Construção e Avaliação de um Relógio Atômico de Césio

USP/IFSC/SBI
8-2-001208

Flávio Teles Carvalho da Silva

Dissertação apresentada ao Instituto de Física de São Carlos, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências: Física Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Carlos Zilio

São Carlos
1998

Silva, Flávio Teles Carvalho
Construção e avaliação de um relógio atômico de césio/Flávio Teles Carvalho da Silva - São Carlos,1998
68p.

Dissertação (Mestrado)- Instituto de Física de São Carlos,1998

Orientador : Prof. Dr. Sérgio Carlos Zilio

1.Tempo e frequência. 2. Física atômica.
I. Título

UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO
Instituto de Física de São Carlos

Av. Dr. Carlos botelho, 1465
CEP 13560-250 - São Carlos - SP
Brasil

Fone (016) 274-3444
Fax (016) 272-2218

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE FLAVIO TELES DE CARVALHO DA SILVA APRESENTADA AO INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS, DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 02 DE ABRIL DE 1998.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Sergio Carlos Zilio/IFSC-USP

Prof. Dr. Jarbas Caiado de Castro Neto/IFSC-USP

Prof. Dr. Artêmio Scalabrin/UNICAMP

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA E INFORMAÇÃO

" Os que confiam no senhor são com o monte de Sião,
que não se abala mas permanece para sempre"
Salmo 125, ver.1

Dedico este trabalho ....

A minha esposa Isabel e ao meu filho Lucas pelo amor e dedicação.

Aos meus pais, Davi e Marlucia, por eles terem feito tudo o que podiam e o que não podiam por mim.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Sergio CarlosZilio e Prof. Vanderlei Salvador Bagnato pela orientação, apoio e amizade que foram fundamentais para realização deste trabalho.

Ao Prof. Frederico Dias Nunes que muito me ensinou sobre a vida.

A Aparecida Tuboy e Débora Millori pelo ensinamentos sobre laser de diodo.

Ao pesquisador Daniele Rovera pelo apoio, explicações sobre relógio atômico e trabalho neste projeto.

Aos amigos de laboratório : Prof. Marcassa, André, Andréia, Cleber, Fernando, Daniel, Gustavo, Kilvia, Joatan, Serginho, Sergio Miranda, Ricardo.

Ao eng. Carlos pela ajuda na parte de eletrônica e pelas valiosas discussões, ao Rui pela amizade e ajuda na produção das placas de circuito impresso.

Ao pessoal da oficina mecânica pelo trabalho muito bem feito na parte mecânica deste projeto.

Ao apoio financeiro da FAPESP e CNPq que foi fundamental para realização deste projeto.

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA E INFORMAÇÃO

Sumário

Introdução 1

I) Principio de funcionamento de um relógio atômico 6

I.1) Introdução 6
I.2) Preparação e interrogação de um feixe atômico 8
I.3) Método de ressonância de campos separados 11

II) Sistema mecânico 17

II.1) Câmara de vácuo 17
II.2) Sistema de detecção de fluorescêncido feixe atômico 19
II.3) Forno 20
II.4) Cavidade de microondas 21
II.5) cavidade de acoplamento para microondas 23

III) Sistema óptico 26

III.1) Laser de diodo de cavidade externa 26
III.2) Estabilização do laser de diodo usando absorção saturada 28
III.3) Modulador acusto-óptico 33
III.4) Sistema óptico completo 34

IV) Eletrônica e controle 37

IV.1) Rádio-frequência 37
IV.2) Eletrônica 40
IV.3) Sistema de controle 43

V) Resultados 47

V.1) Franjas de Ramsey 47
V.2) Aferição do relógio atômico 49

VI) Conclusões 55

Apêndice A : Programa para análise das franjas de Ramesy e produção do sinal de correção 59

Lista de figuras

Fig 1.1 : Diagrama do relógio atômico montado em São Carlos. 8

Fig 1.2 : Esquema da transição atômica, que ocorre dentro da câmara de vácuo. 9

Fig 1.3 : Níveis de energia do césio, com indicação da função do laser de bombeio e decaimentos do nível excitado F'=4. 10

Fig 1.4 : Níveis de energia do césio, com a indicação da função do laser de detecção. 10

