maior exactidão e para maior gama de medição.

### 1. Introdução

A medição de campos angulares, sem contacto e com exactidão na ordem do miliradiano, é cada vez mais uma necessidade em diversas áreas da ciência e engenharia. Refira-se, como exemplo, as missões espaciais baseadas em instrumentos de satélites que trabalham de forma cooperativa, envolvendo a medição de deslocamentos e ângulos entre as várias naves a voar em formação. O funcionamento destas configurações requer sistemas metrológicos simples (peso, volume e consumo reduzido) com capacidade de efectuar medidas angulares com exatidão inferior a arco de segundo [1]. Várias técnicas têm sido desenvolvidas com vista a aumentar a exatidão angular e simplificar as estruturas, entre as quais, as que utilizam interferómetros [2,3], autocolimadores [4] e o fenómeno da reflexão interna total [5]. Contudo, a elevada complexidade e facto não permitirem obter em simultâneo uma elevada resolução e um largo intervalo de medição [6] são factores que dificultam a sua integração em aplicações espaciais. Em particular, nos sistemas baseados em autocolimadores a determinação do zero é unicamente mecânica, o que é também um aspeto limitativo no desenvolvimento de instrumentação para o espaço.

Neste contexto, apresentamos um sensor angular baseado nas múltiplas reflexões que ocorrem numa cavidade óptica, que em simultâneo como processamento de sinal de um CCD bidimensional, permite obter a informação angular absoluta. O desempenho “normal” de uma cavidade óptica é facilmente

degradado com o desvio angular dos espelhos que formam a cavidade, possibilitando que essa degradação possa ser utilizada para medir ou detectar desalinhamentos, ou seja o ângulo. Partindo da posição de alinhamento da configuração (paralelismo dos espelhos), o aumento do ângulo altera a sobreposição das diferentes reflexões internas e a relação de fase entre os feixes.

O estudo deste sensor envolveu diversas tarefas realizadas com o objectivo de verificar a viabilidade desde conceito de instrumento, tais como desenho opto-mecânico, construção do protótipo, alinhamento e caracterização da sensibilidade angular. Na secção 2 deste artigo, é descrito o modelo físico do sensor angular baseado nas múltiplas reflexões que ocorrem numa cavidade óptica. A secção 3, inclui a descrição do sistema óptico implementado e a apresentação dos resultados experimentais.

## 2. Sensor angular

Na figura 1a), está esquematizada a configuração simples de um sensor angular (entre o plano A e o plano B). O sistema baseia-se num feixe laser colimado (perpendicular ao plano A), que incide numa lente que tem no seu plano focal um sensor CCD bidimensional (coincidente com o plano B). A posição do foco,  $d$ , no CCD permite obter o ângulo,  $\theta$ , entre o feixe laser e o eixo óptico da lente (i.e. entre planos A e B), através da expressão,

$$\theta = \tan^{-1}(d/f) \quad (1)$$

sendo  $f$  a distância focal da lente.

Na figura 1b), é apresentado um novo conceito, baseado no sensor anteriormente descrito, que utiliza a amplificação das múltiplas reflexões que ocorrem numa cavidade óptica, e, em conjunto com o processamento de sinal de um CCD, permite obter a informação angular absoluta. Neste conceito, os planos A e B passam a ser definidos pelas superfícies dos dois espelhos que constituem a cavidade. Com o aumento da inclinação entre os espelhos obtêm-se múltiplos focos devido às múltiplas reflexões. Nesta configuração, determinação do ângulo ( $\theta$ ) é obtida geometricamente através da expressão:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{d}{f}\right) \frac{1}{2n-1} \quad (2)$$

sendo,  $f$  a distância focal da lente,  $d$  a posição do feixe no CCD e  $n$  a ordem de reflexão. Como o argumento da tangente é muito inferior a 1, a expressão (2) pode ser aproximada:

$$\theta \approx \left(\frac{d}{f}\right) \frac{1}{2n-1} \quad (3)$$

Considerando a equação (3) e através da análise das várias reflexões, é possível aumentar a resolução do sistema pelo efeito da amplificação do ângulo, sendo  $N$  o fator de amplificação, igual a  $2n-1$ . A cada reflexão o ângulo vai ser adicionado, e o valor de  $\theta$  é obtido dividindo pelo número de reflexões. A exactidão da medida é também superior, uma vez que há uma maior informação para cada ângulo e pela média dos valores obtidos para as diferentes reflexões ocorre uma redução da componente de erro aleatório da medição.

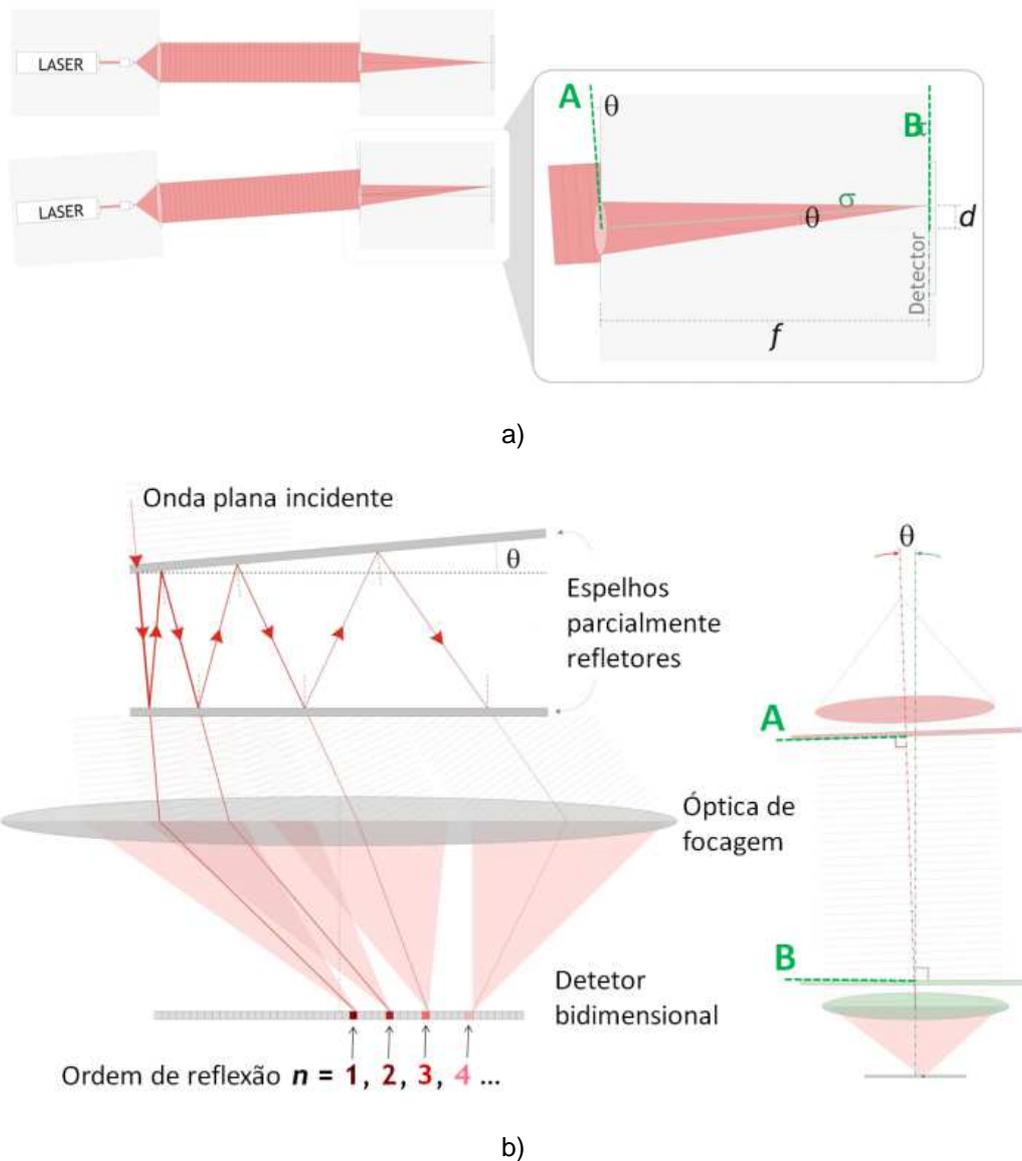


Fig. 1 – Esquema da configuração de um sensor angular a) simples e b) baseado em múltiplas reflexões numa cavidade óptica.

### 3. Implementação Experimental e Resultados

#### 3.1 Sistema experimental implementado

O sistema óptico implementado é apresentado na figura 2. Como fonte de luz, foi utilizado um Laser de díodo (comprimento de onda de 633 nm). Através de uma fibra monomodo a luz é conduzida para um colimador e, após colimação, entra numa cavidade onde é sujeita a múltiplas reflexões. A cavidade é formada por dois espelhos planos (reflectividade  $\approx 95\%$ ). Através de uma lente (distância focal de 300mm), a luz transmitida pela cavidade é focada num sensor CCD bidimensional (1440 pixel, quadrado, de dimensão  $7,4 \mu\text{m}$  de lado). O espelho M1 é colocado no centro de uma mesa de rotação motorizada permitindo que, com a rotação do mesmo, a luz se mantenha perpendicular.

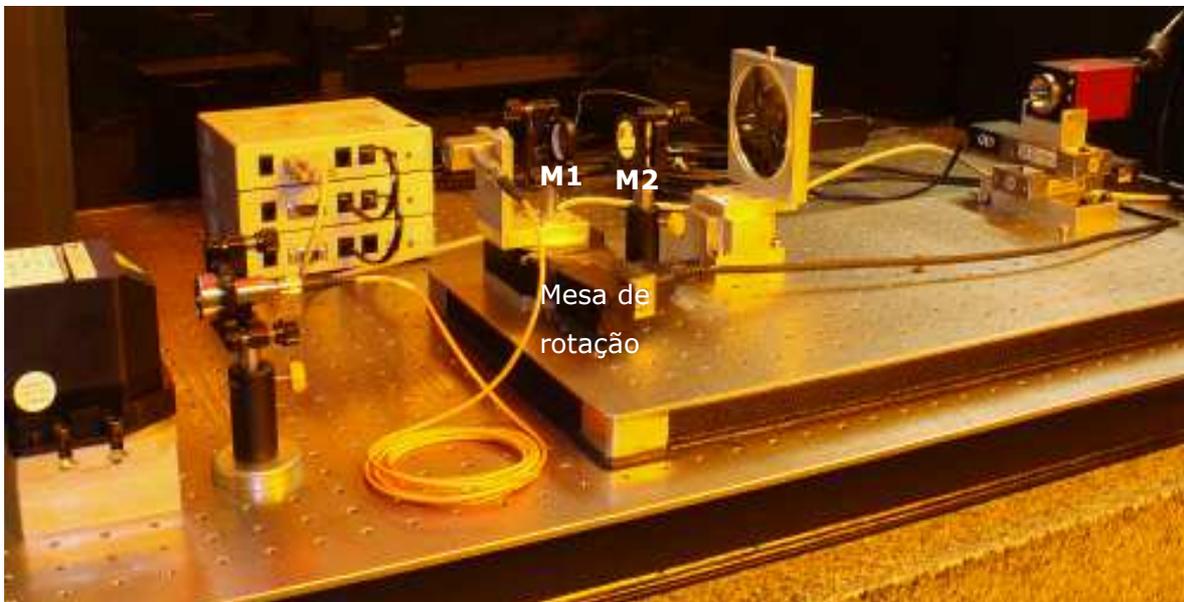


Fig. 2 – Sistema óptico implementado.

