

Construção e Avaliação do Relógio Atômico Brasileiro

F. Teles, D.V. Magalhães, M.S. Santos, A. Bebechibuli, F.L. Ribeiro e V.S. Bagnato

Instituto de Física de São Carlos, USP/SC

Caixa Postal 369 São Carlos/SP 13560-970 Brazil

Tel: 55 16 2712012 Fax: 55 16 2713616

vander@if.sc.usp.br monica@if.sc.usp.br fteles@if.sc.usp

Recebido em 22 de fevereiro, 2002.

Esse trabalho retrata o esforço que vem sendo feito para estabelecermos metrologia científica de tempo e frequência em nosso país. Em 1967, o segundo passou a ser definido como a duração de 9192631770 períodos da transição correspondente a oscilação do átomo de ciclos da radiação necessária para ^{133}Cs entre os dois níveis do estado fundamental. Desde então, aumentou a corrida para a obtenção de relógios atômicos que medissem tal frequência com melhor precisão. Os relógios mais exatos atualmente fazem uso de técnicas sofisticadas de manipulação atômica e alcançam precisão de 10^{-15} , abrindo as portas para vários testes que até então não eram factíveis. Apesar de nosso objetivo final ser a construção de um relógio atômico tipo chafariz, nosso primeiro passo foi a construção e avaliação de um relógio atômico a feixe térmico com vistas à criação de recursos humanos com capacitação nesse domínio. Nesse trabalho descrevemos esta parte do projeto.

I Introdução

Nos últimos anos temos concentrado esforços para desenvolver a metrologia científica de tempo e frequência em nosso país. Esse projeto é um programa a longo termo e que provavelmente levará mais de uma década para que um número razoável de profissionais estejam engajados nesse assunto. O passo inicial deste projeto foi a construção de um relógio atômico a feixe térmico de ^{133}Cs , um padrão primário de tempo. Nesse trabalho descreveremos o nosso padrão, seu princípio de funcionamento e apresentaremos a avaliação da estabilidade e exatidão, considerando todos os deslocamentos de frequência característicos de relógios atômicos a feixe térmico.

A capacitação em metrologia científica, em especial de tempo e frequência, é considerada estratégica, para o nosso país, em função dos investimentos na indústria aeronáutica e do excelente parque industrial com mercado externo a ser conquistado. A projeção do Brasil no mercado mundial está vinculada ao tratamento dado à metrologia em âmbito nacional. A certificação de nossos produtos, de acordo com as normas metrológicas e com os sistemas de qualidade, imprime maior credibilidade perante o cenário internacional.

Desde a construção dos primeiros relógios atômicos, na década de 60, muitos avanços tecnológicos surgiram, nos permitindo alcançar níveis de exatidão e estabilidade

até pouco tempo inatingíveis. Com o advento dos osciladores criogênicos, os relógios atômicos a átomos frios já alcançaram estabilidade de 10^{-16} em um dia [1]. O surgimento de fibras ópticas com cavidade interna simplificou os relógios de íons, facilitando sobremaneira a transição entre o regime óptico e o de microonda [2]. O panorama atual dos padrões de frequência permite a realização de testes de física fundamental, que podem vir a corroborar ou revolucionar os pilares da ciência do século XX.

Atualmente vários países são detentores da tecnologia envolvida na construção de um padrão atômico de frequência [3-5]. Nós construímos o primeiro relógio atômico da América Latina com vistas à inclusão do nosso país no conjunto de países detentores dessa tecnologia estratégica. Nosso padrão é operado a laser, baseado no efeito de bombeamento óptico e detecção de fluorescência. Os relógios atômicos baseados na técnica de bombeamento óptico [6] são típicos de laboratórios, enquanto os relógios comerciais operam por deflexão magnética [7]. As vantagens dos primeiros incluem o fato de não haver campo magnético intenso próximo à cavidade de interrogação e, também, que o uso de laser aumenta o número de átomos que participam do processo. Nas seções seguintes, discutiremos o princípio de funcionamento do nosso relógio, bem como os efeitos que mascaram a frequência atômica, introduzindo limites à precisão do relógio.

