

Padrões Primários de Tempo e Frequência Desenvolvidos no Brasil

Stella Torres Müller¹, Renato Ferracini Alves¹, Aida Bebechibuli¹, Vanderlei Salvador Bagnato¹, Daniel Varela Magalhães²

¹ Instituto de Física de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, stella@ifsc.usp.br

² Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, daniel@sc.usp.br

Abstract: This paper is a progress report of the activities in our time and frequency laboratory. We emphasize the development of two different setups of atomic clocks: the atomic fountain and the compact system based on a cloud of cold atoms in free expansion. We also present the system for comparison and the dissemination of the reference signal.

Palavras chave: padrão de frequência, átomos frios, relógio atômico, cézio.

1. INTRODUÇÃO

O interesse em Metrologia, tanto científica como tecnológica, vem crescendo no Brasil nos últimos anos. Cada dia mais, os países imersos na economia global necessitam de rigorosos padrões para manter um bom controle sobre a produção industrial, além de estimular a confiança do mercado (tanto nacional como internacional). Por outro lado, para o estabelecimento desses padrões de controle industrial, é necessário haver também um grande desenvolvimento científico para determinar precisamente as unidades de medidas. No caso específico de tempo e frequência, apenas as universidades e outros centros de pesquisa desenvolvem projetos de construção de padrões. Sendo tão importante estrategicamente, os esforços para o estabelecimento de laboratórios em Tempo científico e Frequência não são uma escolha, mas uma obrigação para um país como o Brasil.

Metrologia de tempo e frequência é uma atividade de grande interesse em nosso grupo de pesquisa [1]. O desenvolvimento de padrões atômicos representa um grande avanço no estabelecimento de sinais de referência a serem usados como padrões de tempo e frequência.

É muito importante nessa área, não só implementar melhorias nos padrões atômicos já existentes, como propor novas possibilidades de padrões simplificados. Neste sentido, nós investimos simultaneamente na construção e caracterização de um chafariz atômico, no desenvolvimento de um padrão compacto baseado em uma nuvem de átomos frios de Cs em expansão, assim como na aquisição de um sistema de referência constituído de um Maser de

hidrogênio, padrões comerciais e GPS, a fim de gerar uma referência de tempo.

Ao longo deste trabalho, apresentaremos o estado da arte do nosso chafariz atômico, os resultados e melhorias do padrão compacto, o início das atividades para difundir o sinal de referência atômico e a preparação do nosso laboratório para fazer parte do TAI (Tempo Atômico Internacional).

2. PADRÃO DE FREQUÊNCIA TIPO CHAFARIZ ATOMICO

O padrão de frequência tipo chafariz de átomos [2], como mostra a figura 1, utiliza a técnica de resfriamento, aprisionamento e manipulação de átomos para realizar a interrogação dos átomos de ^{133}Cs , cuja transição entre os níveis hiperfinos do estado fundamental define o segundo [3].

No padrão de átomos frios, a manipulação dos átomos é feita em etapas distintas durante o ciclo de funcionamento.

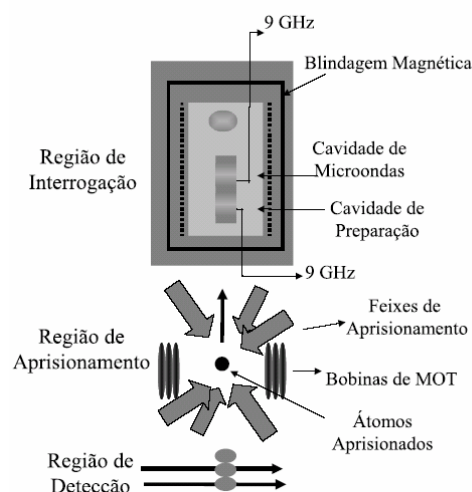


Figura 1 – Esquema de funcionamento de um padrão de frequência tipo chafariz

Primeiramente, 10^9 átomos são aprisionados utilizando a técnica de aprisionamento magneto-óptico (MOT) [4]. Após o resfriamento, a nuvem de átomos é arremessada verticalmente, num vôo balístico, através da técnica de melado óptico e passam duas vezes por uma cavidade de interrogação de microondas, completando a interação de campos separados de Ramsey [5].