O sistema é controlado por um computador com uma placa de aquisição de dados (16 bit, taxa de amostragem 2MS/s da *National Instruments*). O processamento de sinal foi feito por uma aplicação desenvolvida em ambiente *Labview*, cuja interface é apresentada na figura 3. A aplicação permite controlar o ganho e o *shutter*, possibilitando que as imagens adquiridas sejam facilmente analisadas em *Mathcad*. Através de uma aplicação desenvolvida em *Mathcad*, é encontrada a posição do pixel com máxima intensidade em todas as reflexões (determinação do centroide) e posteriormente é determinada a diferença de posição entre esses máximos. A determinação do ângulo é feita recorrendo à expressão (3).

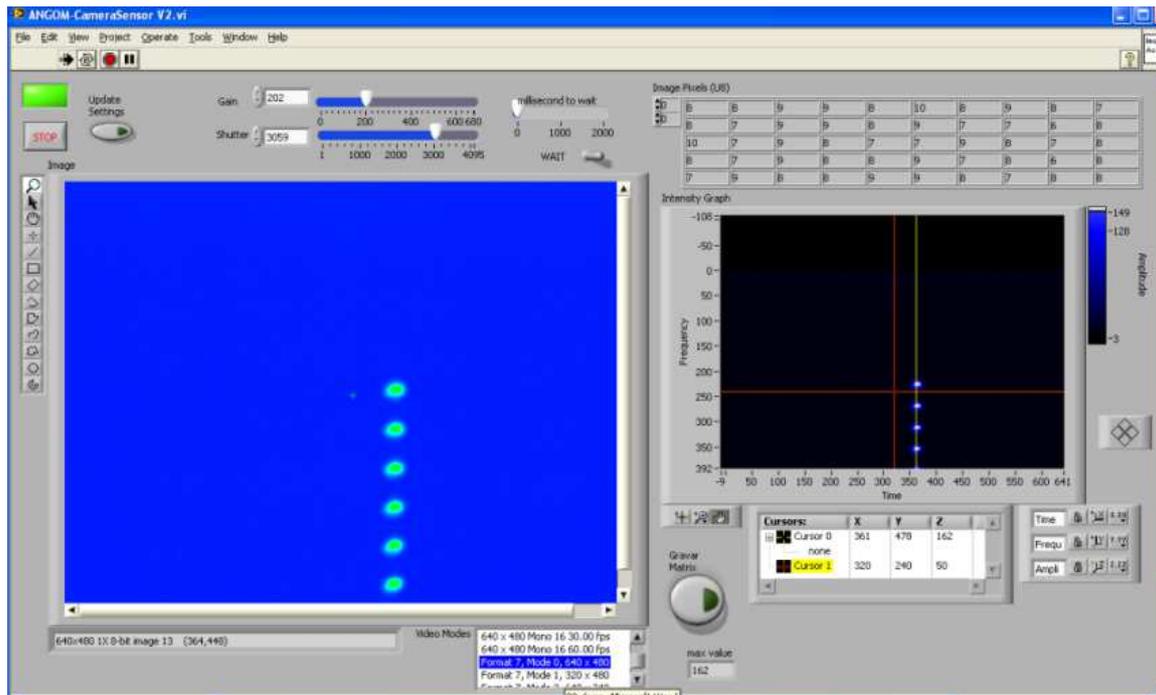


Fig. 3 – Interface do programa desenvolvido em *Labview* para aquisição de dados.

### 3.2 Resultados experimentais

A figura 5, mostra três exemplos de resultados obtidos através do sistema desenvolvido. Os resultados apresentados foram obtidos para três ângulos (1.2', 2.4' e 18') de acordo com a configuração apresentada. A posição no CCD do pixel correspondente ao máximo de intensidade para cada reflexão, é obtida através da determinação do centroide. O ângulo é obtido considerando a informação fornecida pela imagem adquirida e o valor da distância focal da lente. Como esperado, verifica-se um aumento do número de reflexões com o incremento do ângulo. Obteve-se um intervalo de medição de  $\pm 60$  arco minuto ( $\pm 1^\circ$ ) com exatidões da ordem de poucos arcos segundo (para valores máximos do intervalo de medição) a valores inferiores a 1 arco segundo.

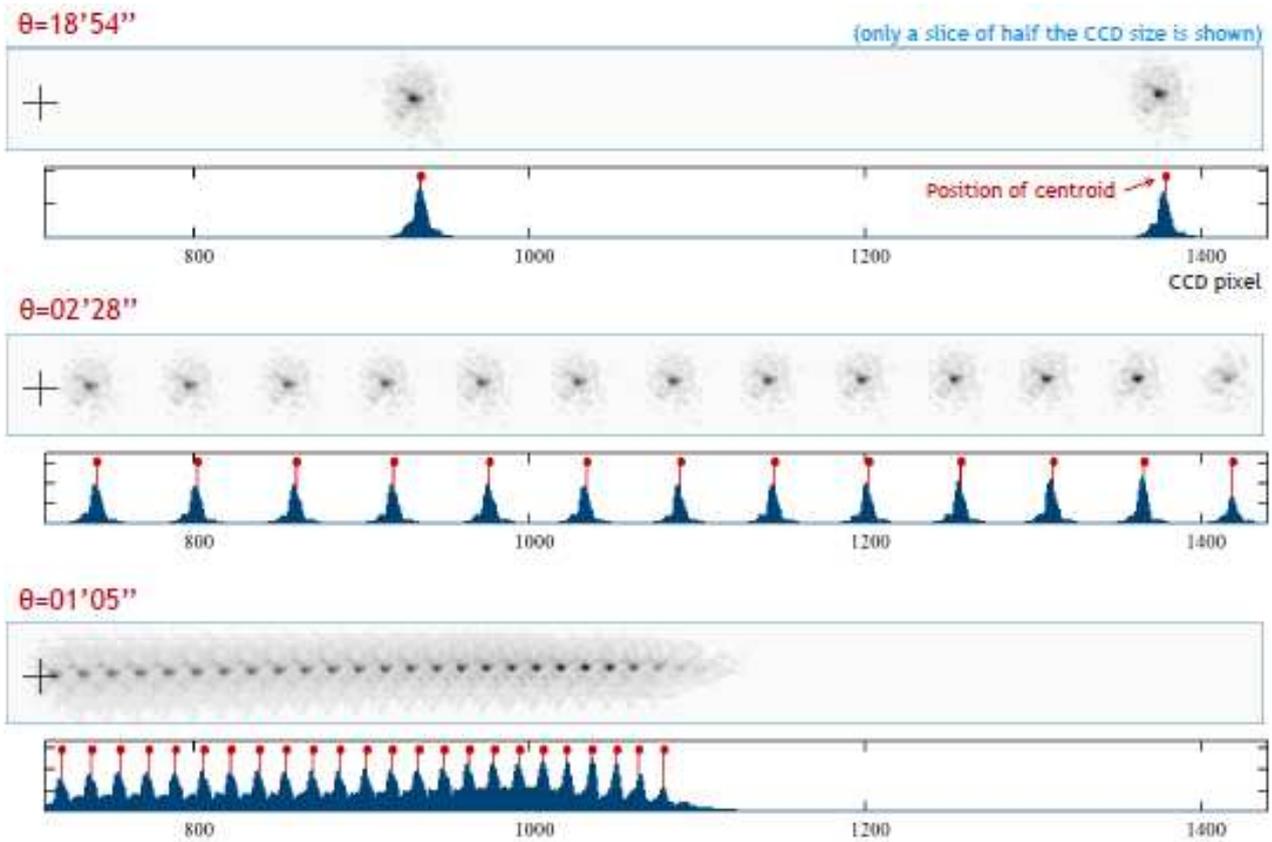


Figura 5 – Medição de vários ângulos baseada na posição das múltiplas reflexões.

#### 4. Conclusões

O sistema proposto neste trabalho demonstrou ter capacidade de medir campos angulares com elevada resolução para um largo intervalo de medição. Com o sistema apresentado obteve-se um intervalo de medição de  $\pm 60$  arco minuto ( $\pm 1^\circ$ ) com exatidões da ordem de poucos arcos segundo (para valores máximos do intervalo de medição) a valores inferiores a 1 arco segundo.

Comparativamente com a configuração simples, a medição de ângulos introduzindo uma cavidade óptica permite obter uma maior resolução devido à amplificação do ângulo e a redução da componente aleatória do erro pelo efeito da média dos valores.

Os próximos passos visam uma caracterização mais exata da incerteza, e a respetiva calibração do dispositivo sensor.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia o financiamento do Projecto PTDC/FIS/102610/2008 que permitiu desenvolver e implementar o sistema interferométrico em estudo.

## REFERÊNCIAS

- [1] Calvel B., Cabeza I., Cabral A., Rebordão J.M., Manske E., Sesselmann R., Sodnik Z.e Verlaan A., "Highprecision Optical Metrology for DARWIN: "Design and Performances", *in* Proceedings da 5ª conferência internacionalSpaceOptics, SP-554, ESA, 2004.
- [2] Bonino I.,Bresciani F., Piasini G., Piasini M., Cabral A., Rebordão J.M., Musso F. "An interferometer for high-resolution optical surveillancefrom geostationary orbit – internal metrology breadboard in Proc. 6ª conferência Space Optics, 2006.
- [3] RohlinJ., "An Interferometer for Precision Angle Measurements," *Appl. Opt.* **2**, 762-763 (1963)
- [4] Yoder P.R., Schlesinger, E.R., and Chickvary J.L., "Active annular-beam laser autocollimator system," *Appl. Opt.*14, 1890–1895 (1975).
- [5] Huang P. S., S. Kiyono, and Kamada O. "Angle measurement based on the internal reflection effect: a new method," *Appl.Opt.*31, 6047–6055 (1992).
- [6] Three-dimensional angle measurement based on propagation vector analysis of digital holography, *Appl Opt.* 46 (17):3539-45 (2007).