II Descrição do relógio

A. O sistema experimental

O sistema experimental do relógio está ilustrado na figura 1. A câmara de vácuo foi feita em aço inoxidável e suas dimensões são: 90 cm de comprimento e 20 cm de diâmetro. O sistema é mantido a 10^{-5} Pa através de sistema de pré-vácuo e uma bomba turbomolecular. O forno de ^{133}Cs opera a uma temperatura em torno de 373 K, com controle de temperatura externo. Após o forno há um sistema de colimação (várias placas de aço inoxidável e grafite com orifícios de diâmetros diferentes, da ordem de μm). Após a colimação a divergência do feixe efusivo é de $\simeq 2 \times 10^{-4}$ sterad.

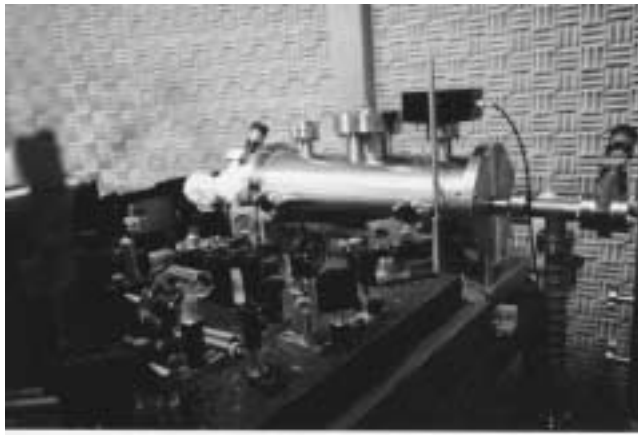


Figura 1. Foto do primeiro relógio atômico a feixe térmico operado a laser da América Latina.

O campo magnético, usado para levantar a degenerescência dos níveis atômicos, é produzido através de um

solenóide posicionado ao longo da cavidade de interrogação. A cavidade de interrogação, cujos detalhes serão discutidos na seção seguinte, também é chamada de cavidade de Ramsey, e é feita de cobre. Para que o aproveitamento dos átomos seja máximo, é fundamental que o forno e a cavidade de interrogação estejam bem alinhados. Esse alinhamento é feito com a ajuda de um feixe laser, garantindo o bom ajuste da cavidade com relação ao forno e, conseqüentemente, ao feixe atômico.

Os átomos no feixe efusivo estão distribuídos nos dois níveis do estado fundamental $6^2\text{S}_{1/2}$. Para que o maior número de átomos participe da medida é preciso recuperar aqueles que saíram do forno no estado não desejado. Conforme está esquematizado na figura 2, os átomos, ao saírem do forno, passam por uma região, chamada região de preparação, antes de entrarem na cavidade. Nessa região, os átomos interagem com um laser ressonante com a transição $6^2\text{S}_{1/2}$ ($F=4$) \rightarrow $6^2\text{P}_{1/2}$ ($F'=4$). Dessa forma, os átomos que saem do forno no estado $F=3$ não interagem com o laser, mas aqueles de $F=4$ sofrem a transição e podem decair para $6^2\text{S}_{1/2}$ $F=3$, que é o estado arbitrariamente escolhido como estado inicial dos átomos. Em seguida, os átomos adentram a região de interrogação, onde está a cavidade de microondas. Essa região está envolta em duas camadas de μ -metal, a fim formar uma blindagem para os campos magnéticos espúrios. Ao deixarem a cavidade, os átomos interagem com um segundo laser, na região de detecção, ressonante com a transição $6^2\text{S}_{1/2}$ ($F=4$) \rightarrow $6^2\text{P}_{1/2}$ ($F'=5$). Os átomos que absorvem esse laser transitam para o estado excitado emitindo fótons ao decaírem para o estado fundamental. Essa emissão de fótons produz uma fluorescência, que é focalizada em um detector de Si através de uma lente e um espelho esférico. Cerca de 20% da luz emitida é detectada. Cada fóton que atinge o detector gera um par elétron-buraco cuja corrente é amplificada e detectada. A corrente detectada é proporcional à fluorescência e, conseqüentemente, ao número de átomos.