Fig 1.5 : Franjas de Ramsey. 11

Fig 1.6 : Dois campos oscilantes separados. 12

Fig 1.7 : Probabilidade de transição do método de campos separados se todas as moléculas tivessem a mesma velocidade. 13

Fig 1.8 : Esquema do método de ressonância molecular proposto por Rabi. 13

Fig 1.9 : Diagrama do método de interrogação de Ramsey. 14

Fig 1.10 : Probabilidade de transição do método de campos separados com as moléculas tendo a distribuição de velocidade de Maxwellian. 15

Fig 1.11 : Método de Ramsey com a utilização de laser de diodo. 15

Fig 2.1 - Câmara de vácuo, que contem a cavidade de microondas. 17

Fig 2.2 : Esquema da distribuição da cavidade de microondas e sistemas de detecção de luminescência na câmara de vácuo. 18

Fig 2.3 - Sistema de detecção de luminescência. 19

Fig 2.4 - Esquema do forno. 20

Fig 2.5 : Foto da cavidade. 22

Fig 2.6 : Caracterização da bobina externa. 22

Fig 2.7 : Esquema da localização da cavidade de acoplamento em relação a cavidade de microondas. 23

Fig 2.8 : Sistema para determinação do tamanho da cavidade de ressonância. 24

Fig 2.9: Peças de inox utilizadas para montar a cavidade. 24

Fig 2.10 : Posicionamento das peças para formar a cavidade de 38 cm de espessura. 25

Fig 2.11 : Circulador de rádio-frequência. 25

Fig 3.1 - Esquema de montagem do laser de diodo de cavidade externa. 27

Fig 3.2 : Esquema do suporte mecânico do laser. 28

Fig 3.3 : Distribuição de populações para os átomos nos estados a e b na presença do laser de bombeio. 29

Fig 3.4 Distribuição de população e coeficiente de absorção para dois feixes (incidente e prova). 31

Fig 3.5 : Montagem óptica para a observação da absorção saturada. 32

Fig 3.6 : Esquema para estabilização do laser de diodo. 33

Fig 3.7 : Modulador acusto-óptico. 34

Fig 3.8 : Esquema completo da sistema óptico. 35

Fig 3.9 : Foto da montagem óptica. 35

Fig 4.1 - Esquema do sintetizador de rádio-frequência e sua ligação com a cavidade de microondas e o sistema de controle. 38

Fig 4.2 : Curva característica de um SRD. 40

Fig 4.3 : Esquema da fonte de corrente. 42

Fig 4.4 : Amplificação do sinal de luminescência. 41

Fig 4.5 : Circuito de filtragem do sinal de luminescência. 43

Fig 4.6 : Determinação do sinal de erro na franja de Ramsey. 45

Fig 5.1 : Franjas de Ramsey, mostrando a transição F=4, m_F =0 → F=3 m_F =0. 48

Fig 5.2 : Franjas de Ramsey nas 7 transições do césio. 48

Fig 5.3: Esquema para aferição de uma padrão de frequência atômico. 49

Fig 5.4 : Sinal de erro. 52

Fig 5.5 : Variância do sinal de erro. 52

Fig 5.5: Desvio padrão do sinal de erro. 53

Fig 6.1: Variação da temperatura na sala. 56

Fig 6.2 : Sinal de correção do laser com o ruído
de palmas sendo batidas na sala. 57

Resumo

Este trabalho trata das etapas de construção do primeiro relógio atômico brasileiro, de seu princípio de funcionamento e de uma avaliação primária do seu desempenho. Descrevemos a montagem e os equipamentos utilizados na parte mecânica, óptica e eletrônica. Utilizando um método primário de avaliação determinamos a precisão do relógio como sendo aproximadamente 1 parte em 10^9.

Abstract

This work is about the stages construction of the first Brazilian atomic clock, of its operation beginning and of a primary evaluation of its acting. We described the layout and the equipment used in the mechanical, optical and electronics parts. Using a primary method of evaluation determined the precision of the clock as being approximately 1 part of 10^9.

