



**Elizabeth Vilcañaua Raymundo**

**Desenvolvimento de um padrão de referência metrológica  
de frequência laser em torno de 532 nm**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para a Qualidade e Inovação.

Orientadoras: Prof<sup>a</sup>. Isabel C. S. Carvalho, Dra.  
Hakima Belaidi, Dra.

Rio de Janeiro, setembro de 2009



**Elizabeth Vilcañaupa Raymundo**

**Desenvolvimento de um padrão de referência metrológica  
de frequência laser em torno de 532 nm**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da  
PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo  
assinada.

**Prof<sup>a</sup>. Isabel Cristina dos Santos Carvalho, Dra.**

Orientadora  
Departamento de Física  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

**Hakima Belaidi, Dra.**

Orientadora  
INMETRO – Instituto de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

**Iakya Couceiro, Ms.**

INMETRO – Instituto de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

**Luiz Vicente Gomes Tarelho, Dr.**

INMETRO – Instituto de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

**Prof<sup>a</sup>. Elisabeth Costa Monteiro, Dra.**

Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI)  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

**José Eugenio Leal, Dr.**

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do  
Centro Técnico Científico (PUC-Rio)

Rio de Janeiro, 17 de setembro de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

### **Elizabeth Vilcañaua Raymundo**

Graduou-se em Física na UNAC-Perú (Universidade Nacional do Callao) em 2002.

Coordenadora de Qualidade do Laboratório de Metrologia do Serviço de Eletrônica (SELEC) da Força Aérea do Peru (2002-07).

#### Ficha Catalográfica

Vilcañaua, Raymundo Elizabeth

Desenvolvimento de um padrão de referência metrológica de frequência laser em torno de 532 nm / Elizabeth Vilcañaua Raymundo; orientadoras: Isabel C. S. Carvalho, Dra. Hakima Belaidi, Dra. – 2009.

97 f.: il. (color.); 30 cm

Dissertação (Mestrado em Metrologia para a Qualidade e Inovação) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui referências bibliográficas e apêndices

1. Metrologia - Teses. 2. Laser Nd:YAG dobrado em frequência. 3. Caracterização do laser. 4. Estabilização de frequência laser. 5. Componentes hiperfinas do iodo molecular  $^{127}\text{I}_2$ . 6. Padrão de frequência óptico em 532 nm. I. Carvalho, Isabel C. S. II. Belaidi, Hakima. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. IV. Título.

CDD:389.1

Dedicado:  
À minha família, em especial aos meus pais, Silvia e Gerardo, pelo exemplo de  
coragem e persistência. A Luciano pelo seu amor e apoio incondicional.

## Agradecimentos

À minha orientadora, Hakima Belaidi pela oportunidade que me deu de trabalhar ao seu lado no desenvolvimento deste projeto e por todas suas orientações, confiança e amizade.

À minha orientadora, professora Isabel Carvalho pela confiança, dedicação e amizade brindada ao longo deste tempo.

À minha banca examinadora.

Ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação (PósMQI) e a seu coordenador professor Mauricio Frota pela oportunidade de desenvolvimento profissional.

À Divisão de Metrologia Óptica (Diopt) do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – Inmetro pela oportunidade de participação no desenvolvimento deste projeto e pelo ambiente favorável para sua realização.

À colaboração e amizade do todo o pessoal da Diopt em especial ao Dr. Luiz Vicente Gomes Tarelho pela sua constante ajuda e colaboração na revisão e correção desta dissertação.

À PUC-Rio, ao CNPq e à Faperj pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não teria sido realizado.

Ao Instituto Nacional de Metrologia (LNE/INM) da França pela orientação e apoio técnico.

Aos meus pais e irmãos pelo imensurável amor e incessante apoio durante esta jornada.

Ao meu amado Luciano, pela paciência, cuidado e amor que sempre tem comigo.

À família de Luciano por me receber de braços abertos e me dar carinho e amizade.

A meus amigos de hoje e sempre pela sua torcida e seu carinho.