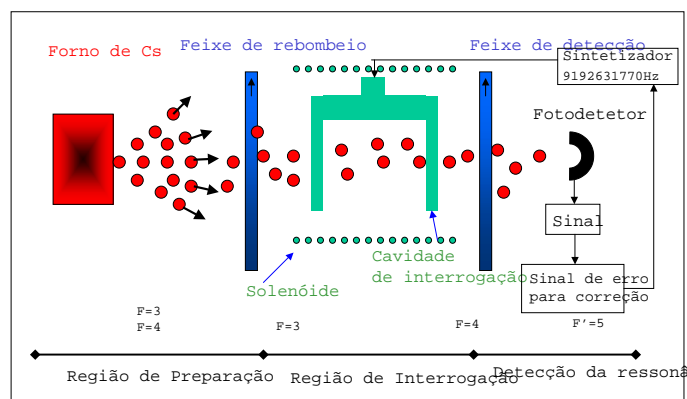


Figura 2. Diagrama com o princípio de funcionamento de um relógio atômico.

B. A cavidade de interrogação e o gerador de microondas

A cavidade de interrogação, feita em cobre, tem o formato de U invertido, conforme esquematizado na figura 2. O comprimento das duas regiões de interrogação, onde os átomos interagem com a radiação, é de 10 mm e a distância entre elas é de 108 mm. O fator de qualidade da cavidade é estimado em 500. A cavidade é ressonante com a transição $6^2S_{1/2} F=3 \leftrightarrow 6^2S_{1/2} F=4$ que corresponde à frequência de 9192631770 Hz. Note que transição pode ser tanto no sentido $F=3 \rightarrow F=4$ quanto no sentido oposto, ou seja, os átomos que entram na cavidade em $F=3$ deixam-na em $F=4$ e vice-versa.

Essa configuração de cavidade, formada por duas regiões (duas pequenas cavidades), foi proposta por N. Ramsey. A proposta surgiu quando o pesquisador estudava maneiras de melhorar a resolução em espectroscopia de feixes moleculares. Assim surgia o que é conhecido atualmente como Método de Ramsey de Campos Oscilantes Separados [8]. Esse método foi aplicado a vários experimentos, mas sua consagração se consolidou com a aplicação aos padrões de frequência. O sinal característico de um relógio atômico é a franja de Ramsey, obtido quando detectamos a população em cada um dos estados, $F=3$ ou $F=4$, como função da frequência do sinal injetado na cavidade. Na verdade, sabemos que o átomo entra na cavidade no nível $F=3$ e sai em $F=4$. Entretanto, não se sabe onde o átomo transitou de um nível para o outro, se na primeira região ou na segunda. A franja de Ramsey é resultado da interferência das probabilidades da transição ter ocorrido em uma ou na outra região. Através do aspecto geral da franja sabemos se o relógio atômico está em condições ideais de operação ou se há algum efeito perturbando a interação dos átomos com a cavidade e, conseqüentemente, a medida da frequência da separação dos dois níveis do estado fundamental $6^2S_{1/2}$. Nos relógios atômico a feixe térmico a distribuição de velocidades dos átomos é larga, da ordem de dezenas de m/s, provocando a superposição de um perfil ao sinal da franja, chamado de pedestal de Rabi. Sendo assim, o sinal de saída de um relógio atômico a feixe térmico é a franja de Ramsey modulada pelo pedestal de Rabi. Nos relógios a átomos frios, a distribuição de velocidades é muito mais estreita e a presença do pedestal de Rabi é menos significativa.

O gerador de microondas usado para alimentar a ca-

vidade foi construído pela equipe do Dr. F. Walls do NIST (National Institute of Standards and Technology, em Boulder-USA) [9] e é constituído de três osciladores de quartzo de frequência 5 MHz, 100 MHz e 10.7 MHz. A modulação necessária para obtermos as franjas de Ramsey é produzida através de um gerador de funções (Stanford DS345), sincronizado com o oscilador de 10,7 MHz. A modulação é introduzida no oscilador de 10,7 MHz, para gerar o sinal de erro que corrige o gerador de microondas, de modo a mantê-lo travado na transição atômica.