Introdução

Há séculos, a medida do tempo é um fator importante nas vidas dos seres humanos. Os babilônios, introdutores da astronomia, se interessavam por corpos celestes e suas evoluções. Estes conhecimentos lhes permitiram dividir o tempo em unidades exatas, criando assim um calendário. Os babilônios nos legaram a divisão da semana em sete dias, do dia em vinte e quatro horas, da hora em sessenta minutos e do minuto em sessenta segundos [1]. A definição babilônica de segundo, que corresponde a $1/(24 \times 60 \times 60) = 1/86400$ do dia, se mantém até hoje. Os primeiros relógios criados pelos babilônios eram as clepsidras, relógios à base do escoamento d'água, que também foram utilizados por gregos, romanos e chineses. Um dos problemas com as clepsidras era o congelamento da água no inverno europeu. Para resolver este problema foi introduzido, no século XIV, o relógio de areia. Mas devido ao peso da areia eles eram limitados a medir curtos intervalos de tempo.

A precisão dos relógios só veio a ter uma melhora significativa a partir das observações de Galileu sobre o movimento pendular, em 1581. Baseado nesses estudos, o cientista holandês Christian Huygens construiu o primeiro relógio pendular em 1656. Este relógio tinha a precisão de 10 segundos por dia. Enquanto Huygens construía seu relógio pendular, o cientista inglês Robert Hooke estava fazendo

experiências com uma mola de metal para regular a frequência de um relógio. Mas foi Huygens que, em 1675, construiu o primeiro relógio controlado por mola. Este salto tecnológico foi impulsionado pela expansão da navegação marítima na Europa, pois havia a necessidade de se medir com precisão as longitudes e assim promover melhorias no sistema de navegação. Esses relógios alcançaram uma precisão de 1 parte em 10^5, no final do século XVI, através das melhorias introduzidas pelo carpinteiro inglês John Harrison.

O próximo grande passo no aumento da precisão dos relógios foi dado no início do desenvolvimento de técnicas de radar e telecomunicações, pelo cientista americano Dr. Warren A. Marrison com a introdução do relógio de cristal de quartzo em 1929. Esse relógios são baseados nas vibrações de um cristal de quartzo submetido a um campo elétrico, que chegam a atingir uma precisão de 1 parte em 10^8. A desvantagem dos relógios de quartzo é sua grande dependência ao tamanho e forma do cristal. A produção de dois cristais perfeitamente idênticos é tecnicamente muito difícil, impossibilitando o preenchimento do requisito de boa reprodutibilidade e alta precisão de um padrão de tempo e frequência com relógios de quartzo.

Para compensar estes problemas técnicos dos osciladores de quartzo surgiram os relógios atômicos, que utilizam as ressonâncias atômicas como medida precisa de tempo e frequência. Da mesma forma que um pêndulo é utilizado para medir o tempo através da contagem de suas oscilações, o átomo possui estados energéticos que oscilam em uma frequência bem determinada, quando excitados por agentes externos (ondas eletromagnéticas), podendo assim ser utilizados como padrão para os relógios.

USP

Além da precisão de 1 parte em 10^{12}, outra grande vantagem do relógio atômico é sua reprodutibilidade, pois todos os átomos de um mesmo elemento são exatamente idênticos em qualquer ponto do universo.

Em 1949, o "National Institute for Standard and Technology" (NIST) nos EUA iniciou a construção do primeiro relógio atômico. No inicio usou-se moléculas de amônia e os resultados obtidos não eram muito melhores dos que os oferecidos pela tecnologia dos osciladores de quartzo da época. Mas já em 1957 apareciam os primeiros relógios baseados em feixes atômicos de césio e em 1967 a definição de segundo passou a ser baseada em oscilações do átomo de césio. O segundo passou a ser definido como sendo 9.192.631.770 oscilações da frequência de ressonância do átomo de césio.