Ao longo da cavidade de interrogação, os átomos sentem um campo magnético estático que define o eixo de quantização atômica com respeito ao campo magnético oscilatório. Por fim, após o vôo parabólico, a nuvem atinge a zona de detecção, que verifica, por fluorescência, a distribuição de populações em cada um dos níveis hiperfinos do estado fundamental.

A pressão de radiação utilizada para lançar os átomos acaba esquentando-os e, portanto, é muito importante acrescentar um segundo processo de resfriamento momentos antes do lançamento. Para isso, a frequência dos feixes de aprisionamento é deslocada adiabaticamente para longe da ressonância e a intensidade do laser é atenuada durante alguns ms. Esse processo é conhecido como resfriamento sub-Doppler. A temperatura da nuvem de átomos logo após esse resfriamento é de 4 μ K.

Durante os últimos anos muitas mudanças foram introduzidas no sistema experimental, a fim de lançar os átomos de maneira mais eficiente e obter as franjas de Ramsey, a assinatura característica de um padrão de frequência, com maior qualidade.

Quando a velocidade de lançamento é de 3,4 m/s, os átomos alcançam uma altura de 60 cm acima da região de captura e a ressonância atômica da transição relógio é medida com uma largura de linha de 1,4 Hz, como mostra a figura 2. O travamento do oscilador de interrogação (sintetizador de micro-ondas) num MASER de Hidrogênio (KVARZ CH-75) resultou numa primeira avaliação de estabilidade de nosso sistema, apresentando um desvio padrão de Allan de $5,18 \times 10^{-12} \tau^{-0.5}$, mostrado na figura 3.

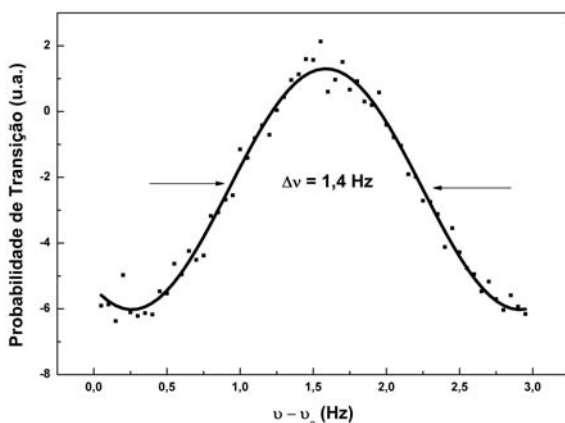


Figura 2 – Ressonância da transição relógio do chafariz de átomos frios

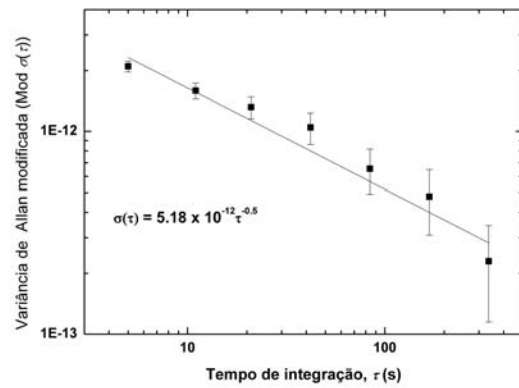


Figura 3 – Desvio padrão de Allan do chafariz de átomos frios. Comparação com um MASER de H (KVARZ – CH-75)

Alguns deslocamentos de frequência que perturbam a probabilidade de transição também já foram medidos, baseados nas características do sistema experimental do chafariz (Tabela 1).