## PADRÕES NACIONAIS DE FORÇA

Isabel Spohr, Eduarda Filipe

Instituto Português da Qualidade

### RESUMO

O IPQ possui os Padrões Nacionais de Força que são constituídos por 3 Máquinas de Força Padrão (FSM) de 5 kN, 100 kN e 1 000 kN (1 MN). As duas primeiras máquinas de força são do tipo de massas suspensas e a terceira máquina é uma amplificação por alavanca da máquina de força de 100 kN.

Em 1999, após a instalação no IPQ das máquinas de força de massas suspensas de 5 kN e 100 kN, foi efetuada uma comparação bilateral com o Laboratório Nacional de Metrologia (LNM) alemão o *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB). Para realizar essa comparação o PTB utilizou um conjunto de transdutores de força padrão que abrangiam o intervalo de medição de 50 N a 100 kN. De modo a investigar as possíveis interações dos transdutores com a máquina, foram realizadas com esses transdutores medições no intervalo de 40 % ou 50 % até 100 % do seu valor nominal, garantindo-se a sobreposição no intervalo de medição de 50 N a 100 kN.

Da comparação entre as FSM dos LNM português e alemão concluiu-se que os desvios relativos entre as respetivas medições são inferiores à incerteza de medição relativa das FSM, confirmando-se assim a incerteza das FSM de 5 kN e 100 kN do IPQ. Estes resultados foram apresentados na 17ª Conferência Internacional do IMEKO em setembro de 2001, em Istanbul na Turquia <sup>[1]</sup>.

Posteriormente os Padrões Nacionais de Força participaram nas 3 comparações-chave realizadas pelo EUROMET:

- EUROMET.M.F-K1 (Força 5 kN e 10 kN)
- EUROMET.M.F-K2 (Força 50 kN e 100 kN)
- EUROMET.M.F-K3 (Força 500 kN e 1 000 kN)

Destas comparações-chave as duas primeiras já estão concluídas tendo os relatórios finais sido distribuídos aos participantes.

Com esta apresentação pretende-se realizar a divulgação a nível nacional dos resultados obtidos pelo IPQ nestas 2 comparações, resultados que permitem a comparação das nossas FSM com as dos outros países participantes.

Relativamente à comparação EUROMET.M.F-K3, o IPQ realizou as medições em 2013 mas o transdutor de força padrão ainda se encontra em circulação pelos LNM participantes na comparação.

## 1. Introdução

O IPQ participou na comparação EUROMET.M.F-K1 <sup>[2]</sup> com as máquinas de massas suspensas de 5 kN e 100 kN, tendo realizado os ensaios em 2002, e na comparação EUROMET.M.F-K2 <sup>[3]</sup> com a máquina de 100 kN realizando os ensaios em 2008.

O IPQ tem CMC publicadas na base do BIPM, para valores de força de 50 N a 100 kN, desde outubro de 2005.

Em julho de 2013 realizaram-se os ensaios relativos à comparação EUROMET.M.F-K3 em que foi utilizada a máquina de força de 1 MN, pelo que se pretende o pedido de alargamento das CMC na área da força até 1 MN quando forem divulgados os resultados de Portugal.

As comparações chave servem para comparar a realização das unidades de medida em todo o mundo. Na área de força, estas comparações são realizadas utilizando transdutores de força de alta qualidade que são sujeitos a perfis de carga semelhantes nos padrões Nacionais de Força, seguindo um rigoroso protocolo de medição e utilizando-se instrumentação semelhante.

Na figura 1 está indicado o esquema utilizado nas comparações-chave da área da força.

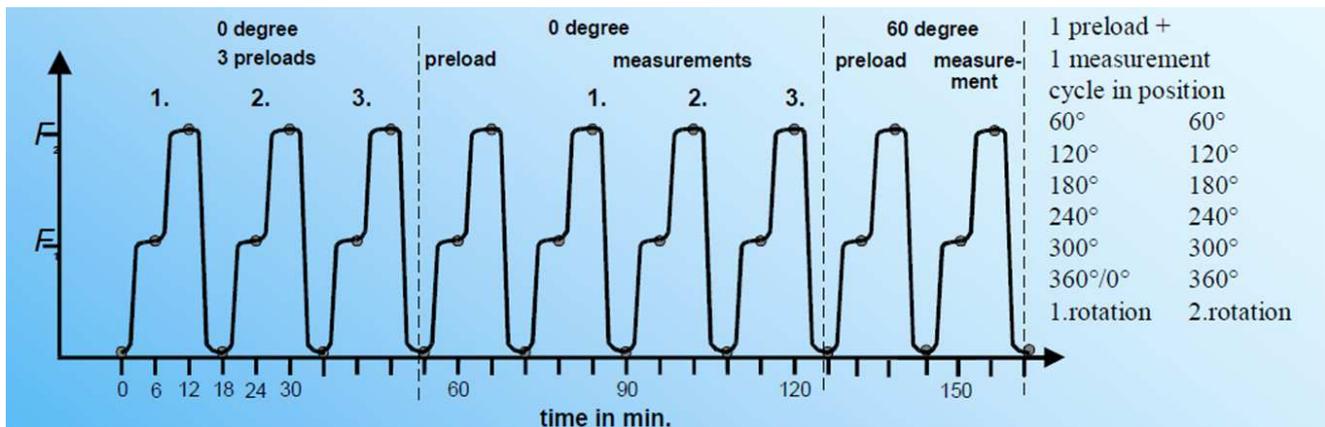


Figura 1 - Esquema utilizado nas comparações-chave.

Com este esquema efetuam-se medições em 2 patamares de força (por ex. 50 kN e 100 kN) realizando rotações com incremento de 60° entre cada posição e num total de 2 voltas completas (720°). O tempo de espera entre cada medição é de 6 minutos de modo a reduzir o efeito de *creep*. Na posição de 0° realizam-se 3 pré-cargas seguidas de 1 pré-carga e 3 medições. Nas rotações seguintes para cada posição são efetuadas 1 pré-carga e 1 medição.

São colocados em circulação pelo laboratório piloto o/s transdutor/es de força a ensaiar e um calibrador BN100 da HBM.

Uma vez que na comparação cada LNM participante utiliza um indicador DMP40 da HBM, de modo a "uniformizar" a leitura dos DMP40 utilizados, no início e no final de cada ensaio cada participante

compara para vários pontos a leitura do seu DMP40 com o sinal do calibrador BN100 enviado como referência.

Um ensaio seguindo o esquema acima descrito demora cerca de 10 horas.

## 2. FSM do IPQ

Para a realização prática da unidade de força utilizam-se massas conhecidas, que sujeitas ao efeito da força gravítica local, exercem uma força conhecida sobre um apoio localizado em terra firme. A estrutura mecânica para manipular e comandar essas massas é conhecida como “máquina de massas suspensas” ou “máquina de pesos mortos”.

A escala de força no IPQ é realizada com o auxílio das Máquinas de Força Padrão (FSM) que se podem ver nas figuras 2 e 3. Até 100 kN a força é produzida por 2 Máquinas de Força Padrão de massas suspensas. Nestas máquinas a força é gerada de acordo com a equação bem conhecida:

$$F = m \times g_{loc} \times (1 - \rho_a / \rho_m)$$

Sendo:  $F$  - a força gerada;

$m$  - a massa dos pesos;

$g_{loc}$  - a aceleração gravítica local;

$\rho_a$  - a massa volúmica do ar;

$\rho_m$  - a massa volúmica do material dos pesos.

As massas destas máquinas foram ajustadas no PTB para valores em Newton de acordo com as seguintes condições do laboratório de força no IPQ:

- Valor da aceleração gravítica local:  $g_{loc} = 9,8006759 \text{ m/s}^2$
- Massa volúmica do ar média:  $\rho_a = 1,2015 \text{ kg/m}^3$

Para valores até 1 MN a força é realizada por amplificação com o sistema de alavanca, das forças obtidas na FSM de 100 kN.



Figura 2 - FSM de 50 N a 5 kN (massas suspensas).



Figura 3 - FSM de 1 kN a 100 kN (massas suspensas) e FSM de 100 kN a 1 MN (alavanca).

### 3. Comparação-chave EUROMET.M.F-K1 (Forças de 5 kN e 10 kN) <sup>[2]</sup>

Nesta comparação o Laboratório Piloto foi o LNM Finlandês – MIKES-Raute e os participantes foram os LNM indicados em seguida (quadro 1).

Quadro 1 – LNM que participaram na comparação EUROMET.M.F-K1.

Áustria – BEV	Alemanha – PTB
Polónia – GUM	Suíça – METAS
Portugal – IPQ	Hungria – OMH

Os resultados desta comparação EUROMET ainda não foram publicados no *site* do BIPM estando no entanto neste *site* já disponível informação sobre a comparação-chave correspondente CCM.F-K1.

Os LNM que fizeram o *link* entre a comparação EUROMET e a CCM.F-K1 foram o MIKES-Raute e o PTB.

Nas figuras 4 e 6 podem ver-se os resultados da Comparação-chave EUROMET.M.F-K1 (ainda não publicados).

Segue-se o quadro 2 com a identificação dos LNM participantes na comparação CCM.F-K1a e b <sup>[4]</sup>.

Quadro 2 – LNM que participaram na comparação CCM.F-K1a e CCM.F-K1b.

Finlândia – MIKES-Raute	Alemanha – PTB
Itália – INRIM	Estados Unidos da América – NIST
Bélgica – SMD	Rep. China – NIM
Espanha – CEM	França – LNE
Japão – NMIJ	Coreia – KRISS
México – CENAM	Holanda – VSL
Turquia – UME	Singapura – A*STAR
Inglaterra – NPL	Austrália – NMIA

Nas figuras 5 e 7 podem ver-se os resultados, publicados no *site* do BIPM, dos LNM participantes na CCM.F-K1 a e b para os valores de força respetivamente de 5 kN e 10 kN.