Para mantermos o sinal do sintetizador em ressonância com a frequência atômica, varremos o sinal do gerador em torno do máximo da transição. A fim de verificar se a frequência do sintetizador está coincidente com a ressonância atômica, calculamos a derivada do sinal de fluorescência à direita e à esquerda do máximo da transição. A diferença entre essas duas medidas é o sinal de erro, que é introduzido no oscilador de 5 MHz para manter a frequência do gerador em ressonância com a frequência atômica. O sistema é controlado por um programa de computador, desenvolvido no nosso grupo usando o ambiente LabView.

C. O sistema óptico

O laser usado no relógio atômico é um laser de diodo, da série SDL 5410C, controlado em corrente e temperatura e estabilizado em frequência na configuração de cavidade estendida. A estabilização do laser em frequência (ajuste óptico e eletrônico) é eficiente para mantê-lo travado na ressonância desejada durante dias. A largura de linha do laser na configuração de cavidade estendida é ≤ 500 kHz. O laser é travado na transição $6^2S_{1/2} (F=4) \rightarrow 6^2S_{3/2} (F'=5)$ através da técnica de absorção saturada. O feixe passa por um modulador acusto-óptico, como mostrado na figura 3, que opera em 251 MHz. A ordem zero do modulador (ordem não difratada) é utilizada como feixe de detecção dos átomos, enquanto a ordem difratada (-1) é o feixe de preparação dos átomos. Note que a diferença de frequência entre as transições $6^2S_{1/2} F=4 \rightarrow 6^2S_{3/2} F'=5$ e $6^2S_{1/2} F=4 \rightarrow 6^2S_{3/2} F'=4$ é de 256 MHz, conforme mostrado no diagrama de níveis do ^{133}Cs (figura 4).

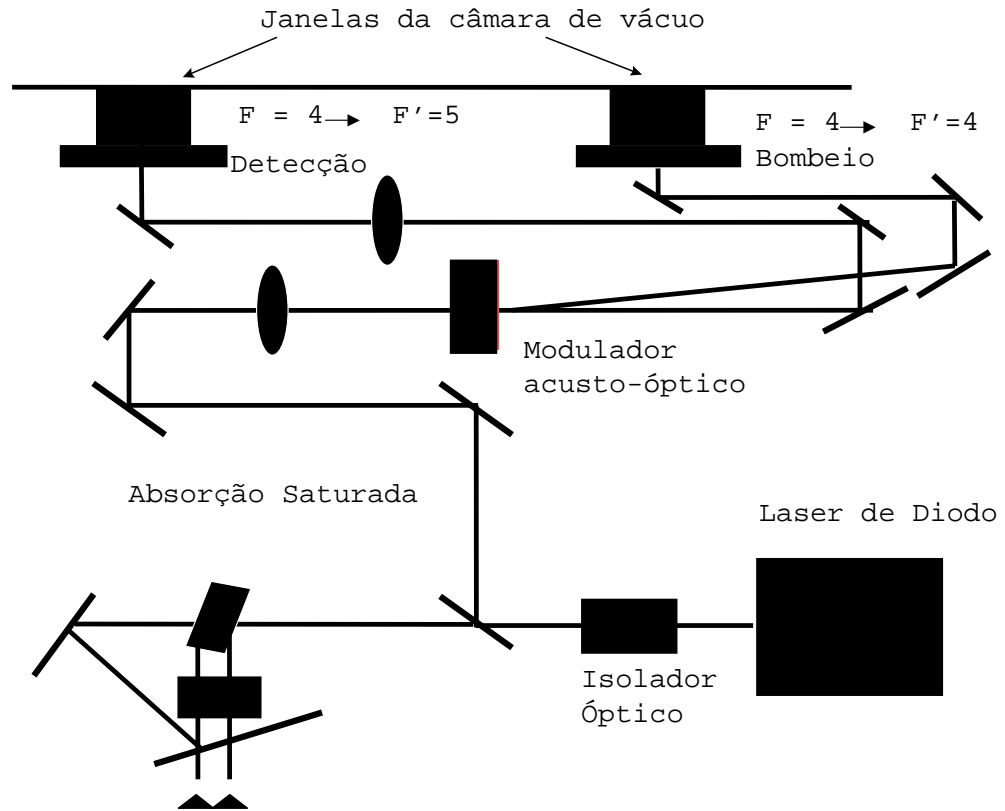


Figura 3. Diagrama da montagem óptica do relógio, com o percurso do feixe laser antes deste entrar na câmara de vácuo, onde ocorre a interação com os átomos.