Efeito Físico	Correção ($\times 10^{-12}$)	Incerteza ($\times 10^{-12}$)
Efeito gravitacional	-1.0×10^{-2}	-1.0×10^{-3}
Efeito Doppler de segunda ordem	-2.08×10^{-3}	0
Efeito Zeeman	2.97	0.41
Radiação de corpo negro	-2.05×10^{-2}	-2.636×10^{-5}

Tabela 1- Deslocamentos de Frequência do padrão tipo chafariz de átomos frios

O próximo passo é aumentar a relação sinal-ruído do sinal de detecção com a implementação de um processo de seleção de estados antes dos átomos entrarem na cavidade de Ramsey. Esse processo irá reduzir o sinal de base e o deslocamento colisional devido aos átomos no estado $m_F \neq 0$. Outra melhoria será a implementação de um filtro de ruído de intensidade no feixe de laser da detecção, de modo a minimizar as flutuações de frequência no número de átomos detectados em cada nível hiperfino. Com o Maser será possível utilizar uma melhor referência na comparação a longos períodos e conseqüentemente obter melhores avaliações.

Depois dessas mudanças, o restante dos deslocamentos de frequência deve ser avaliado, de modo a estabelecer a incerteza na determinação da referência de frequência total. Esse procedimento é essencial para utilizar o sistema como um padrão primário e realizar medidas de física fundamental.

3. PADRÃO DE FREQUÊNCIA BASEADO EM ÁTOMOS FRIOS EM EXPANSÃO

Padrões compactos vêm sendo desenvolvidos por muitos laboratórios do mundo usando diferentes configurações [6][7]. Esses sistemas podem ser muito pequenos e de alto

desempenho, apontando para direções bastante promissoras no campo de metrologia de tempo e frequência que visam portabilidade. Pensando nessa tendência construímos um sistema utilizando uma configuração simplificada de átomos frios. Os átomos frios são preparados e interrogados numa mesma região, reduzindo o tamanho e permitindo a construção de um experimento de dimensões reduzidas [8].

Em um primeiro experimento, 10^8 átomos frios de césio foram preparados em uma armadilha magneto-óptica (MOT) dentro de uma célula de vidro, produzindo uma nuvem de átomos que é deixada em livre expansão logo após o aprisionamento, figura 4. Durante a expansão, um pulso de microondas de 9,192 GHz é aplicado por uma antena. Essa antena é acoplada à cadeia de microondas e aplica na nuvem atômica a frequência necessária para excitar a transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de ^{133}Cs . Após interagirem com o campo de microondas, os átomos que sofreram a transição relógio são detectados por fluorescência.

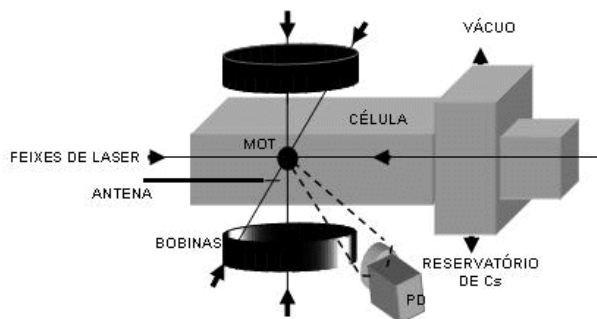


Figura 4 – Esquema de funcionamento de um padrão de frequência baseado numa nuvem de átomos frios em expansão

Os resultados obtidos mostram o quão promissor é esse sistema como padrão de frequência. A figura 5 mostra o sinal obtido de ressonância atômica, com uma largura de linha de 39 Hz para uma interrogação de Rabi de 12 ms (um único pulso de interrogação). A estabilidade, dada pelo 3.4. desvio padrão de Allan de $9 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$, é mostrada na figura 6.

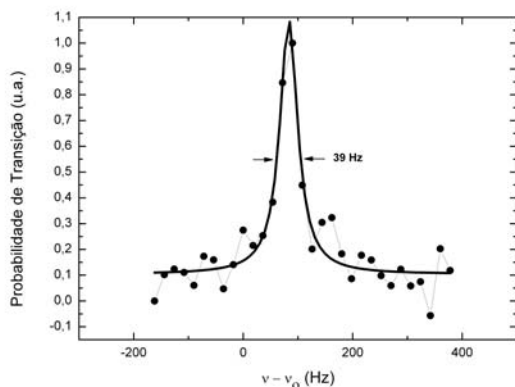


Figura 5 – Ressonância atômica da transição relógio obtida no padrão de átomos frios em expansão (método de Rabi – um pulso de microondas)

