

1 Introdução

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Interferometria da Divisão de Óptica (Diopt) do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro) em convênio com a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e com o apoio técnico do Instituto Nacional de Metrologia da França (LNE/INM-*Laboratoire National de Métrologie et d'essais / Institut National de Métrologie*). Este projeto envolve o desenvolvimento do primeiro padrão primário no Brasil na área de Comprimento/Frequência em torno de 532 nm. Trata-se de um laser Nd:YAG estabilizado em frequência com características metrológicas necessárias para a realização prática da definição do metro no referido comprimento de onda.

1.1. Contexto Metrológico

As sete unidades de base do Sistema Internacional (SI-*Système international d'unités*) são listadas na Tabela 1.1 e representam as referências para todas as outras unidades de medida. Com o progresso da ciência e com o aperfeiçoamento dos métodos de medição, torna-se necessário revisar e melhorar periodicamente as definições das unidades e sua realização prática. Quanto mais exatas forem as medições, mais conhecimento se tem para atualização dessas definições.

Tabela 1.1. Grandezas e unidades de base do SI [55].

Grandeza de base	Símbolo	Unidades de base	Símbolo
comprimento	l, h, r, x	metro	M
Massa	m	quilograma	Kg
Tempo, duração	t	segundo	S
Corrente elétrica	I, i	Ampere	A
Temperatura termodinâmica	T	Kelvin	K
Quantidade de substância	n	mol	Mol
Intensidade luminosa	I_v	candela	Cd

Entre as grandezas de base do Sistema Internacional, a grandeza de interesse para o presente trabalho é o metro. Ao longo dos anos o metro deixou de ser representado de forma materializada para ser representado mediante a realização prática de uma definição.

1.2.

Contexto histórico da definição do metro (m), como unidade de medida de comprimento.

Ao término da Revolução Francesa no ano 1799 surgiu a necessidade de se ter uma unidade padrão de comprimento que pudesse ser reconhecida em qualquer lugar e com o mesmo grau de exatidão. Inicialmente a primeira unidade do comprimento foi definida como “*a distância medida de um segmento do meridiano terrestre entre Dunkerque e Barcelona via Paris*”. No entanto, como esta medição não podia ser realizada apropriadamente na prática, buscaram-se novas definições:

1889 - (1ª CGPM¹) protótipo internacional de platina iridiada

“O metro é a distância entre os eixos de dois traços principais marcados na superfície neutra do padrão internacional depositado no Bureau Internacional de

¹ Conferência Geral de Pesas e Medidas (CGPM - *Conférence Générale des Poids et Mesures*).

Pesos e Medidas (BIPM-*Bureau International des Poids et Mesures*), na temperatura de zero graus Celsius e sob uma pressão atmosférica de 760 mmHg e apoiada sobre pontos de mínima flexão”

1960 - (11ª CGPM) - radiação do criptônio 86

“O metro é o comprimento igual a 1 650 763,73 comprimentos de onda no vácuo da radiação correspondente à transição entre os níveis $2p^{10}$ e $5d^5$ do átomo de criptônio 86”.

1983 - (17ª CGPM - 1983 - Resolução 1)

“O metro é o comprimento da trajetória percorrida pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de $1/299792458$ de segundos”.

Esta última definição pode ser realizada através da estabilização de um laser numa componente hiperfina da transição de uma ou mais das radiações contidas na lista de frequências e comprimentos de onda no vácuo recomendados pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM- *Comité International des Poids et Mesures*) em 2001 [2], ver Tabela 1.2.

Estes lasers estabilizados constituem a realização primária do metro na maioria dos Institutos Nacionais de Metrologia, e são utilizados como padrões de frequência óptica para calibrar, por comparação, outras fontes de radiação (ex. lâmpadas espectrais). Desde os anos oitenta estes Institutos nacionais e o BIPM têm melhorado substancialmente a reprodutibilidade das radiações recomendadas para a realização prática do metro, reduzindo as incertezas na determinação dos valores de frequência das radiações assim como adicionando novas radiações na lista de radiações recomendadas. Existem atualmente 13 radiações de lasers estabilizados cobrindo as regiões visível e infravermelho do espectro eletromagnético (Tabela 1.2), recomendadas pelo CIPM [2], e materializadas por fontes de lasers emitindo nos respectivos comprimentos de onda e frequências.

Em 1982 e 1984, Kruzhlov, Zaistev, Parfenov e Petrunkin observaram pela primeira vez as linhas de absorção e a estrutura hiperfina do I_2 em 532 nm, usando a radiação de frequência dobrada de um laser Nd:YAG [49]. Em 1993, Ady Arie e Robert L. Byer [45], mediram o espectro molecular do Iodo e determinaram pela primeira vez as constantes hiperfinas de diversas transições rotacional-vibracionais perto de 532 nm do $^{127}I_2$. Desde então, foram feitos progressos

significativos no desenvolvimento de lasers estabilizados em frequência neste comprimento de onda.