Observa-se que as necessidades tecnológicas tem realizado uma forte pressão sobre a área de metrologia de tempo e frequência e esta se desenvolve rapidamente, atingindo precisões fantásticas. Isto é evidenciado pelo aparecimento dos relógios atômicos, que surgiram para fornecer a precisão que a evolução tecnológica necessitava. Esta precisão é utilizada nas telecomunicações, pois com uma taxa de transmissão de informação da ordem de 1Mbit/s, um sincronismo temporal melhor que 10^{-10} entre transmissor e receptor é necessário para evitar falhas na comunicação. Tal sincronismo só é alcançado com a utilização de relógios atômicos. Os sistemas de navegação, como o GPS (Global Positioning System), utilizam-se desta precisão para medir intervalos de tempo entre sinais e assim determinar a posição de uma aeronave, embarcação ou pessoa. Na indústria, a calibração de geradores de frequência, contadores e outros instrumentos que necessitam de padrão de frequência é feita com

o uso desse relógios. Eles também são utilizados como instrumentos para pesquisa básica. Dispositivos desta precisão têm permitido um enorme avanço na física atômica, física quântica, relatividade, eletrônica, etc.

Os países desenvolvidos têm feitos consideráveis investimentos na área de metrologia de tempo, devido a sua grande importância tecnológica. Desta forma, temos o NIST nos EUA, o BNM na França, o PTB na Alemanha e muitos outros. O Brasil, pais de dimensões continentais e que espera iniciar o próximo milênio como uma possível potência técnico-científica, importa todos os padrões de frequência atômicos que utiliza. Por esta razão este trabalho têm como objetivo a construção do primeiro relógio atômico de césio brasileiro, visando diminuir um pouco a grande separação entre o Brasil e estes países desenvolvidos que detém os padrões de tempo e frequência.

No capítulo1 discutiremos os princípios de funcionamento de um relógio atômico de feixe de césio, explicando a maneira pela qual a transição atômica é utilizada para se determinar uma frequência precisa. Também trataremos do método de detecção da transição atômica utilizado neste trabalho, que é o chamado método de detecção de campos separados.

O capítulo 2 trata de todo sistema mecânico que foi construído para o relógio. Este sistema inclui uma câmara de vácuo, a cavidade de microondas, o sistema de detecção de luminescência e o forno utilizado para a produção do feixe de césio.

O capítulo 3 é dedicado ao sistema óptico. Discutiremos sobre o laser de diodo utilizado neste projeto. Iremos explicar a configuração utilizada e o seu sistema de estabilização.

O capítulo 4 engloba a parte de eletrônica do projeto. Abordaremos a produção do sinal com frequência de 9.192 GHz, a eletrônica utilizada na estabilização do laser de diodo e o tratamento do sinal de lusminescência. Também trataremos do sistema de controle do relógio

No capítulo 5 apresentaremos os resultados obtidos para o método do nosso padrão de frequência primário.

O capítulo 6 traz as conclusões do trabalho, com a apresentação dos pontos que ainda precisam serem melhorados e novos métodos que serão utilizados.

Referências

[1] J. Jesperrsen, "From sundials to atomic clocks", Dover Publications (1982).

I. Princípio de funcionamento de um relógio atômico

I.1) Introdução

Um relógio pode ser dividido em duas partes: um dispositivo para gerar eventos periódicos e outro para contar o número de eventos ocorridos. Assim, se quisermos melhorar a precisão de um relógio devemos melhorar um desses dispositivos, ou ambos. Em relação à parte de contagem dos eventos, esta já se encontra tão avançada que pouco pode-se fazer para termos um aumento real da precisão do relógio. Então resta-nos o evento periódico e é neste ponto que o relógio atômico difere dos demais, pois utiliza uma transição atômica como evento periódico.

Do ponto de vista da precisão, deveríamos ser capazes de medir o tempo diretamente da comparação com a frequência de transição atômica, mas estes são suficientemente complicados para que medidas com grau de precisão aceitável se tornem viáveis [1]. Por esta razão o sinal de saída do relógio é proveniente de um oscilador de cristal de quartzo (oscilador padrão), que tem sua frequência regularmente monitorada pelo padrão de frequência atômico. Utilizamos um sintetizador de rádio-frequência, fornecido pelo "NIST", que contém um oscilador de quartzo com frequência de oscilação