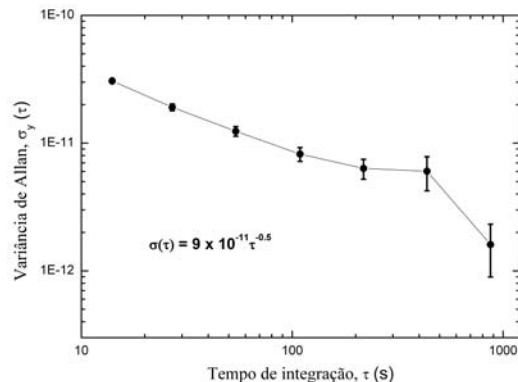


Figura 6 – Desvio padrão de Allan para definição de estabilidade preliminar do padrão de átomos frios em expansão livre

Com o método de interrogação de dois campos oscilatórios separados de Ramsey, as franjas foram observadas com pouco contraste. A explicação para essa falta de contraste foi obtida através de um modelo teórico. A simulação levou em conta o padrão de emissão da antena de micro-ondas e a expansão da nuvem atômica, figura 7. Dessa maneira observamos que a falta de contraste ocorreu devido à distribuição de amplitude entre os dois pulsos de interrogação [9].

Para a continuação do desenvolvimento desse padrão de frequências foi necessário construir uma cavidade de micro-ondas esculpida na câmara de vácuo. Essa cavidade foi desenvolvida para acoplar o modo TE011 de modo que os átomos, aprisionados no centro, não sintam variações de fase e amplitude. O fator de qualidade medido na cavidade, figura 8, já colocada em vácuo, é de 2500, que é um excelente valor se levarmos em conta que a cavidade foi construída em aço inox.

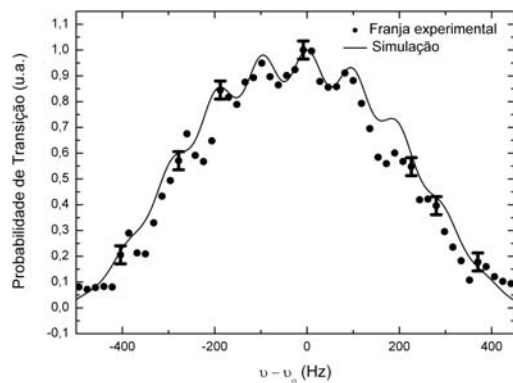


Figura 7 – Comparação entre a simulação e a ressonância atômica da transição relógio (método de Ramsey – dois pulsos de microondas)

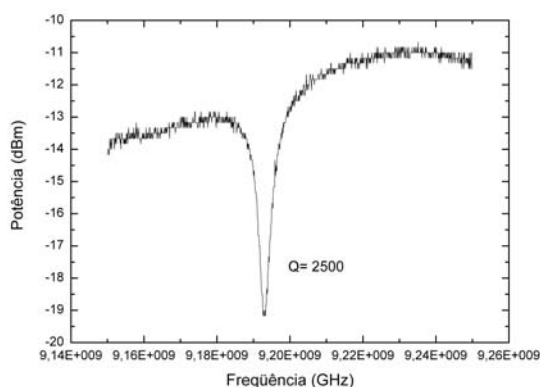


Figura 8 - Ressonância da cavidade esculpida na câmara de vácuo

Essa câmara substituiu a célula de vidro onde todo o processo está sendo feito e espera-se obter melhorias na largura de linha e estabilidade do sistema.

4. SISTEMA DE COMPARAÇÃO E DISSEMINAÇÃO DO SINAL DE REFERÊNCIA

O desenvolvimento desses experimentos, com a intenção de operá-los como padrões de frequência, não faz sentido sem um sistema central de comparação do sinal de referência. Tal sistema central de referência tem sido também preparado com o objetivo de gerar uma escala de tempo local e fazer uma conexão entre os padrões de laboratório e o UTC (Coordinated Universal Time). Receptores de satélites são comparados aos padrões de Cs comerciais e o Maser de hidrogênio. Os sinais de saída desses padrões são conectados aos experimentos, permitindo comparações simultâneas.