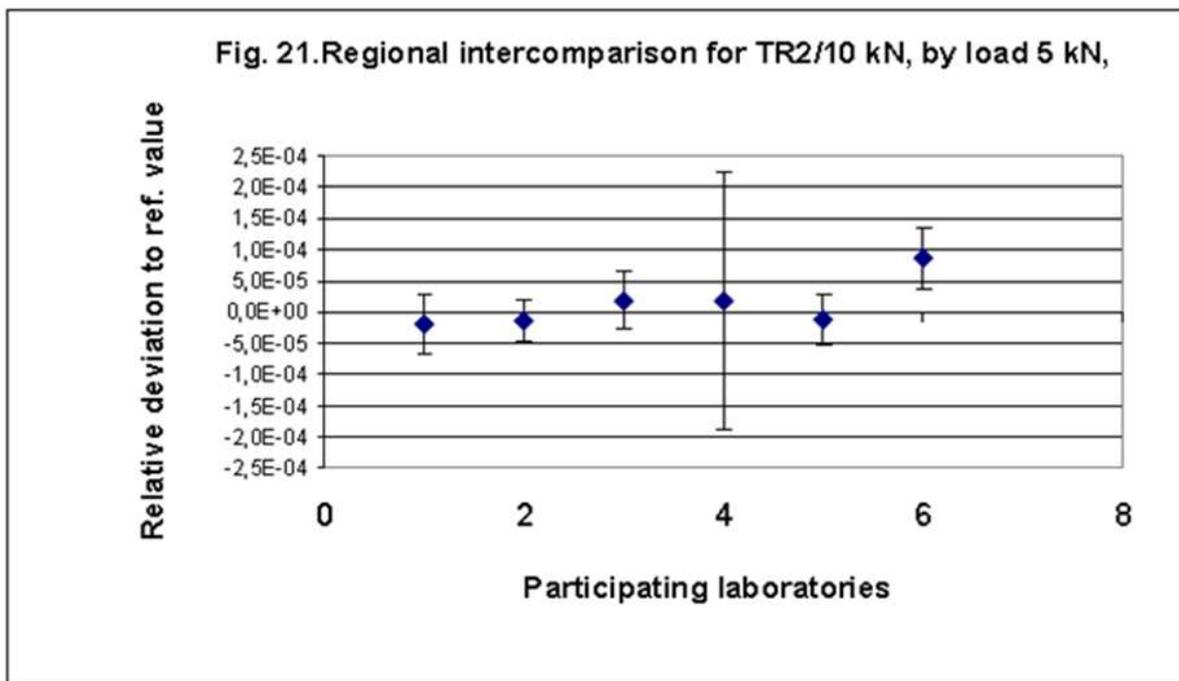


Figura 4 – Resultados da comparação EUROMET.M.F-K1 <sup>[2]</sup> para o valor de força de 5 kN.

O IPQ é o nº 5 e o PTB o nº 2.

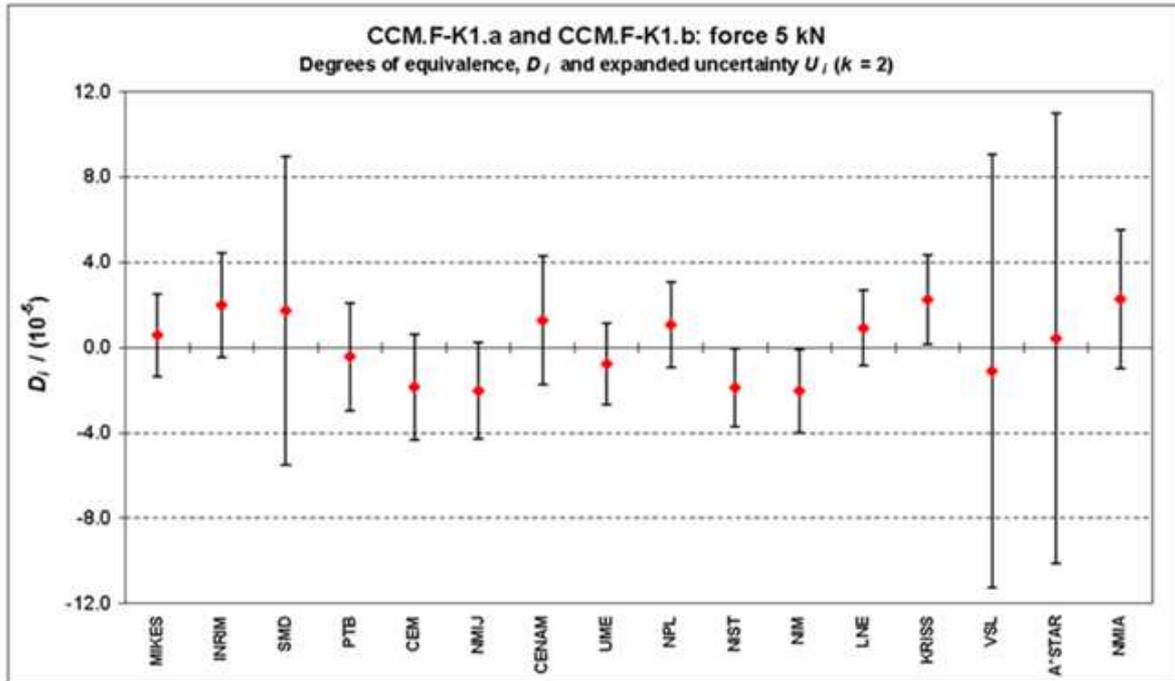


Figura 5 – Graus de equivalência entre os LNM participantes na comparação CCM.F-K1a e b<sup>[4]</sup> para a força de 5 kN.

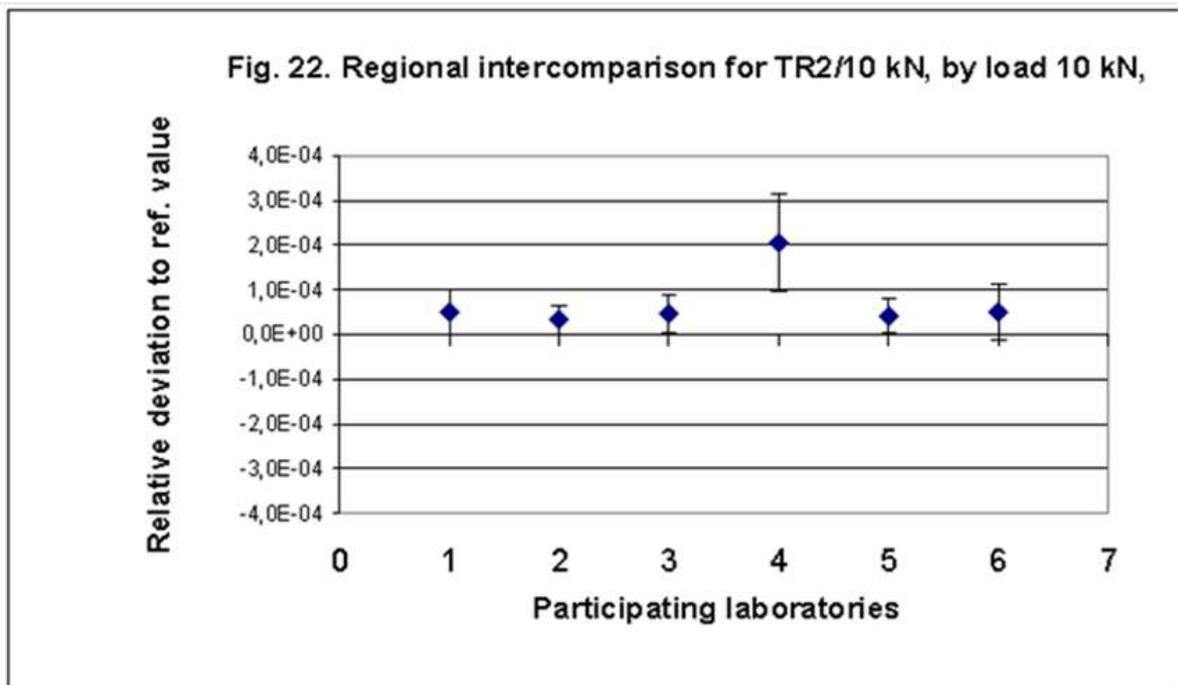


Figura 6 – Resultados da EUROMET.M.F-K1<sup>[2]</sup> para o valor de força de 10 kN. O IPQ é o nº 5 e o PTB o nº 2.

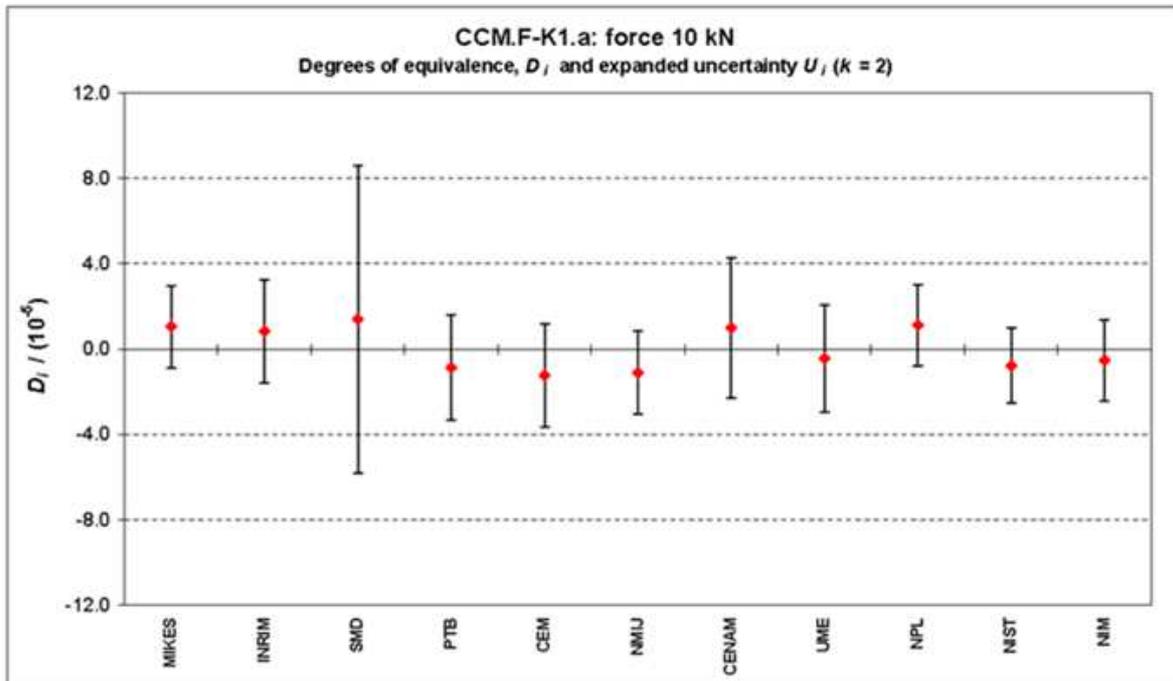


Figura 7 – Graus de equivalência entre os LNM participantes na CCM.F-K1a e b<sup>[4]</sup> para a força de 10 kN.

Como o PTB é um dos LNM que faz o *link* entre as comparações CCM.F-K1 e EUROMET.M.F-K1 é possível comparar também os resultados do IPQ com os obtidos pelos outros LNM participantes na comparação CCM.F-K1, uma vez que os resultados obtidos pelo IPQ são bastante semelhantes aos do PTB.