## Resumo

Vilcañaupa, Raymundo Elizabeth; Belaidi, Hakima; Carvalho, Isabel C. S. **Desenvolvimento de um padrão de referência metrológica de frequência laser em torno de 532 nm.** Rio de Janeiro, 2009. 97p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Metrologia para Qualidade Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho faz parte do projeto do desenvolvimento do primeiro padrão de referência metrológica de frequência em torno de 532 nm no Brasil, para a realização prática da definição do metro. A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Interferometria (Laint) da Divisão de Metrologia Óptica do Inmetro, em convenio com o Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade Industrial da PUC-Rio. No âmbito deste projeto, a realização de uma nova referência em comprimento/frequência é feita mediante a estabilização de um laser comercial Nd:YAG emitindo uma radiação em torno de 532 nm. A estabilização é realizada numa componente hiperfina de uma transição do iodo molecular  $^{127}\text{I}_2$ , segundo as recomendações do Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM- *Comité International des Poids et Mesures*). O vapor de iodo é contido numa célula externa de absorção resfriada à uma temperatura entre -10 °C e -15 °C. Neste trabalho são apresentadas as seguintes etapas do projeto: Montagem opto-mecânica do sistema e alinhamentos ópticos. Detecção e registro dos sinais de absorção com célula à temperatura ambiente correspondendo às transições do iodo em torno de 532 nm. Caracterização do laser Nd:YAG ou seja determinação da frequência de emissão laser em função da temperatura  $T_{LC}$  do cristal laser, utilizando para este fim um medidor de comprimento de onda (*wavemeter*). Medições preliminares do sistema de resfriamento e de regulação da temperatura da célula de iodo por meio de um dispositivo termoelétrico Peltier. O controle automático duma temperatura teste de -13°C é realizado via programação LabView.

## Palavras-chave

Metrologia. Laser Nd:YAG dobrado em frequência. Caracterização do laser. Estabilização de frequência laser. Componentes hiperfinas do iodo molecular  $^{127}\text{I}_2$ . Padrão de frequência óptico em 532 nm.

## Abstract

Vilcañaupa, Raymundo Elizabeth; Belaidi, Hakima; Carvalho, Isabel C. S. **Development of a metrological standard laser frequency reference at 532 nm.** Rio de Janeiro, 2009. 97p. MsC Dissertation - Departamento de Metrologia para Qualidade Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work is part of the project for development of the first metrology reference for frequency standard around 532 nm in Brazil for the practical realization of the definition of the meter. The study was conducted at the Laboratory Interferometry (Laint) Inmetro, through an agreement with the Post-graduation Program in Metrology for Quality Industrial, PUC-Rio. In the scope of this project, the realization of a new reference length/frequency is made by the stabilization of a commercial laser Nd:YAG emitting radiation around 532 nm. The stabilization is performed on a component of a hyperfine transition of molecular iodine  $^{127}\text{I}_2$ , according to the recommendations of the International Committee of Weights and Measures (CIPM- *Comité International des Poids et Mesures*). The iodine vapor is contained in an external absorption cell cooled to a temperature between  $-10^\circ\text{C}$  and  $-15^\circ\text{C}$ . This work presents the following stages of the project: Opto-mechanical assembly of the system and optical alignments. Detection and recording of signals with absorption cell at room temperature corresponding to iodine transitions around 532 nm. Characterization of Nd: YAG laser that is determining the frequency of the laser emission as a function of laser crystal temperature  $T_{\text{LC}}$ , using for this purpose a meter wavelength (*wavemeter*). Preliminary measurements of the cooling system and temperature regulation of the iodine cell by a Peltier thermoelectric device. The automatic control of a test temperature of  $-13^\circ\text{C}$  is achieved via LabView programming.

## Keywords

Metrology. Nd:YAG laser doubled in frequency. Characterization of the laser. Stabilization of laser frequency. Hyperfine components of molecular iodine  $^{127}\text{I}_2$ . Optical frequency Standard at 532 nm.

## Sumário

1 Introdução	16
1.1. Contexto Metrológico	16
1.2. Contexto histórico da definição do metro (m), como unidade de medida de comprimento.	17
1.3. Realização do metro no Brasil	21
1.4. Motivação	21
1.5. Objetivo	22
1.6. Definições metrológicas	23
1.7. Organização do documento	24
2 Fundamentos Teóricos	26
2.1. Molécula de Iodo	26
2.2. Transições eletrônicas na molécula de iodo	28
2.3. Transições Hiperfinas da molécula de Iodo	31
2.4. Alargamento de linha de transição	34
2.5. Espectroscopia de absorção saturada livre de Doppler	37
2.6. Técnica da detecção $3f$	39
3 Montagem Experimental	45
3.1. Descrição Geral	45
3.2. Sistema de Excitação (SE) Nd-YAG	48
3.2.1. Caracterização do laser Nd:YAG	49
3.3. Alinhamentos Ópticos (SAO)	59
3.3.1. Alinhamento do isolador ótico, (AIO)	59
3.3.2. Colimador Ótico de duas lentes (CO2)	61
3.3.3. Alinhamento do feixe refletido na célula (AFR)	63
3.4. Sistema de Resfriamento da Célula (SRC)	64
3.4.1. Célula de Iodo	65
3.4.2. Sistema de Resfriamento	67