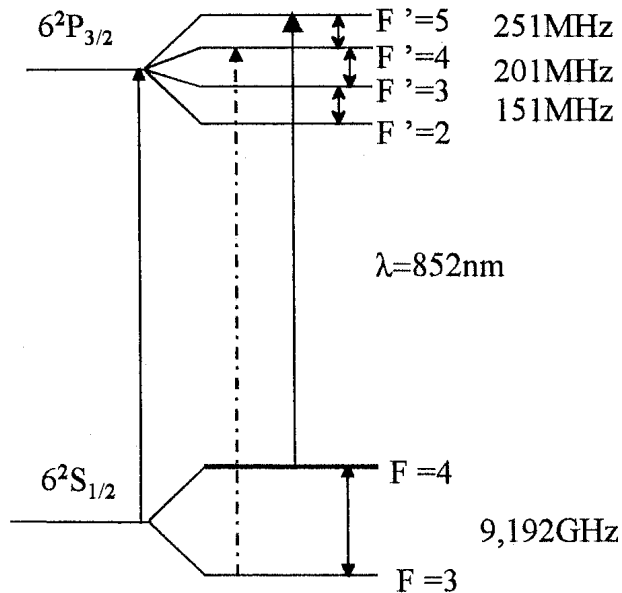


Figura 4. Diagrama de níveis do ^{133}Cs .

Todo o sistema óptico usado no relógio está montado sobre uma base de granito sintético (granisin [10]), projetada para reduzir as vibrações mecânicas. A sala onde estão aco-

modados os relógios é controlada em temperatura e possui um sistema de redução de vibrações mecânicas e acústicas.

D. O programa de controle do relógio atômico

O sinal de erro injetado no oscilador de 5 MHz do sintetizador de frequência é controlado através de um programa desenvolvido em nosso grupo. Esse programa foi baseado em uma versão anterior produzida por G. D. Rovera no LPTF-Paris. Na figura 5 temos o diagrama de blocos que descreve a sequência do programa. O sinal de erro é continuamente produzido de maneira a corrigir o sintetizador a cada duas interrogações dos átomos.

III Resultados Experimentais

Na figura 6 temos a assinatura característica de um relógio atômico, a franja de Ramsey. O espectro completo com as 7 possíveis transições é obtido varrendo-se o sintetizador num intervalo de 540 kHz. Em condições normais de operação o sintetizador funciona com uma pequena varredura, de alguns Hz. Entretanto, é importante periodicamente obtermos esse espectro completo,

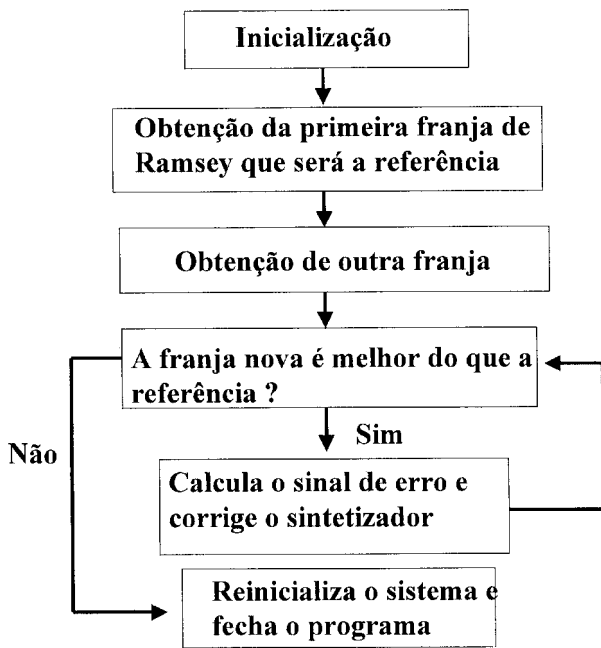


Figura 5. Diagrama de blocos do programa de controle do relógio.