de 5 MHz (nosso oscilador padrão) e uma cadeia de multiplicação para produzir, a partir do oscilador padrão, uma frequência de 9.192 GHz, ressonante com a transição hiperfina do estado fundamental do átomo de césio. O césio 133 foi escolhido como a amostra atômica por ser o padrão primário. A transição entre níveis hiperfinos do estado fundamental via dipolo magnético é excitada através de uma cavidade de microondas. O césio é utilizado na forma de um feixe atômico para diminuir as perturbações da amostra, em particular as colisões com outros átomos e evitar o efeito Doppler de primeira ordem pela observação transversal do feixe. O feixe é produzido em uma seção da câmara de vácuo chamada de forno. A câmara de vácuo é uma estrutura de aço inox mantida a uma pressão de 10^{-7} torr, que contém o feixe de césio, a cavidade de microondas, a cavidade de acoplamento e o sistema de detecção de luminescência. Estes dispositivos fazem parte do sistema de preparação e interrogação do feixe atômico. Utilizamos o método de campos separados, desenvolvido por Norman F. Ramsey (Franjas de Ramsey) [2], para determinar quando a frequência injetada na cavidade de microondas é igual a frequência de ressonância do átomo de césio, que é de 9.192631770 GHz. Qualquer diferença entre a frequência injetada e a frequência de ressonância produz um sinal de erro, que é enviado para o oscilador de 5 MHz para correção de sua frequência. O sinal de erro é produzido através da análise computacional das franjas de Ramsey geradas pelo processo de transição atômica. Assim, temos o oscilador de 5 MHz, que fornecerá a saída do relógio, sincronizado com um padrão de frequência atômico, ou seja, temos um relógio atômico, cujo diagrama é mostrado na Fig 1.1.

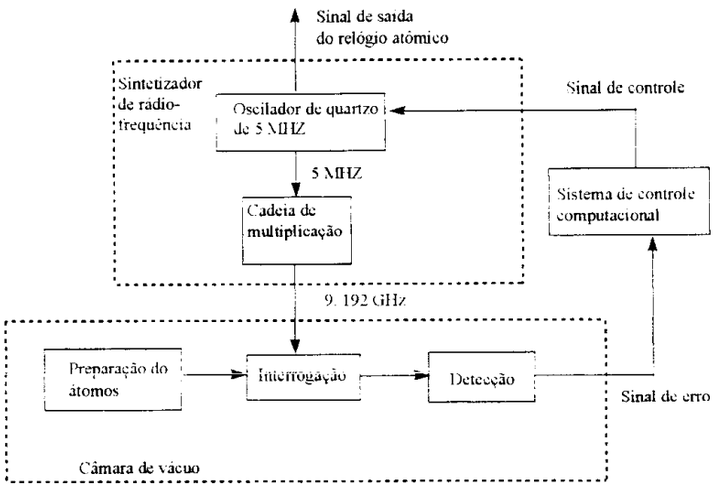

Fig 1.1 : Diagrama do relógio atômico montado em São Carlos.

I.2) Preparação e interrogação do feixe atômico

Como dito anteriormente, usaremos a transição entre os níveis hiperfinos do césio como padrão de frequência atômico. Para isso são necessárias : a produção do feixe atômico no forno, a preparação dos átomos, a transição atômica e a detecção da transição. A etapa de produção do feixe atômico será explicada no capítulo 2. Para realizarmos a transição atômica utilizamos um laser de diodo operando em 852 nm na fase de preparação (laser de bombeio) e na de detecção (laser de detecção). A transição entre os níveis hiperfinos do estado fundamental do césio ocorre enquanto os átomos estão passando pela cavidade de microondas. Na fase de detecção utilizamos, além do laser, um sistema de detecção de fluorescência, que será detalhado no capítulo seguinte.

O processo de transição ocorre como descrito na Fig 1.2. Os átomos do feixe de césio ao sairem do forno encontram-se no níveis F=3 ou F=4 do estado fundamental. Quando o feixe atômico passa pelo laser de bombeio os átomos no nível F=4 sofrem transições para o nível excitado F' =4 e decaem para os níveis F= 3 ou F=4 do estado