Em nosso laboratório, dispomos de um Maser de H (KVARZ CH-75). Seu sinal de saída é utilizado para travar em fase as cadeias de síntese de frequência utilizadas nos dois experimentos de padrões de átomos frios (chafariz e TAC). O Maser também é comparado com outros padrões comerciais de ^{133}Cs (2x 5071A e 1x 5061A). Tal comparação permite uma constante avaliação de estabilidade dos diversos sistemas comerciais.

Um dos padrões comerciais de Cs é utilizado como referência local para o sistema de transferência de tempo (Allen Osborne TTR-6). Os dados adquiridos servem para o travamento dos padrões comerciais locais com a coordenada de tempo difundida através do sistema GPS de navegação.

Estamos atualmente adquirindo equipamentos para nos possibilitar a geração de uma escala de tempo local, baseada na comparação simultânea de todos os padrões disponíveis no laboratório. Além disso, estamos também adquirindo um receptor geodésico multicanal, tendo em vista também, num futuro próximo, contribuir com a formação do TAI.

5. CONCLUSÃO

Apesar de evidenciados os excelentes resultados iniciais obtidos em nossos sistemas de laboratório, deveremos continuamente trabalhar no aprimoramento dos mesmos. Nossos experimentos passam atualmente por uma fase de

remodelamento, visando, sobretudo, a utilização dos padrões de forma cada vez mais operacional. A calibração de laboratório também será extremamente importante, já que os padrões e equipamentos de comparação comerciais de sinais de tempo não possuem resolução suficiente para tal.

O estabelecimento desses experimentos e seu reconhecimento internacional colocaram o Brasil no seleto grupo de países desenvolvedores de metrologia científica de tempo e frequência.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos integrantes do laboratório de física atômica e molecular do Grupo de Óptica, IFSC-USP (Jorge Amin, Emanuel Henn e Kilvia Magalhães), pelas frutíferas discussões. Também a equipe de metrologia de tempo e frequência do Observatório de Paris (em particular a Sébastien Bize, Giorgio Santarelli, David Valat e André Clairon), pelas inúmeras sugestões, discussões e apoio dado através de nossos projetos de colaboração e intercâmbio.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Ahmed, D. V. Magalhães, A. Bebechibuli, S. T. Müller, R. F. Alves, T.A. Ortega, J. Weiner and V. S. Bagnato. *The Brazilian time and frequency standards program*. Annals of the Brazilian Academy of Sciences, 80(2): 1-36 2008.
- [2] D.V. Magalhaes, M.S. Santos, A. Bebechibuli, S. T. Müller, V. S. Bagnato, *Progress towards a ^{133}Cs fountain as frequency standard in Brazil*. Laser Physics, vol. 14, n. 1, p 1-4, 2004.
- [3] R. Wynands and S. Weyers; *Metrologia* 42(3), S64–S79, 2005.
- [4] H. J. Metcalf and P. van der Straaten; *Laser cooling and trapping*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1999.
- [5] N. F. Ramsey; *Rev. Mod. Phys.* 62, p541-552, 1990.
- [6] F. X. Esnault, S. Perrin, D. Holleville, S. Guerandel, N. Dimarcq and J. Delporte; *Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium*, p381-385, 2008
- [7] V. Gerginov, S. Knappe, P. D. D. Schwindt, V. Shah, L. Liew, J. Moreland, H. G. Robinson, L. Hollberg, J. Kitching, A. Brannon, J. Breitbarth, and Z. Popovic, *Proceedings of the Joint IEEE International Frequency Control Symposium and Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting*, 2005.
- [8] S. T. Müller, D. V. Magalhães, A. Bebechibuli, M. S. Santos, V. S. Bagnato, *Demonstration and Observation of a Frequency Standard based on an Expanding Cold Atom Cloud of Cesium*. Proceedings of the IEEE transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2005.
- [9] S. T. Müller, D. V. Magalhães, A. Bebechibuli, T. A. Ortega, M. Ahmed, V. S. Bagnato; *Free expanding cloud of cold atoms as an atomic standard: Ramsey fringes contrast*. Journal of the Optical Society of America. B, Optical physics, v. 25, p. 909 2008.