No encontro do Comitê Consultivo para a Definição do Metro (CCDM²- *Consultative Committee for the Definition of the Meter*) de 1997, a radiação de frequência dobrada de um laser Nd:YAG, estabilizado em frequência sobre as transições R(56)32-0 da molécula absorvida de ¹²⁷I₂, foi incluída na lista de radiações recomendadas pelo CIPM para a realização prática da definição do metro (ver Tabela 1.2). Os valores da frequência $f=563\,223\,480$ kHz e de comprimento de onda $\lambda=532\,245\,036,14$ fm com uma incerteza padrão relativa de 7×10^{-11} foram recomendadas para a componente a_{10} da transição R(56) 32-0 do iodo em célula externa ao laser, tendo uma temperatura no dedo frio da célula de entre -10°C e -20°C.

Em 1999 foi realizada a primeira comparação internacional de lasers Nd:YAG estabilizados em I₂ entre o NRLM³ (Japão), JILA⁴ (EUA) e NIST⁵(EUA), onde a estabilidade alcançada para a componente a_{10} da linha R(56)32-0 do espectro do I₂, foi de 2×10^{-14} num tempo de integração de 300 s [30].

Após a revisão da lista de radiações para a estabilização da frequência na reunião do CCL em 2001, os novos valores revisados foram de $f=563\,260\,223\,513$ kHz e $\lambda=532\,245\,036,104$ fm com uma incerteza padrão relativa de $8,9 \times 10^{-12}$ aplicados para a componente a_{10} da transição R(56) 32-0 com uma temperatura do dedo frio de -15°C (Ver Tabela 1.2 - radiação 1.6).

² CCDM (*Consultative Committee for the Definition of the Meter*) agora Comitê Consultivo para o Comprimento (CCL- *Consultative Committee for Length*)

³ NRLM - National Research Laboratory of Metrology.

⁴ JILA – Joint Institute for Laboratory Astrophysics.

⁵ NIST – National Institute of Standards and Technology.

Tabela 1.2. Lista de radiações recomendadas pelo CIPM 2001 [2], no quadro se pode observar a radiação da componente a₁₀ de R(56)32-0 assim como as condições dos parâmetros à que foi estabilizado o laser.