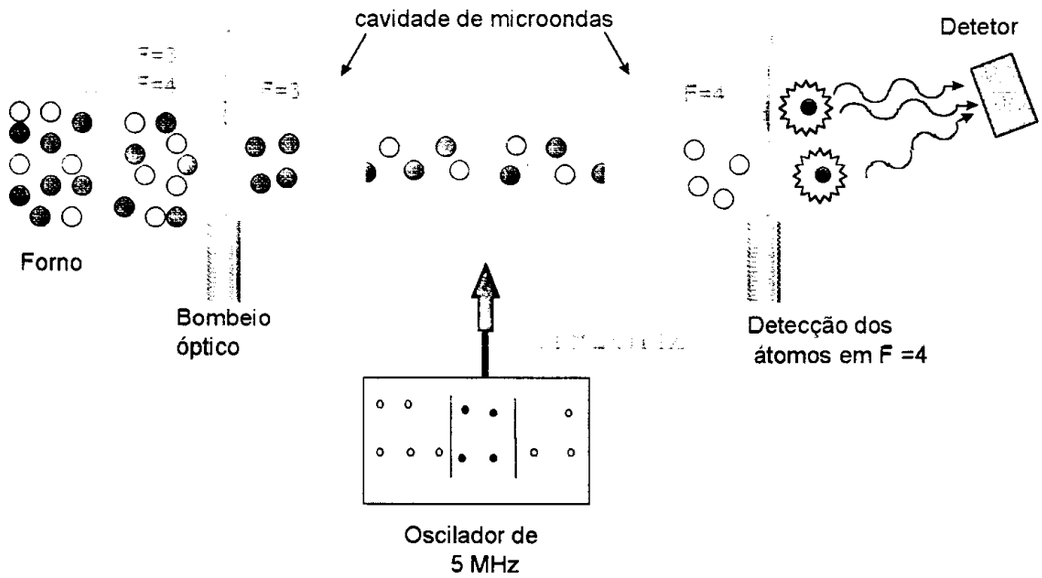

Fig 1.2 : Esquema da transição atômica, que ocorre dentro da câmara de vácuo.

fundamental, como mostra a Fig 1.3, com probabilidade aleatória. Esta é a etapa de preparação, cujo objetivo é aumentar a quantidade de átomos no nível F=3 que entraram na cavidade de microondas. Após vários ciclos de absorção e emissão, praticamente todos os átomos se encontram no nível F=3. Em segida, o feixe entra na cavidade de microondas, alimentada com uma frequência modulada em torno de 9.192 GHz, proveniente da cadeia de multiplicação do oscilador de 5 MHz. Os átomos no nível F=3

IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA E INFORMAÇÃO

sofrem a influência dos campo magnético gerados pela injeção da frequência modulada na cavidade e podem transicionar para o nível F=4. Estes passam pelo laser de detecção ao saírem da cavidade e sofrem transição para o nível excitado F'=5, como mostra a Fig 1.4. Deste estado decaem rapidamente, emitindo fotons que são captados pelo sistema de detecção de luminescência dando origem as franjas de Ramsey, que são descritas na próxima seção.

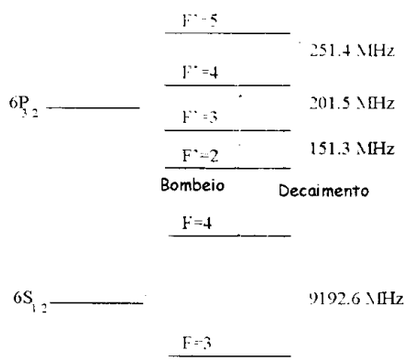

Fig 1.3 : Níveis de energia do césio, com indicação da função do laser de bombeio e decaimentos do nível excitado F'=4.

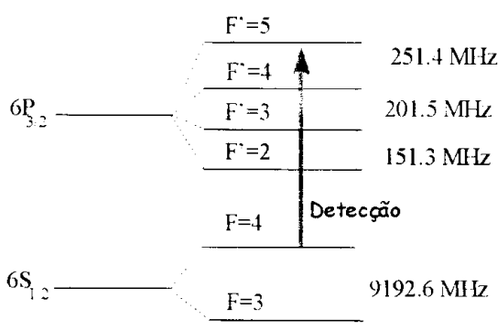

Fig 1.4 : Níveis de energia do césio, com a indicação da função do laser de detecção.

O gráfico das franjas de Ramsey, mostrado na Fig 1.5, indica a probabilidade com que a transição F=3 → F=4 ocorre para uma determinada frequência injetada na cavidade. Ao analisarmos a franja, concluímos que a frequência em que ocorreu o sinal de maior intensidade, ou seja, onde um maior número de átomos transicionaram de F=3 → F=4, é a frequência é de ressonância do césio (9.192631770 GHz). Assim podemos determinar um padrão de tempo e frequência através da analise dessas franjas. Esta análise é feita pelo sistema de controle descrito no capítulo 4.