pois ele é um indicativo das condições de operação do relógio. Por exemplo, a simetria das franjas com relação à franja central indica se há campo magnético estático perturbando os átomos. A franja central é a mais importante dentre as 7 pois é sobre ela que travamos o relógio. A separação entre as franjas de Ramsey é proporcional ao campo magnético estático presente na região de interrogação, cuja função é criar um eixo de quantização e levantar a degenerescência dos níveis atômicos. A dependência da frequência atômica com o campo magnético é dada pela fórmula de Breit-Rabi [11]. Pela figura 6 podemos concluir que o campo magnético estático aplicado é: $B_0 = (130.99 \pm 0.98)$ mG.

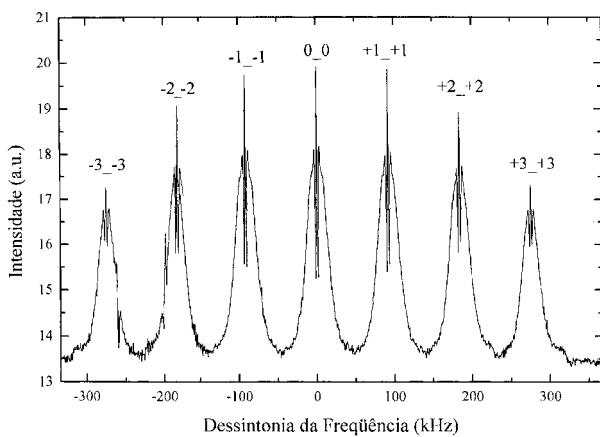


Figura 6. Franja de Ramsey do relógio atômico. Espectro com as sete possíveis transições.

A. Principais deslocamentos de frequência

Os padrões de frequência atômica possuem duas características principais envolvendo vários efeitos: a estabilidade e a exatidão. A estabilidade é a propriedade que o padrão possui de fornecer o mesmo sinal em um dado intervalo de tempo. A exatidão é a medida do quão bem conhecemos a frequência medida pelo padrão atômico face à influência que os efeitos perturbadores provocam na medida da frequência do átomo. Os fatores mais importantes que contribuem para o deslocamento de frequência nos relógios atômicos a feixe térmico incluem: campo magnético, efeito Doppler, diferença de fase entre os campos nas duas regiões de interrogação, potencial gravitacional, dessintonia da cavidade, deslocamento luminoso, transições de Majorana entre outros [11].

Dentre os efeitos mencionados acima, o campo magnético é o mais significativo. A presença de um campo magnético desloca a ressonância (devido ao efeito Zeeman) proporcionalmente à magnitude do campo. Nas condições em que o relógio opera, o deslocamento medido é $\Delta\nu_{B_0}/\nu_0 = (7.978 \pm 0.119) \times 10^{-10}$. A incerteza na medida advém da determinação do centro da franja, bem como da instabilidade da fonte de corrente que alimenta o solenóide gerador do campo.

O deslocamento devido ao efeito Doppler provém do fato dos átomos não estarem parados ao interagirem com a cavidade de interrogação. O perfil de velocidades do feixe atômico foi medido usando um feixe laser contrapropagante ao feixe atômico e observando a fluorescência. De acordo com a medida, o perfil é dado por uma distribuição de Maxwell (como é previsto teoricamente) centrado em (215 ± 7) m/s. O deslocamento medido foi de $\Delta\nu_D/\nu_0 = -2.30 \times 10^{-13}$.