#### 4. Comparação-chave EUROMET.M.F-K2 (Força 50 kN e 100 kN)<sup>[3]</sup>

Nesta comparação o LNM Piloto foi o Inglês – NPL, os participantes foram os LNM indicados em seguida (quadro 3).

Quadro 3 – LNM que participaram na comparação EUROMET.M.F-K2

Brasil – INMETRO	Portugal – IPQ
Grécia – EIM	Roménia – INM
Dinamarca – Force	Alemanha – PTB
Polónia – GUM	Suíça – METAS
Holanda – VSL	Hungria – MKEH
Rep. Checa – CMI	-----

Os resultados desta comparação EUROMET foram publicados no *site* do BIPM em julho de 2014 estando neste *site* também disponível informação sobre a comparação-chave correspondente CCM.F-K2.

Os LNM que fizeram o *link* entre esta comparação EUROMET e a CCM.F-K2 foram o NPL e o PTB.

No quadro seguinte indicam-se os LNM participantes na comparação CCM.F-K2 <sup>[5]</sup>.

Quadro 4 – LNM que participaram na comparação CCM.F-K2.

Inglaterra – NPL	Alemanha – PTB
África do Sul – NMISA	Bélgica – SMD
França – LNE	Suécia – SP
Japão – NMIJ	Estados Unidos da América – NIST
Coreia – KRISS	Itália – INRIM
Rep. China – NIM	México – CENAM
Turquia – UME	Finlândia – MIKES-Raute

Nas figuras 8 e 9 pode ver-se o resumo dos resultados dos LNM participantes nas comparações CCM.F-K2 e EUROMET.M.F-K2 para os valores de força respetivamente de 50 kN e 100 kN.

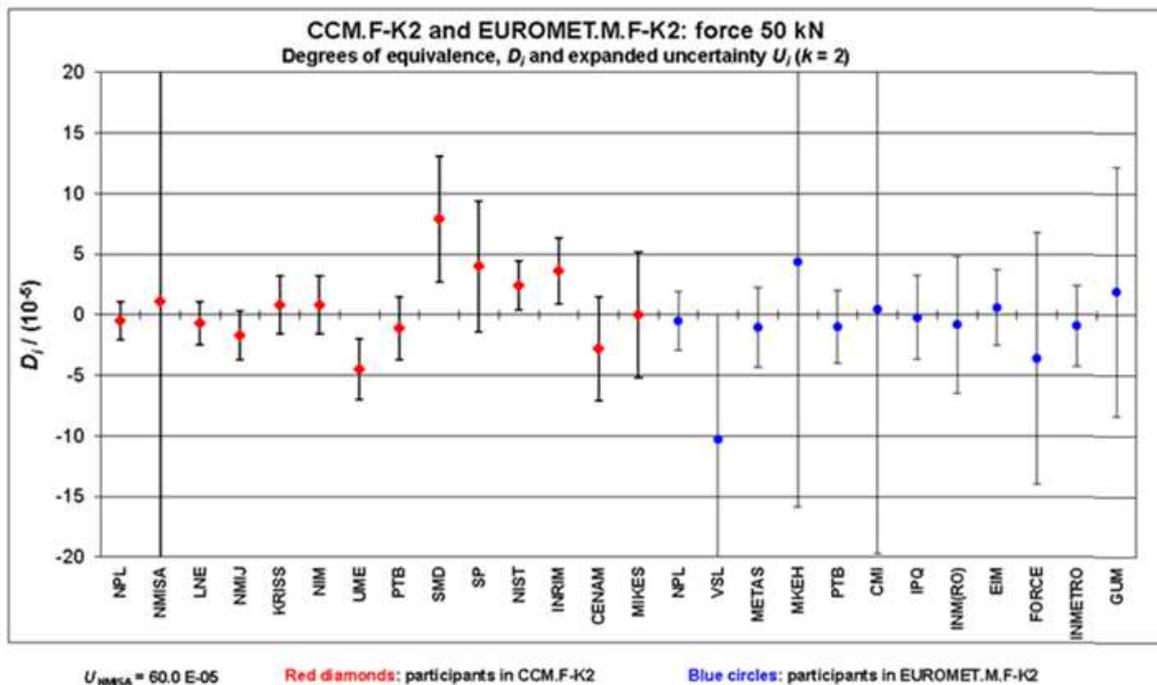


Figura 8 – Graus de equivalência entre os LNM participantes nas comparações <sup>[5]</sup> CCM.F-K2 e EUROMET.M.F-K2 para o valor de força de 50 kN.

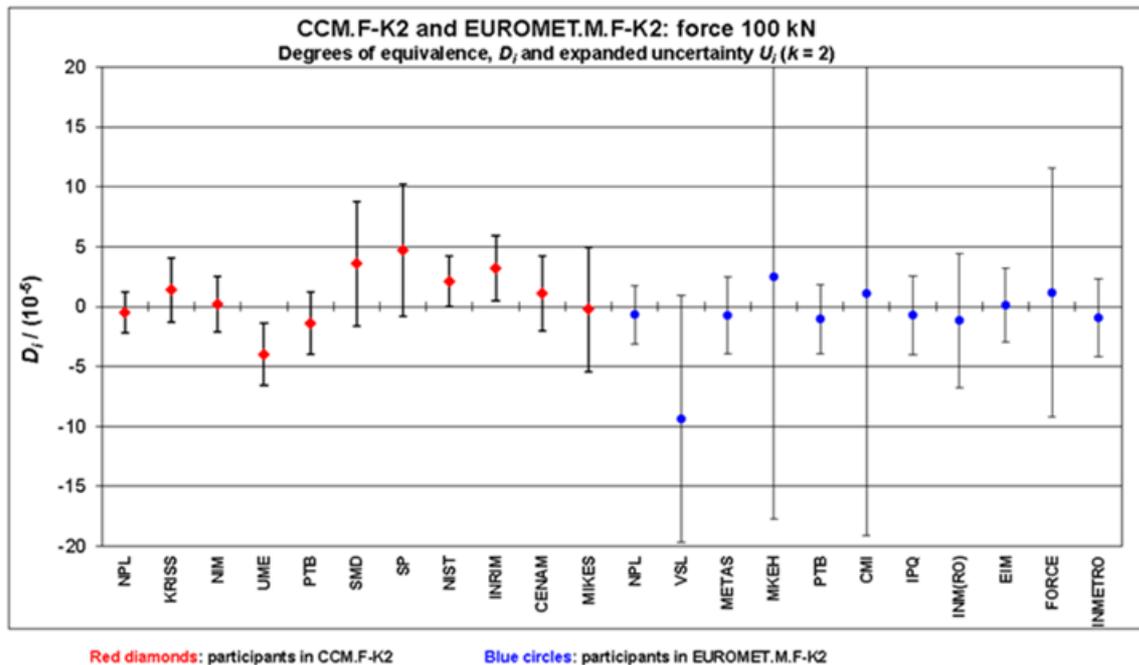


Figura 9 – Graus de equivalência entre os LNM participantes nas comparações<sup>[5]</sup> CCM.F-K2 e EUROMET.M.F-K2 para o valor de força de 100 kN.

## 5. Conclusões

A participação com os Padrões Nacionais de força de 5 kN e 100 kN nas Comparações-Chave obteve um excelente desempenho considerando o tipo de FSM utilizadas e as incertezas associadas.

Com esta participação confirmaram-se as CMC existentes para as medições de força entre os valores de 50 N e 100 kN assim como o excelente desempenho a nível internacional dos Padrões Nacionais de Força Portugueses.

Aguarda-se a divulgação dos resultados obtidos na comparação EUROMET.M.F-K3, para solicitar novas CMC alargando a nossa capacidade de medição de 100 kN para 1 MN.

## REFERÊNCIAS

- [1] R. Kumme e L. Brito, "Investigation of the Measurement Uncertainty of the Force Standard Machines of IPQ by Intercomparison Measurements with PTB"., in Proceedings da 17<sup>a</sup> Conferência Internacional do IMEKO TC3, 17-21 set. 2001, Istanbul, Turquia pp. 58-65.
- [2] Force Key Comparison EUROMET.M.F-K1 (5 kN and 10 kN), EURAMET Project No 535, Final Report, 18 November 2008

- [3] *Force Key Comparison EUROMET.M.F-K2 (50 kN and 100 kN), EURAMET Project No 518, Final Report*, 22 February 2012
- [4] *Summary results, Key comparisons CCM.F-K1.a and CCM.F-K1.b, The BIPM key comparison database*, May 2009
- [5] *Summary results, Key comparisons CCM.F-K2.a and CCM.F-K2.b, The BIPM key comparison database*, July 2014
- [6] Site BIPM: [http://kcdb.bipm.org/AppendixB/KCDB\\_ApB\\_search\\_result](http://kcdb.bipm.org/AppendixB/KCDB_ApB_search_result). 2014-07-31

## QUALIDADE METROLÓGICA DA MEDIÇÃO ÓPTICA DE DESLOCAMENTO DE PONTE SUSPensa DE ELEVADA DIMENSÃO

Luís Lages Martins<sup>1</sup>, José Manuel Rebordão<sup>2</sup>, Álvaro Silva Ribeiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Centro de Instrumentação Científica

<sup>2</sup>Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Departamento de Física, Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas

### RESUMO

Este trabalho apresenta o método e o sistema ópticos aplicados na medição dinâmica de deslocamento tridimensional do ½ vão principal de uma ponte suspensa de elevada dimensão (a Ponte 25 de Abril, em Lisboa), descrevendo os aspetos metrológicos que asseguraram a qualidade das medições dimensionais efetuadas, em particular, o método de calibração e o protótipo de padrão de referência, bem como a avaliação global de incertezas do processo de calibração, incluindo a parametrização intrínseca do sistema óptico de visão computacional, as coordenadas dos alvos no mundo e na imagem e os deslocamentos de referência.

### 1. Introdução

As estruturas terrestres de elevada dimensão constituem elementos fundamentais para o progresso contemporâneo da sociedade, assumindo um papel relevante ao nível das redes de transporte rodoviário e ferroviário (pontes, viadutos, túneis, entre outras), na exploração de recursos naturais e produção de energia (barragens, estruturas marítimas e hidráulicas) e na edificação urbana. Neste tipo de grandes obras, um eventual cenário de falha estrutural em qualquer fase da sua vida útil (que, regra geral, se prolonga no tempo durante várias décadas) está associado a relevantes consequências humanas e económicas, pelo que a garantia da sua segurança constitui um requisito obrigatório.