3.5. Sistema de Detecção (SD)	79
4 Conclusões e Perspectivas	80
4.1. Conclusões	80
4.2. Perspectivas	81
5 Referências Bibliográficas	83
Apêndice A: Cristal Nd:YAG	88
Apêndice B: Verificação do Wavemeter WA-1500 Burleigh	89
Apêndice C: Colimador Ótico de duas lentes	92
Apêndice D: Cálculo de características do TE	95
Apêndice E: Funcionamento de um módulo Peltier	97

## Lista de figuras

Figura 2.1. Orbitais moleculares da molécula de iodo [16].	27
Figura 2.2. Curva de energia potencial para o I <sub>2</sub> . A figura mostra o espectro das componentes vibracionais em forma de dente de serra resultado da superposição entre as bandas das transições (v'-0), (v'-1) e (v'-2), sendo a superposição maior no meio da região.	28
Figura 2.3. Níveis vibracionais (v) e rotacionais (J) de dois estados eletrônicos de uma molécula de iodo. As três setas indicam (da esquerda para a direita) transições rotacional, rotacional-vibracional e eletrônica da molécula.	29
Figura 2.4. Bandas da estrutura fina rotacional de uma molécula diatômica.	30
Figura 2.5. Intensidade de saturação e temperatura como uma função da pressão de iodo para a transição R(127). Curva sólida intensidade de saturação em função da pressão. Curva tracejada temperatura correspondente do dedo frio da célula de iodo. [56]	36
Figura 2.6. Perfil Voigt como uma convolução de linhas de forma Lorentziana, $L(v_0-v_i)$ e Gaussiana (Doppler) com $v_i = v_0(1 - V_{zi}/c)$ .	37
Figura 2.7. Esquema de feixe contrapropagante dentro de uma célula de iodo. Molécula com velocidade Vz	38
Figura 2.8. Saturação de um perfil de linha não homogêneo (deslocamento Doppler) (a). Diferença de população $\Delta N_i$ dos estados superior e inferior como função da frequência óptica $\nu$ . Os buracos Bennet nos lados da curva correspondem às variações de frequência Doppler (b). Lamb dip no centro do perfil de absorção $\alpha(\nu)$ .	39
Figura 2.9. (a) Perfil da linha Lorentziana $\alpha(\nu)$ da largura a meia altura $\gamma$ (FWHM) com (b) primeira, (c) segunda, e (d) terceira derivada.	43
Figura 3.1. Montagem experimental. SE: Sistema de Excitação laser Nd:YAG. SAO (Sistema para Alinhamentos Óticos): CO2 (Colimador Óptico de duas Lentes), AIO (Alinhamento do Isolador ótico), AFR	

(Alinhamento do Feixe Refletido na célula). SRCI: Sistema de Resfriamento da Célula de Iodo; SD: Sistema de detecção.	47
Figura 3.2. Sistema Laser Nd:YAG: (a) Cabeça do laser, (b) Unidade de controle eletrônico [28].	48
Figura 3.3. Esquema da cabeça laser [28],[35]	49
Figura 3.4. (a). Painel frontal e (b). Painel posterior da unidade controle eletrônico do laser Prometheus.	50
Figura 3.5. Alinhamento dos feixes.	51
Figura 3.6. Visualização de uma transição hiperfina com rampa aplicada na PZT do laser. (Foto LNE/INM- França)	54
Figura 3.7. Esquema da montagem para varredura de frequência do laser e detecção do sinal de absorção	55
Figura 3.8. Parte da rampa do sinal no osciloscópio. Frequência da rampa: 0,5 mHz. Faixa de temperatura varrida: 23°C ate 33°C.	56
Figura 3.9. Programa em Labview para aquisição do sinal de potência detectado após interação com a célula de iodo. Tempo de integração: 1000 ms.	57
Figura 3.10. .Fig. (a) Potencia em função do tempo.em dois ciclos de varredura Fig.(b) Potencia em função da Temperatura num ciclo de varredura (21°C a 33°C). As Transições das duas figuras correspondem às fluorescências observadas a olho nu, dentro da célula de iodo, quando variamos a temperatura TLC. Podemos observar algumas repetições de picos que correspondem provavelmente a pulos de modos dentro da cavidade laser, conforme aparecem no Gráfico 3.1..	58
Figura 3.11. Montagem do Isolador ótico.	59
Figura 3.12. Esquema de um Isolador Ótico	60
Figura 3.13. Alinhamento do isolador óptico, (a) Isolador Ótico invertido, (b) partes do Isolador óptico.	60
Figura 3.14. Montagem óptica para aumentar o diâmetro do feixe	62
Figura 3.15. Linhas de absorção da molécula de iodo em torno de 532 nm[28].	64
Figura 3.16. Célula de absorção de iodo com “dedo frio”.	65