A presença de um campo elétrico devido à radiação de corpo-negro (efeito Stark dinâmico) também introduz um deslocamento na ressonância atômica. O deslocamento é calculado através da expressão [11]

$$\frac{\Delta\nu_T}{\nu_0} = -K'' \left(\frac{T}{300} \right)^4 \left[1 + \varepsilon \left(\frac{T}{300} \right)^2 \right], \quad (1)$$

onde $K'' = 1.573(3) \times 10^{-14} Hz$ e $\varepsilon = 1.4 \times 10^{-2}$ [12,13]. Em nosso caso, a temperatura é continuamente medida via um termistor ($T=296 \pm 2$) K. Portanto, o deslocamento devido à radiação de corpo negro é $\Delta\nu_T/\nu_0 = (1.511 \pm 0.04) \times 10^{-14}$.

O deslocamento devido à diferença de fase entre as duas zonas de interrogação se deve ao fato delas não serem exatamente iguais, de modo que a distribuição de campo nas duas zonas é ligeiramente distinta em cada caso. Sendo assim, os átomos não interagem da mesma forma nas duas cavidades. A diferença de fase entre os extremos das cavidades, devida à diferença de comprimento eletrônico ΔL_0 ,

é dada por $\phi = 2\pi\alpha_g L_0 \Delta L_0 / \lambda_g$, onde L_0 é o comprimento eletrônico médio de cada uma das cavidades, α_g é a constante de atenuação do campo e λ_g é o comprimento de onda do guia. O deslocamento provocado pela diferença de fase é de -4.8×10^{-12} .

A posição em que o padrão de frequência se encontra na Terra também exerce uma influência sobre a frequência medida por este. Esse é um efeito relativístico que varia em função da altitude do relógio. Esse efeito desloca a frequência de transição de todos os átomos independentemente de sua velocidade. Por convenção, o segundo foi definido sobre a superfície da geóide [11], de maneira que o

deslocamento de frequência de um relógio a uma altura h é dada por [11]

$$\nu_G = g \frac{h}{c^2}$$

onde g é a aceleração da gravidade e c é a velocidade da luz. O relógio está posicionado a $h = (11, 1 \pm 0, 5)$ m, de acordo com os dados obtidos via GPS. Conseqüentemente, o deslocamento devido ao potencial gravitacional é: $\Delta\nu_G/\nu_0 = -1, 19 \times 10^{-16}$. Na tabela 1 temos o balanço das incertezas do padrão de frequência construído pelo nosso grupo.

Tabela 1: Balanço de incertezas do padrão de frequência a feixe térmico de ^{133}Cs .

Deslocamento	Correção (10^{-12})	Incerteza (10^{-12})
Efeito Zeeman de 2ª ordem	7.978×10^2	$\leq 0.119 \times 10^2$
Radiação de corpo-negro	1.5×10^{-2}	$\leq 0.04 \times 10^{-2}$
Diferença de fase entre o campo nas duas regiões	-3.753	≤ 1.44
Efeito Doppler de 2ª ordem	-2.30×10^{-1}	$\leq 1.27 \times 10^{-1}$
Potencial gravitacional		$< 1,19 \times 10^{-4}$
Incerteza combinada 1σ		11.98

B. A estabilidade a curto termo

A estabilidade de um padrão de frequência é avaliada comparando-o com um padrão que a princípio seja melhor, ou seja, mais estável. Para a avaliação do nosso relógio usamos um receptor GPS (Modelo 9390-6000 - Datum), um relógio comercial (HP5061B), um contador (SR620 - Stanford) e um computador gerenciador. O receptor GPS capta o sinal fornecido pelos satélites, para que possamos comparar o relógio comercial com os relógios dos satélites. Uma vez que o relógio comercial está travado, podemos usá-lo como comparador. A comparação é feita a cada segundo, usando-se o método da variância de Allan [14]. Comparando a frequência de cada um dos relógios (o comercial e o relógio feito no laboratório), a diferença entre essas frequências constitui um sinal de erro, que é integrado temporalmente. Atualmente, a estabilidade a curto-termo é de $\sigma_y(\tau) = (1.8 \pm 0.2) \times 10^{-11} \tau^{-0.5}$, onde τ é o tempo de integração. Na figura 7, temos a variância de Allan em função do tempo de integração. A inclinação da curva nos fornece a estabilidade do relógio.