Neste âmbito, a observação de grandes obras contribui decisivamente para a melhoria do conhecimento do seu estado e conseqüentemente para a sua segurança, sendo suportada em atividades de inspeção visual e instrumentação (pontual ou permanente) visando a medição de grandezas associadas quer às ações quer à respetiva resposta estrutural da obra. Em virtude da sua elevada perturbação ambiental no meio em que se insere, a medição de grandezas em grandes obras constitui um desafio instrumental, nomeadamente, no que diz respeito à medição de deslocamento em que a instrumentação convencional (medição por contacto, nivelamento hidrostático, fio de prumo, medição geodésica ou fotogramétrica) se mostra inadequada pela falta de pontos absolutos de referência na proximidade da região de interesse e pela reduzida exatidão dimensional em regime dinâmico.

A medição dimensional por via óptica apresenta um elevado potencial para a resolução adequada do problema de medição descrito anteriormente, em comparação com outras soluções emergentes

suportadas em sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) e em sistemas do tipo radar interferométrico, nos quais o nível de exatidão dimensional é severamente afetado pelo efeito multi-reflexão do sinal eletromagnético nos elementos metálicos que compõem a estrutura observada, como é o caso das vigas de rigidez associadas às pontes suspensas de elevada dimensão.

Nas secções seguintes é promovida a apresentação dos resultados de medição óptica de deslocamento tridimensional do  $\frac{1}{2}$  vão principal de uma ponte suspensa de elevada (a Ponte 25 de Abril – P25A – em Lisboa), sendo descrito o conjunto de processos experimentais e respetivos resultados que suportaram a qualidade metrológica das medições realizadas, em particular, a parametrização intrínseca do sistema óptico de visão computacional, o ensaio dimensional do referencial de medição, o método de calibração e o protótipo de padrão de referência desenvolvido, bem como a avaliação global de incertezas de medição associadas aos desvios de calibração obtidos. Por último, são apresentadas conclusões relativas à adequação dos processos experimentais desenvolvidos ao referido contexto de observação dimensional em ponte suspensa de elevada dimensão.

## 2. Medição óptica de deslocamento tridimensional

A medição óptica de deslocamento tridimensional na P25A (ponte suspensa caracterizada por um vão principal com dimensão de 1013 metros) foi suportada na ligação rígida de uma câmara digital ao seu  $\frac{1}{2}$  vão principal (constitui uma região dinâmica da ponte com interesse para análise estrutural) orientada para a fundação da torre sul (região estática, comparativamente com o  $\frac{1}{2}$  vão principal), onde foi posicionado um conjunto de quatro alvos ativos, conforme ilustrado na Figura 1.



Figura 1 – A Ponte 25 de Abril com localização dos principais componentes do sistema óptico de visão computacional.

Cada alvo foi composto por uma coroa circular formada por 16 leds com capacidade de emissão de um feixe luminoso de reduzida divergência e com comprimento de onda na região do infravermelho próximo (centrado em 875 nm). A disposição geométrica dos quatro alvos e o conhecimento prévio das suas

coordenadas tridimensionais (relativas a um dos alvos) permitiu definir um referencial mundo para medição do deslocamento tridimensional, tendo-se efetuado a sua orientação de acordo com as principais direções de deslocamento (transversal, vertical e longitudinal) da P25A.

A câmara digital utilizada foi equipada com objetiva de elevada distância focal (600 mm) e sensor CCD monocromático com sensibilidade espectral adequada na região do infravermelho próximo, sendo composto por (1080 x 1920) pixéis quadrados com dimensão linear de 7,4  $\mu\text{m}$ . Na definição deste sistema óptico foi necessário garantir um equilíbrio entre uma elevada sensibilidade ao deslocamento da P25A e um campo de visão com dimensão suficiente para a visualização permanente dos quatro alvos na ocorrência de deslocamentos de elevada magnitude, sobretudo, na direção vertical.

O processamento digital das imagens adquiridas consistiu na determinação dos centros geométricos dos alvos mediante ajuste computacional de elipses às coroas circulares observadas. A obtenção do registo temporal das coordenadas imagem dos alvos (com frequência de aquisição de 15 Hz), em conjunto com o conhecimento prévio dos parâmetros intrínsecos da câmara (distância focal, coordenadas imagem do ponto principal e coeficientes de distorção) e das coordenadas mundo dos alvos permitiu, mediante otimização não-linear multivariável [1], a determinação da evolução temporal das coordenadas mundo do centro de projeção da câmara com base nas equações de colinearidade do modelo geométrico de perspetiva ou projeção central. A ligação rígida entre a câmara e o  $\frac{1}{2}$  vão principal permite afirmar que a alteração temporal da posição tridimensional do centro de projeção da câmara é representativa do deslocamento tridimensional da P25A no local de instalação da câmara.

É expectável que, em situação operacional regular (tráfego rodoviário e ferroviário), os deslocamentos medidos no  $\frac{1}{2}$  vão principal da P25A possuam uma magnitude significativa, embora inferior aos valores históricos obtidos em ensaio estático com carga distribuída realizados na P25A em 1999 (após reforço estrutural para instalação de tabuleiro ferroviário inferior na viga de rigidez). Nesta situação, foi observado um deslocamento vertical de 3,15 m (englobando os deslocamentos descendente de 2,37 m e ascendente de 0,78 m) mediante aplicação de carga ferroviária distribuída igual a 77,5 kN/m.

O sistema óptico de visão computacional descrito anteriormente assegurou a medição pontual dos deslocamentos máximos (pico-a-pico) vertical, transversal e longitudinal do  $\frac{1}{2}$  vão principal da P25A, cujas estimativas se apresentam no Quadro 1, consoante a solicitação estrutural de tráfego nos tabuleiros superior e inferior da ponte. A Figura 2 diz respeito à evolução temporal da posição vertical do  $\frac{1}{2}$  vão principal durante a passagem de um comboio de passageiros na P25A.

Quadro 1 – Deslocamentos máximos observados no ½ vão principal da P25A.

Solicitação estrutural	Deslocamento transversal	Deslocamento vertical	Deslocamento longitudinal
Tráfego rodoviário e ferroviário	0,39 m	1,69 m	0,07 m
Tráfego rodoviário	0,29 m	0,53 m	0,02 m

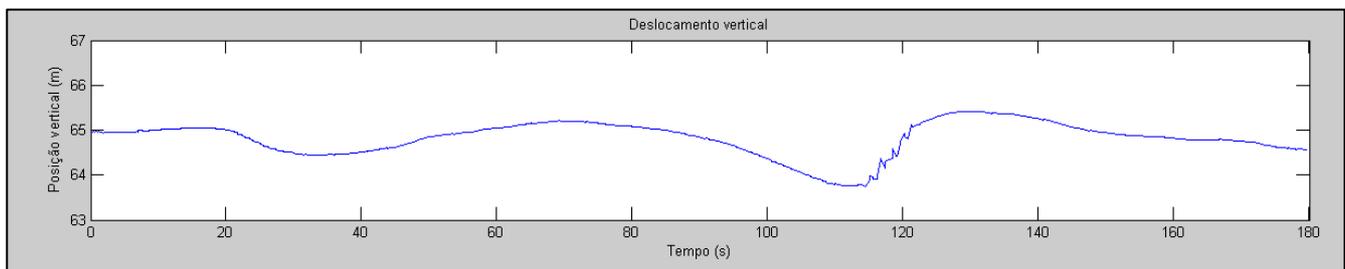


Figura 2 – Deslocamento vertical da P25A durante passagem de comboio de passageiros.

Comparativamente com os resultados obtidos no ensaio de carga distribuída em 1999, o deslocamento vertical máximo observado para solicitação combinada rodoviária e ferroviária apresentou uma magnitude inferior (1,69 m), coerente com a aplicação de uma menor carga distribuída associada à passagem de comboio de passageiros (carga distribuída variável entre 20,7 kN/m e 28,8 kN/m, dependendo do número de passageiros a bordo). A Figura 2 mostra que os deslocamentos verticais descendente e ascendente máximos ocorreram, respetivamente, antes e depois da passagem do comboio no ½ vão principal em torno do instante de tempo relativo de 120 s.

A elevada sensibilidade do sistema óptico de visão computacional para a medição de deslocamentos verticais permitiu discriminar o número de carruagens (quatro) do comboio de passageiros mediante contagem do número de variações súbitas registadas na transição vertical flecha / contra-flecha. Nas restantes direções de deslocamento, as estimativas obtidas apresentaram valores bastante inferiores, nomeadamente, 0,39 m na direção transversal e 0,07 m na direção longitudinal.

Na ausência de tráfego ferroviário, foram observados deslocamentos máximos com menor amplitude, sobretudo, na direção vertical (0,53 m). Nas restantes direções de deslocamento, a influência do tráfego

ferroviário é bastante menor (redução de deslocamentos máximos transversal e longitudinal para, respetivamente, 0,29 m e 0,02 m).

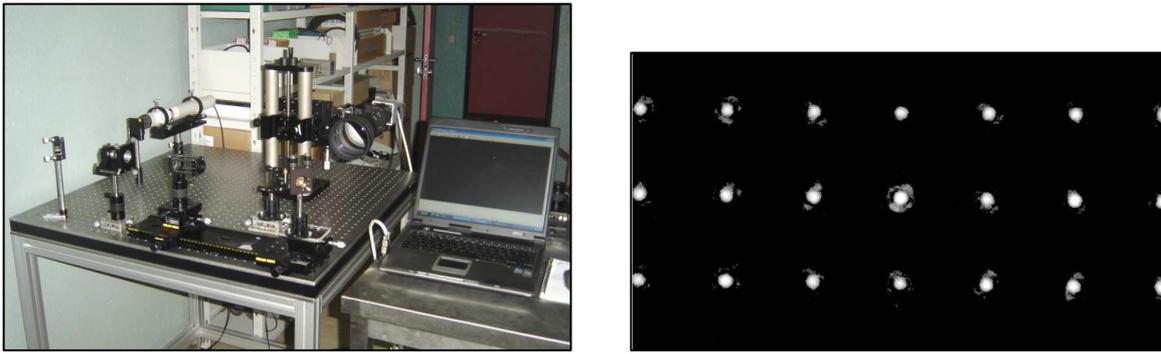
### 3. Parametrização intrínseca

A concretização da abordagem óptica descrita anteriormente implica a determinação prévia dos parâmetros intrínsecos da câmara de visão computacional, nomeadamente, da distância focal, das coordenadas imagem do ponto principal e dos coeficientes de distorção radial associados à objetiva utilizada. Para além de permitir efetuar as medições dimensionais pretendidas, a avaliação regular das estimativas destes parâmetros permite avaliar a estabilidade geométrica da câmara, o que constitui um aspeto relevante em cenário de observação contínua com solicitação dinâmica permanente.

Tratando-se de uma câmara caracterizada por uma elevada distância focal (600 mm), a aplicação de métodos convencionais de parametrização intrínseca revela-se inadequada em virtude dos problemas de instabilidade numérica que suscitam, notando que foram desenvolvidos no contexto da caracterização geométrica de câmaras com reduzida distância focal.