Lista de radiações recomendadas pelo CIPM para estabilização de lasers	
1.1 Absorção do íon $^{115}\text{In}^+$ da transição: $5s^2\ ^1S_0 - 5s5p\ ^3P_0$. Os valores: $f=1\ 267\ 402\ 452\ 899.92\ \text{kHz}$ $\lambda=236\ 540\ 853.549\ 75\ \text{fm}$.	1.7 Absorção da molécula de $^{127}\text{I}_2$, componente a_{16} ou f da transição $R(127) 11-5$. Os valores: $f=473\ 612\ 353\ 604\ \text{kHz}$ $\lambda=632\ 991\ 212.58\ \text{fm}$
1.2 Absorção do átomo ^1H , da transição de dois fótons $1S-2S$. Os valores: $f=1\ 233\ 030\ 706\ 593.55\ \text{kHz}$ $\lambda=243\ 134\ 624.626\ 04\ \text{fm}$	1.8 Absorção do átomo ^{40}Ca , da transição $^1S_0 - ^3P_1, \Delta m_J=0$ Os valores: $f=455\ 986\ 240\ 494\ 150\ \text{Hz}$ $\lambda=657\ 459\ 439.291\ 67\ \text{fm}$
1.3 Absorção do íon $^{199}\text{Hg}^+$, da transição: $5d^{10} 6s\ ^2S_{1/2} (F=0) - 5d^9 6s^2\ ^2D_{5/2} (F=2) \Delta m_F=0$ Os valores: $f=1\ 064\ 721\ 609\ 899\ 143\ \text{Hz}$ $\lambda=281\ 568\ 867.591\ 969\ \text{fm}$	1.9 Absorção do íon $^{88}\text{Sr}^+$ da transição: $5\ ^2S_{1/2} - 4\ ^2D_{5/2}$. Os valores: $f=444\ 779\ 044\ 095.5\ \text{kHz}$ $\lambda=674\ 025\ 590.8631\ \text{fm}$.
1.4 Absorção do íon $^{171}\text{Yb}^+$ da transição $6s\ ^2S_{1/2} (F=0, m_F=0) - 5d\ ^2D_{3/2} (F=2, m_F=0)$ Os valores: $f=688\ 358\ 979\ 309\ 312\ \text{Hz}$ $\lambda=435\ 517\ 610.739\ 69\ \text{fm}$	1.10 Absorção do átomo ^{85}Rb , da transição de dois fótons: $5S_{1/2} (F_g=3) - 5D_{5/2} (F_e=5)$ Os valores: $f=385\ 285\ 142\ 375\ \text{Hz}$ $\lambda=778\ 105\ 421.23\ \text{fm}$
1.5 Absorção do íon $^{171}\text{Yb}^+$ da transição $^2S_{1/2} (F=0, m_F=0) - ^2F_{7/2} (F=3, m_F=0)$ Os valores: $f=642\ 121\ 496\ 772.6\ \text{kHz}$ $\lambda=466\ 878\ 090.061\ \text{fm}$	1.11 Absorção da molécula de $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$, da transição $P(16)(\nu_1+\nu_3)$. Os valores: $f=194\ 369\ 569.4\ \text{MHz}$ $\lambda=1\ 542\ 383\ 712\ \text{fm}$
1.6 Absorção da molécula de $^{127}\text{I}_2$, componente a_{10} da transição R(56) 32-0 Os valores: $f=563\ 260\ 223\ 513\ \text{kHz}$ $\lambda=532\ 245\ 036.104\ \text{fm}$ Com uma incerteza padrão relativa de 8.9×10^{-12} aplicado à radiação de um laser Nd:YAG dobrado em frequência, estabilizado com uma célula de iodo externa ao laser, sujeito às condições: <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura do dedo frio $(-15 \pm 1)^\circ\text{C}$ • Largura de modulação de frequência, pico a pico, $(1 \pm 0.2)\ \text{MHz}$ para casos de detecção 3f. • Intensidade do feixe saturante de $(17 \pm 11)\ \text{mW cm}^{-2}$. 	1.12 Absorção da molécula CH_4 , componente $F^{(2)}_2$ da transição $P(7) \nu_3$ Os valores: $f=88\ 376\ 181\ 600.18\ \text{kHz}$ $\lambda=3\ 392\ 231\ 397.327\ \text{fm}$
	1.13 Absorção da molécula OsO_4 , da transição $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$, coincidente com a linha do laser R(10) $(00^0_1) - (10^0_0)$. Os valores: $f=29\ 054\ 057\ 446\ 579\ \text{Hz}$ $\lambda=10\ 318\ 436\ 884.460\ \text{fm}$

1.3. Realização do metro no Brasil

O Inmetro possui hoje dois sistemas de lasers na região do vermelho (633 nm), considerados padrões primários de frequência rastreados ao BIPM. Estes padrões primários são lasers Hélio–Neônio estabilizados a uma frequência de aproximadamente 473 612 353,604 MHz por meio de absorção molecular da transição hiperfina denominada “f” (ou a_{16}) da linha R(127)11-5, da molécula de $^{127}\text{I}_2$ (radiação 1.7 da Tabela 1.2). O comprimento de onda no vácuo (λ) desta frequência é a referência com o valor 632,99121258 nm e com uma incerteza padrão relativa de $2,1 \times 10^{-11}$. Estes padrões primários são utilizados como padrões de frequência óptica para calibrar, por comparação, outras fontes de radiação. As fontes de radiação calibradas (por ex. lâmpadas espectrais) são empregadas em sistemas de medições interferométricas, como os que calibram os padrões de comprimento materializados (por ex. blocos padrão), os que por sua vez servem para dar rastreabilidade metrológica aos diferentes ramos da indústria.

1.4. Motivação

O aumento do número de radiações possíveis para a realização do metro ao longo do tempo tem contribuído para preencher as necessidades em várias áreas de investigação como metrologia dimensional, espectroscopia de alta resolução, espectroscopia atômica e molecular, etc. Vários laboratórios nacionais de metrologia de diversos países têm desenvolvido sistemas de lasers estabilizados em frequência em torno de 532 nm que são usados como padrões de referência metrológica em frequência [20], [31], [35]. O uso de lasers Nd:YAG dobrados em frequência apresenta diversas vantagens como por exemplo: melhor estabilidade em duas ordens de grandeza quando comparada àquela desenvolvida por lasers de He-Ne [3-4], o tamanho compacto (podem ser transportados), a baixa frequência intrínseca e baixa intensidade de ruído que facilitam sua estabilização, os grandes níveis de potência que oferecem, as saídas simultâneas de dois comprimentos de

onda (1064 nm no infravermelho e 532 nm no visível) e o tempo de vida longo. Existe uma demanda crescente dos usuários da indústria para referências de comprimento com melhor exatidão na calibração de ferramentas, usadas na caracterização de sistemas de alta precisão e alinhamento (ex. “laser trackers”), o que tem incentivado ao Inmetro estender a materialização do metro a uma radiação da lista recomendada pelo CIPM, especificamente a radiação 1.6 da Tabela 1.2. Por outro lado, o desenvolvimento deste novo padrão poderá subsidiar a participação do Inmetro em mais comparações internacionais, amparadas pelo MRA – *Mutual Recognition Arrangement*. A implementação deste novo padrão permitirá, após comparação internacional, a inserção de um novo serviço.