IV Conclusões

Nesse artigo descrevemos a construção e a avaliação do primeiro relógio atômico brasileiro operado opticamente. Considerando todos os deslocamentos pertinentes, a exatidão do padrão de frequência do CEPOF/USP é de 10^{-10} . Através de uma integração de 10^4 s concluímos que a estabilidade atual do padrão é $\sigma_y(\tau) = (1.8 \pm 0.2) \times 10^{-11} \tau^{-0.5}$. Ainda podemos ampliar a estabilidade por um fator de 5, através de um aprimoramento da geometria da cavidade de

interrogação e demais parâmetros do relógio.

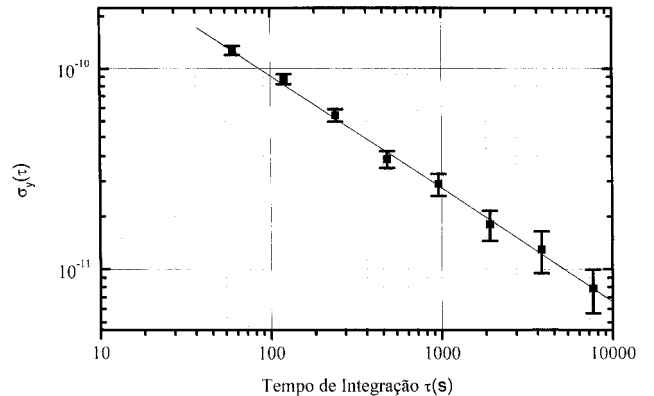


Figura 7. Raiz quadrada da variância de Allan $\sigma_y(\tau)$, para 60 s de intervalo de amostragem.

Esse projeto foi realizado com suporte financeiro da FINEP(PADCT), FAPESP/CEPID e Programa PRONEX.

Referências

- [1] G. Santerelli, Ph. Laurent, P. Lemonde, A. Clairon, A. G. Mann, S. Chang, A. N. Luiten and C. Salomon, Phys. Rev. Lett. **82**, 4619 (1999).
- [2] S.A. Diddamo, D.J. Jones, J. Ye, S.T. Cundiff, J.L. Hall, J.K. Ranka, R.S. Windeler, R. Holzwarth, T. Udem, T.W. Hansch, Phys. Rev. Lett. **84**, 5102 (2000).
- [3] E. de Clercq, G. D. Rovera, S. Bouzid and A. Clairon, "The LPTF Optically Pumped Primary Frequency Standard" in IEEE Trans. Instrum. Meas. **42**, 457 (1993).

- [4] W. D. Lee, J. H. Shirley, J. P. Lowe and R. E. Drullinger, "The Accuracy Evaluation of NIST-7" in IEEE Trans. Instrum. Meas. **44**, 120 (1995).
- [5] A. Bauch, T. Heindorff, R. Schröder, B. Fischer, Metrologia, **33**, 249 (1996R).
- [6] A. Kastler, Journal de physique et le radium, **11**, 255 (1959).
- [7] Manual of HP of model 5061.
- [8] Norman F. Ramsey, Phys. Rev. **78**, 695 (1950); "Molecular Beams" (Oxford University Press, Oxford 1985).
- [9] A. Sen Gupta, F. Garcia Nava, C. W. Nelson, D. A. Howe and F. L. Waals, Proc. 6th Symposium on Freq. Standards and Metrology, St. Andrews, Scotland Sep 9-14 (2001).
- [10] F. Salgé, H. Gerloff and J. Meyer, Annales of the CIRP, U-37, 381 (1988).
- [11] J. Vanier and C. Audoin *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards*, Adam Hilger, 1989.
- [12] E. Simon, "Vers une stabilité et une exactitude de 10^{-16} pour les horloges atomiques: le rayonnement de corps noir, la détection atomique", Tese de doutorado, Université Paris XI, 1997.
- [13] E. Simon, P. Laurent and A. Clairon, Phys. Rev. A **57**, 436 (1998).
- [14] D. Allan Proc. IEEE **54**, 221 (1966).