Recentemente surgiram métodos alternativos que visam ultrapassar as referidas limitações: (i) ensaio de campo; (ii) método goniométrico; (iii) método DOE – *Diffractive Optical Element* [2]. Uma análise comparativa destes métodos revela que o método DOE constitui uma solução bastante simples, requerendo apenas uma imagem para a quantificação dos parâmetros intrínsecos notando que os restantes dois métodos são caracterizados por uma elevada morosidade e pelo facto de requerem recursos experimentais complexos e dispendiosos. Neste âmbito, é possível referir a necessidade de recorrer a conjunto de alvos com elevada dimensão global (na ordem de grandeza do metro) no ensaio de campo e, no método goniométrico, o recurso a colimador e goniómetro de elevada exatidão em instalação laboratorial dedicada.

No método DOE (*vide* Figura 3) é promovida a criação de um feixe laser colimado que ao passar no elemento óptico difrativo (DOE) origina uma distribuição conhecida de pontos (padrão de difração) no plano focal da câmara, conforme ilustrado na Figura 4. A determinação das coordenadas imagem dos centróides destes pontos (mediante processamento digital de imagem por ajuste gaussiano), em conjunto com o conhecimento do comprimento de onda do feixe laser e do período espacial do DOE permitem, mediante um processo de otimização não-linear multivariável [1], a obtenção de estimativas dos parâmetros de interesse.



Figuras 3 e 4 – Implementação do método DOE (à esq.) e representação logarítmica dos pontos de difração (à dir).

Os ensaios experimentais realizados permitiram obter estimativas bastante próximas dos valores nominais de distância focal (600 mm) e de coordenadas imagem do ponto principal (540 píxel, 960 píxel), com ausência de problemas de instabilidade numérica. No que se refere à distorção radial, a estimativa obtida para o coeficiente de primeira ordem apresentou uma magnitude residual, não afetando a exatidão da medição de coordenadas imagem.

#### 4. Ensaio dimensional do referencial de medição

O ensaio laboratorial do referencial de medição visando a determinação das coordenadas mundo dos alvos, foi realizado com recurso a um padrão de referência – máquina de medição por contacto de coordenadas tridimensionais (*vide* Figura 5) – rastreado ao Sistema Internacional de Unidades (SI) no domínio dimensional.

O procedimento de medição adotado consistiu na medição de coordenadas de cinco pontos no topo da superfície de oito leds por alvo, segundo uma distribuição radial simétrica, conforme ilustrado na Figura 6. Aos pontos medidos foi aplicado um ajustamento computacional para estabelecer uma superfície esférica associada a cada led, da qual se pode extrair informação relativamente ao respetivo centro geométrico. Numa fase subsequente, os centros geométricos das oito superfícies esféricas obtidas em cada alvo foram utilizados na geração computacional de uma circunferência cujo centro geométrico se considera representativo da posição tridimensional de cada alvo no espaço.



Figuras 5 e 6 – Equipamento de referência no ensaio dimensional (à esq.) e pormenor da medição de led do alvo (à dir.).

## 5. Método de calibração e protótipo de padrão de referência

A calibração do sistema óptico de visão computacional foi efetuada com recurso a um ensaio de campo na P25A, estabelecendo-se uma linha de visão entre o referencial e a câmara colocados em regiões estáticas do cenário de observação (respetivamente, na fundação da torre sul e na ancoragem sul, vide Figura 7). Esta configuração geométrica do sistema de visão procurou assegurar uma aproximação simétrica relativamente à configuração de medição (fundação da torre sul / ½ vão principal) em termos de distância de observação e elevação da linha de visão.

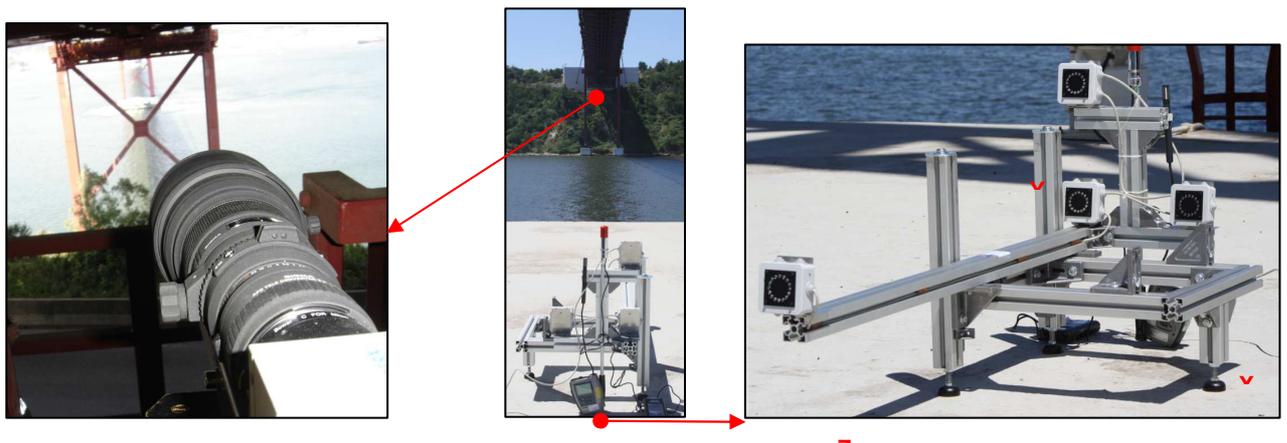


Figura 7 – Ensaio de campo na P25A visando a calibração do sistema óptico de visão computacional.

Neste processo, foi promovida a aquisição de imagens do referencial de medição em posições de referência (posição inicial, posição longitudinal de 250 mm, posição transversal de 350 mm e posição

vertical de 250 mm) num dispositivo de calibração desenvolvido para este efeito, e cuja caracterização dimensional foi efetuada previamente mediante ensaio dimensional laboratorial de forma idêntica à descrita anteriormente para o referencial de medição (*vide* secção 4). Para além da determinação das coordenadas tridimensionais dos alvos nas várias posições de referência no dispositivo de calibração, os ensaios dimensionais realizados incluíram a avaliação da repetibilidade da instalação manual do referencial no dispositivo de calibração e da influência do seu transporte do laboratório para o cenário de observação, com a realização de medições antes e após a realização de ensaios de campo. A variabilidade destes resultados foi incluída como contribuição para a avaliação da incerteza de medição dos deslocamentos de referência no processo de calibração.

Estando ambos os elementos do sistema de medição – a câmara e o referencial – colocados em regiões estáticas do cenário de observação, a montagem e aquisição de imagem do referencial nas diversas posições de referência do dispositivo de calibração, permitiu determinar os respetivos deslocamentos virtuais da câmara nas direções de interesse, sendo aplicado o mesmo procedimento de otimização utilizado no ensaio de medição de deslocamento tridimensional da P25A. O Quadro 2 apresenta os desvios de calibração de deslocamento obtidos no ensaio realizado no Inverno, onde se procurou minimizar o efeito ambiental de turbulência atmosférica com origem em gradientes térmicos acentuados.

Quadro 2 – Desvios de calibração de deslocamento.

Direção	Transversal (mm)	Vertical (mm)	Longitudinal (mm)
X	0,7	-1,2	0,7
Y	1,4	0,3	1,2
Z	0,1	0,0	-1,5

A análise do Quadro anterior permite quantificar o desvio máximo absoluto, correspondente a 1,5 mm, obtido no ensaio de calibração de deslocamento longitudinal na mesma direção. Salienta-se que a aplicação de correções de refração vertical nas coordenadas mundo dos alvos, conforme descrito em [3], origina uma redução dos desvios verticais obtidos, confirmando a adequação dos respetivos modelos de compensação deste fenómeno atmosférico.

## 6. Avaliação de incertezas de medição

### 6.1 Grandezas de entrada

O processo de avaliação de incertezas de medição realizado teve por objetivo a determinação do nível de exatidão dos desvios de calibração referidos anteriormente. Neste contexto, foi adotada uma abordagem funcional de propagação de incertezas desde as grandezas de entrada (parâmetros intrínsecos, coordenadas mundo e imagem dos alvos e deslocamentos de referência) até às grandezas de saída (desvios de calibração). No Quadro 3 são apresentadas as componentes de incerteza de medição consideradas para as diversas grandezas de entrada intervenientes no processo de calibração.

Quadro 3 – Componentes de incerteza de medição das grandezas de entrada.

Grandezas de entrada	Componentes de incerteza
Parâmetros intrínsecos	Coordenadas imagem dos pontos de difração; período espacial do DOE
Coordenadas mundo dos alvos	Medição dimensional; circularidade; expansão / contração térmica; transporte e instalação; correção da refração vertical
Coordenadas imagem dos alvos	Processamento digital de imagem; turbulência atmosférica por efeito térmico
Deslocamentos de referência	Medição dimensional das posições inicial e final; desvio de retorno a zero; deslocamento diferencial entre alvos; repetibilidade da instalação de alvos

No caso dos parâmetros intrínsecos (distância focal e coordenadas imagem do ponto principal), o recurso ao Método de Monte Carlo (MMC) [4] revelou-se essencial para o cálculo das respetivas incertezas de medição visto que a quantificação das estimativas destas grandezas recorreu a um processo de otimização não-linear, multivariável, de natureza iterativa. Nos resultados obtidos é notória a existência de efeitos de correlação entre os parâmetros intrínsecos estudados.

Na quantificação da incerteza de medição associada às coordenadas mundo dos alvos constatou-se que a inexistência de correção vertical em cenário de observação no Verão e sem sombra sobre os alvos conduz a um aumento significativo da incerteza (de 0,7 mm para 6,5 mm) o que evidencia o impacto deste fenómeno atmosférico [3] no nível de exatidão dimensional em observações realizadas a longa distância (aproximadamente, 500 metros).

No que respeita às coordenadas imagem dos alvos, destaca-se a realização de ensaios de feixe errante na P25A, fazendo uso da configuração geométrica estabelecida no ensaio de campo de calibração do sistema de medição mas sem alteração da posição inicial do referencial de medição. Nos resultados obtidos salientam-se as diferenças encontradas ao nível do desvio-padrão experimental das amostras associadas às posições dos alvos na imagem em cenário de observação de Inverno com sombra nos alvos (0,13 píxel) e de Verão sem sombra nos alvos (0,56 píxel).

## 6.2 Grandezas intermédias

No que respeita às grandezas intermédias – posições inicial e final do centro de projeção da câmara – as respetivas incertezas de medição foram calculadas mediante propagação das incertezas de medição associadas às grandezas de entrada com recurso ao MMC [4], atendendo à natureza não-linear, multivariável e iterativa do processo de otimização que determina a estimativa da posição do centro de projeção da câmara no espaço tridimensional.