Figura 3.17. Pressão de células de absorção de diferentes comprimentos vs força de sinal. A linha tracejada é o a máximo sinal calculado [41].	66
Figura 3.18. Esquema do Sistema de Resfriamento.	67
Figura 3.19. (a). Módulo Peltier de dois estágios, (b). Funcionamento do módulo Peltier:	68
Figura 3.20. $\Delta T$ vs o COP max. em função do número de estágios num Peltier.	70
Figura 3.21. (a) Dimensões do dissipador de cobre, (b) Mecanismo de fluxo de calor num dissipador de calor por convecção natural.	72
Figura 3.22. Conexões do TE e do Termistor no conector do controlador de temperatura.	73
Figura 3.23. (a) Isolamento do cilindro de cobre, (b) Célula resfriada (foto LNE-INM-França).	73
Figura 3.24. Energia perdida vs espessura do isolador [44]	74
Figura 3.25. Monitoramento da temperatura via Programa LabView. Tempo de integração: 0.5 ms	75
Figura 3.26. Sistema de resfriamento: 1. Cilindro de cobre; 2. TE; 3. Termistor; 4. Dissipador de cobre; 5. Controlador de temperatura de precisão; 6. Caixa de isopor para isolamento térmico; 7. Pasta térmica.	76
Figura 3.27. Auto - ajuste (PID) em $-13^{\circ}\text{C}$	77
Figura 3.28. (a) Início do processo de resfriamento, (b) Estabilização da temperatura no processo de resfriamento, (c) Estabilização da temperatura a longo prazo	78

## Lista de tabelas

Tabela 1.1. Grandezas e unidades de base do SI [55].	17
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.	20
Tabela 2.1. Componentes hiperfinas do ramo R(56) [2].	33
Tabela 3.1. Valores medidos de frequência pelo fabricante e pelo laboratório.	53

## Lista de Gráficos

Gráfico 3.1. Comportamento da frequência do laser em função da temperatura do cristal laser TLC, (a) Medidas do fabricante; (b) Medidas do laboratório.	52
Gráfico 3.2. Comparação de alguns valores das frequências medidas entre o fabricante e o laboratório.	53
Gráfico 3.3. Comparação das medidas de frequência do laser nas configurações NIR e VIS do wavemeter.	54
Gráfico 3.4. Análises da distância entre duas lentes para uma distância colimada	63
Gráfico 3.5. Raio do diâmetro do feixe $w(z)$ de propagação no ar do laser Nd:YAG em função de $z$ .	63

## Siglas e Abreviaturas

BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
CGPM	Conférence Générale des Poids et Mesures
CIPM	Comité International des Poids et Mesures
COP	Coefficient of Performance
Diop	Divisão de Óptica – Inmetro
GPIB	General Purpose Interface Bus
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.
JILA	Joint Institute for Laboratory Astrophysics
LCAO	Linear Combination of Atomic Orbit
MO	Molecular Orbital
Nd-YAG	Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet
NIST	National Institute of Standards and Technology
NPRO	Non Planar Ring Oscillator
NRLM	National Research Laboratory of Metrology
PCBS	Polarizing Cube Beamsplitter
PPKTP	Periodically Poled Potassium Titanyl Phosphate
TDC	Temperature Doubling Crystal
T <sub>LC</sub>	Temperature Laser Crystal