1.5.

Objetivo

O objetivo desta dissertação é materializar a definição do metro, construir um novo padrão de referência em frequência, usando a radiação verde em 532 nm. Este novo padrão será feito mediante a montagem de um sistema composto por um laser Nd:YAG dobrado em frequência, estabilizado em frequência em torno de 532 nm. A estabilização desenvolvida pelo método de espectroscopia de absorção saturada, especificamente pela técnica dita "3f" [43], é feita em uma das componentes hiperfinas das radiações das transições do I_2 recomendadas pelo CIPM. O método consiste em modular a frequência do laser e em detectar o terceiro harmônico do sinal.

O novo padrão de frequência construído substituirá as lâmpadas espectrais que são usadas para calibrar os blocos padrão. As lâmpadas espectrais apresentam desvantagens (baixa coerência em comparação aos lasers) que acrescentam incerteza de medição e diminuem a exatidão dos blocos padrão. A calibração dos blocos com o novo padrão melhorará sua incerteza de medição e sua rastreabilidade na cadeia metrológica de comprimento no Brasil. O uso simultâneo do novo padrão de 532 nm com o padrão de 633 nm já existente ajudará a desenvolver novas pesquisas como, por exemplo, em tempo e frequência [48].

1.6. Definições metrológicas

Neste item são apresentados alguns conceitos metrológicos do Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) [1], considerados relevantes para o entendimento do texto deste trabalho.

Exatidão

Grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro de um mensurando.

Grandeza

Propriedade de um fenômeno, de um corpo ou de uma substância, que pode ser expressa quantitativamente sob a forma de um número e de uma referência.

Incerteza de medição

Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.

Incerteza-padrão

Incerteza de medição expressada na forma de um desvio-padrão.

Incerteza-padrão relativa

Incerteza-padrão dividida pelo valor absoluto do valor medido.

Mensurando

Grandeza que se pretende medir.

Padrão

Realização da definição de uma dada grandeza, com um valor determinado e uma incerteza de medição associada, utilizada como referência.

Padrão primário

Padrão estabelecido com auxílio de um procedimento de medição primário ou criado como um artefato, escolhido por convenção.

Padrão de transferência

Padrão designado para a calibração de outros padrões de grandezas do mesmo tipo em uma dada organização ou local.

Princípio de medição

Fenômeno que serve como base para uma medição.

Rastreabilidade metrológica

Propriedade de um resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição.

1.7.

Organização do documento

O conteúdo deste trabalho está composto por 4 capítulos, a saber:

Capítulo I: Apresenta uma breve introdução à metrologia de comprimento, assim como um breve contexto da história de evolução dos diferentes padrões de comprimento.

Capítulo II: Apresenta os aspectos teóricos que explicam as diferentes etapas do processo de estabilização do novo padrão de comprimento. Este capítulo apresenta a teoria fundamental do espectro molecular característico de molécula diatômica mais comumente observada envolvendo as transições eletrônicas, vibracionais ou rotacionais. A informação lida neste capítulo será útil para interpretar os resultados experimentais obtidos nas diferentes fases da montagem experimental do desenvolvimento do padrão de referência metrológica.

Capítulo III: Apresenta as diferentes etapas da parte experimental desenvolvida durante a montagem do novo padrão de comprimento. Numa primeira etapa se faz uma análise das características dos principais componentes e equipamentos utilizados na montagem. O processo de caracterização dos diferentes equipamentos como o laser Nd:YAG, o isolador óptico e o “*wavemeter*” é apresentado, assim como os diferentes alinhamentos dos componentes ópticos. Já numa segunda etapa se fez a montagem de um sistema de resfriamento para resfriar e controlar a temperatura da célula de iodo, onde a montagem foi acompanhada de um processo de caracterização e análise quantitativa das componentes do sistema de resfriamento. Para o registro dos dados de

caracterização e resfriamento foram desenvolvidos alguns programas em Lab View.

Capítulo IV: São expostas as principais conclusões das etapas concluídas do trabalho assim como as perspectivas futuras.

Apêndices: São apresentados documentos como tabelas e descrições matemáticas que sustentam alguns itens da dissertação.