Para o cenário de calibração no Inverno obtiveram-se as incertezas-padrão de medição da posição do centro de projeção da câmara entre 0,95 mm e 1,0 mm nas direções transversal e vertical, enquanto na restante direção (longitudinal), a incerteza de medição situou-se entre 8,5 mm e 9,0 mm.

Considerando o cenário de calibração no Verão, as incertezas mencionadas anteriormente sofrem um significativo acréscimo de magnitude, sobretudo na direção longitudinal, onde se atingiu um valor de 29 mm. Nas direções transversal e vertical, a incerteza de medição da posição do centro de projeção da câmara situou-se na proximidade de 3 mm.

A análise de sensibilidade das contribuições das incertezas das grandezas de entrada revelou que a incerteza de medição associada às coordenadas imagem dos alvos constitui a contribuição dominante (60 %) para a incerteza combinada de medição, justificando a diferença de resultados entre os cenários de calibração estudados e evidenciando o impacto do fenómeno de turbulência atmosférica por efeito de gradiente térmico acentuado.

## 6.3 Grandezas de saída

As incertezas de medição associadas aos desvios de calibração constituem incertezas combinadas das grandezas intermédias (*vide* secção 6.2) – posição inicial e final centro de projeção da câmara – e da grandeza de entrada deslocamento de referência (mencionada na secção 6.1). Os Quadros 4 e 5 apresentam as incertezas expandidas de medição (95 %) obtidas pela aplicação da Lei de Propagação de Incertezas [5] para os casos de calibrações em condições favoráveis (durante o Inverno com sombra nos alvos) e em condições adversas (durante o Verão sem sombra nos alvos).

Quadro 4 – Incertezas expandidas de medição (95 %) – calibração efetuada no Inverno

Direção	Deslocamento transversal	Deslocamento vertical	Deslocamento longitudinal
X	3,4 mm	3,0 mm	3,0 mm
Y	3,4 mm	2,8 mm	2,8 mm
Z	26 mm	26 mm	26 mm

Quadro 5 – Incertezas expandidas de medição (95 %) – calibração efetuada no Verão

Direção	Deslocamento transversal	Deslocamento vertical	Deslocamento longitudinal
X	8,5 mm	8,5 mm	8,4 mm
Y	8,7 mm	8,7 mm	8,6 mm
Z	80 mm	81 mm	81 mm

A análise do Quadro 4 permite constatar que a incerteza expandida de medição associada aos desvios de calibração nas direções transversal (X) e vertical (Y) se situou entre 2,8 mm e 3,4 mm, apresentando um valor significativamente mais elevado na direção longitudinal (Z) igual a 26 mm em todas as direções de deslocamento ensaiadas. Esta situação decorre da configuração geométrica adotada – alinhamento longitudinal da câmara com a viga de rigidez da P25A – que tornou reduzida a sensibilidade da medição de deslocamento nessa direção.

O Quadro 5 permite constatar que, caso a calibração seja efetuada em cenário adverso para observação, as incertezas de medição apresentam valores com magnitude mais elevada, comparativamente como a calibração em condições favoráveis, variando entre 8,4 mm e 8,7 mm nas direções transversal (X) e vertical (Y) e atingindo um valor de 81 mm na direção longitudinal (Z). Estes valores refletem o impacto da contribuição da componente de incerteza relativa às coordenadas imagem dos alvos, que contabiliza as fontes de incertezas associadas ao processamento digital de imagem e à turbulência atmosférica por efeito de gradiente térmico acentuado no cenário de observação.

Tomando o valor de 10 mm como incerteza expandida de medição (95 %) requerida para análise estrutural do deslocamento tridimensional no ½ vão principal da P25A verifica-se que o sistema óptico de visão computacional estudado é adequado para a medição de deslocamentos transversais e verticais, mesmo em condições desfavoráveis.

## 7. Conclusões

O estudo realizado ilustrou como os sistemas ópticos de visão computacional podem ser aplicados à observação dimensional de estruturas terrestres com elevada dimensão, no caso particular analisado, uma ponte suspensa, permitindo a obtenção de estimativas e incertezas de medição dinâmica do deslocamento tridimensional em regiões de interesse estrutural.

No caso da P25A foi possível concluir que a abordagem óptica aplicada é adequada à medição dinâmica (com frequência de aquisição de 15 Hz) de deslocamentos verticais e transversais no seu  $\frac{1}{2}$  vão principal visto que as incertezas de medição dos desvios de calibração apresentam um valor inferior a 10 mm (nível de exatidão requerido para análise estrutural da P25A) mesmo em condições adversas de observação. Já no caso da medição do deslocamento longitudinal, o estudo realizado revelou uma incerteza de medição bastante elevada (superior a 10 mm) em virtude da reduzida sensibilidade de medição da câmara nessa direção originada pela configuração geométrica de medição adotada. Na P25A, esta limitação é minorizada considerando que existe instrumentação complementar (transdutores de deslocamento longitudinal) instalados nos extremos da viga de rigidez no seu encontro com as ancoragens norte e sul.

No contexto da garantia da qualidade metrológica das medições efetuadas, os ensaios experimentais realizados mostraram a adequação da abordagem proposta, designadamente, ao nível da parametrização intrínseca da câmara, dos ensaios dimensionais do referencial de medição e do dispositivo de calibração e do ensaio de calibração *in situ*, onde foram obtidos desvios absolutos de calibração inferiores a 1,5 mm, compatíveis com as melhores expectativas de desempenho do sistema. A aplicação de correções de refração atmosférica às coordenadas mundo verticais dos alvos permitiram diminuir a magnitude dos correspondentes desvios de calibração, melhorando o nível de exatidão do método de medição estudado.

Por último, deve-se destacar o relevante papel do MMC, ao permitir efetuar de forma apropriada a propagação das incertezas de medição nos processos de parametrização intrínseca e determinação da posição do centro de projeção da câmara, caracterizados por uma forte não-linearidade, de natureza iterativa e multivariável.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à EP–Estradas de Portugal, S.A. a autorização para a realização dos trabalhos experimentais realizados na Ponte 25 de Abril, aos colegas do Centro de Instrumentação Científica do LNEC e do Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas da FCUL pelo apoio prestado. O autor Luís Lages

Martins agradece, igualmente, a atribuição da Bolsa de Investigação SFRH/BD/76367/2011 concedida pela FCT–Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P.

## REFERÊNCIAS

- [1] Lagarias, L., Reeds, J., Wright, M. e Wright, P., “Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions”, *SIAM Journal of Optimization*, Vol. 9, N. 1, pp. 112-147, 1998.
- [2] Bauer, M., Griesbach, D., Hermerschmidt, A., Krüger, S., Scheele, M. e Schischmanov, A., “Geometrical camera calibration with diffractive optical elements”, *Optics Express*, Vol. 16, N. 25, pp. 20241-20248, 2008.
- [3] Martins, L., Rebordão, J., Ribeiro, A., “Thermal influence on long-distance optical measurement of suspension bridge displacement”, *International Journal of Thermophysics*, Vol. 35, N. 1, 2014.
- [4] Supplement 1 to the Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (S1 GUM), Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
- [5] Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM), International Organization for Standardization (ISO), 1995.

# **NOTÍCIAS E EVENTOS DA METROLOGIA**

## EVENTOS METROLOGIA



### Encontro: A Metrologia na Saúde

IPQ, Caparica, 9 outubro 2014

<http://ipq1sapp02:8088/pt/site/Eventos/Pages/EventosLista.aspx>



**EMRP**  
European Metrology Research Programme  
Programme of EURAMET



The EMRP is jointly funded by the EMRP participating countries within EURAMET and the European Union

### 1.º Seminário: Metrologia para Levantamento Topográfico de Longas Distâncias

IPQ, Caparica, 21 novembro 2014

<http://ipq1sapp02:8088/pt/site/Eventos/Pages/EventosLista.aspx>



## Metrology in the context of global market and its contribution to the economic development of countries

Huesca (Spain), 16-18 September 2014

[http://www.uimp.es/blogs/pirineos/files/2014/07/Tr%C3%ADptico-metrolog%C3%ADa\\_Maquetaci%C3%B3n-1.pdf](http://www.uimp.es/blogs/pirineos/files/2014/07/Tr%C3%ADptico-metrolog%C3%ADa_Maquetaci%C3%B3n-1.pdf)



**1<sup>st</sup> IMEKO FOODS**

Metrology Promoting Objective and Measurable Food Quality and Safety

**October, 12<sup>nd</sup> - 15<sup>th</sup> 2014 Rome (Italy)**

<http://imekofoods.enea.it/>



3º Congresso Internacional em Metrologia Mecânica

**Brasil, 14 - 16 outubro, 2014**

<http://www.cimtec.org.br/Presentation.html>



**2<sup>th</sup> - 5<sup>th</sup> November, 2014, Valência, Espanha**

<http://ieee-sensors2014.org>



**19<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup> November, 2014, Manchester, Reino Unido**

<http://www.lvmc.eu/>



Rio de Janeiro, Brasil, 23 - 25 Novembro 2014

<http://www.cbmri.org.br/>



Bilbao, Espanha, 17 - 18 Março 2015

<http://metromest.org/>



Argélia, 19 - 21 Maio 2015

<http://www.forummeasure.com/>

## PUBLICAÇÕES



<http://www.callabmag.com>



<http://www.cem.es/actualidad/publicado-el-n%C2%BA6-de-la-revista-e-medida>



Number 5, October 2014

Technical Supplement 2014

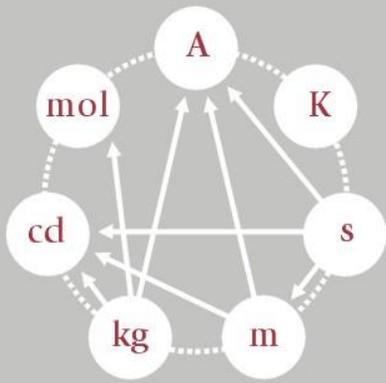
<http://iopscience.iop.org/0026-1394/>

## FORÚM METROLOGIA E CALIBRAÇÃO

### Metrologia\_e\_Calibracao · [Fórum Metrologia & Calibração]

Continuamos a contar com o Fórum Metrologia & Calibração como espaço da SPMet para a divulgação de notícias, troca de informações técnicas e resposta a questões sobre Metrologia, Instrumentação, Incertezas, Acreditação, Qualidade, Normalização e temas relacionados.

<http://www.spmet.pt>



# SPMet

Sociedade Portuguesa  
de Metrologia

ISSN 2182-5424

| n<sup>o</sup>s 8 e 9 | Maio e Setembro 2014

[www.spmet.pt](http://www.spmet.pt)