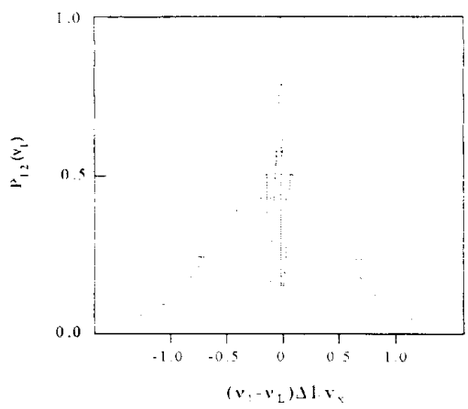

Fig 1.5 : Franja de Ramsey .

I.3) Método de ressonância de campos separados [2]

Esta é uma técnica de ressonância magnética em feixe atômico desenvolvida por N. F. Ramsey na década de 60. Esta técnica é aplicada em moléculas, átomos e qualquer

outro sistema quântico no qual uma transição pode ser induzida entre dois estados de energia W_i e W_f. A frequência de ressonância v_0 na mecânica quântica é dada por :

$$v_0 = (W_i - W_f)/h \qquad (1.1)$$

onde h é a constante de Planck. No caso de átomos e moléculas as transições entre os dois estados W_i e W_f são usualmente induzidas por campos magnéticos ou elétricos oscilantes. A amplitude do campo magnético no método de campo oscilante separado são as mostradas na Fig 1.6. Neste caso a probabilidade de transição irá variar com a frequência como mostra a Fig 1.7. Se todos os átomos no intervalo T, entre os campos oscilantes, são os mesmos é difícil dizer que pico corresponde a verdadeira condição de ressonância $v = v_0$ na Fig 1.7. Contudo, ele é facilmente distinguível se expormos os átomos a um campo oscilante no qual os intervalos de separação são diferentes, neste caso todos os picos da Fig 1.7 se deslocaram, exceto o de $v = v_0$.

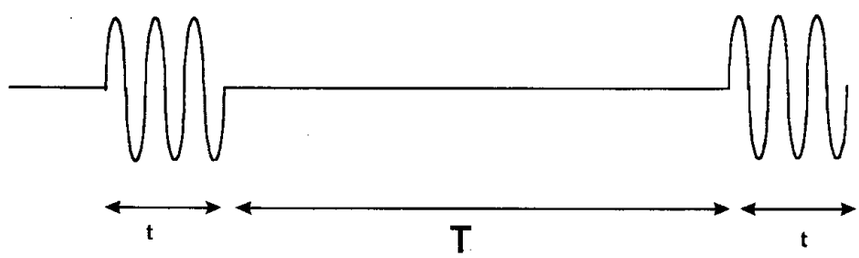

Fig 1.6 : Dois campos oscilantes separados, cada campo atua em durante um tempo t, com campo oscilante de amplitude zero atuando durante um tempo T. A coerência da fase é preservada entre os dois campos oscilantes.

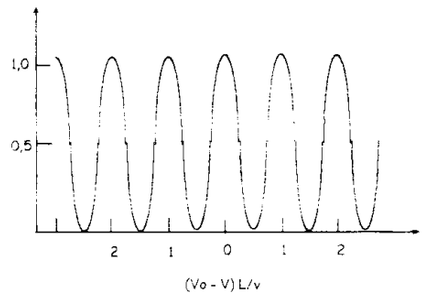

Fig 1.7 : Probabilidade de transição do método de campos separados se todas as moléculas tivessem a mesma velocidade. O eixo horizontal representa a frequência $v = w/2\pi$ e o vertical a probabilidade de transição. (L é a distância entre as regiões de campos oscilantes).

Na discussão acima mostramos que um campo oscilante pode produzir transições entre diferentes estados atômicos, mas não mostramos como a existência dessas transições pode ser determinada. O primeiro método de detecção usando campos separados foi uma adaptação do método de ressonância magnética em feixe molecular inventado por Rabi, mostrado na Fig 1.8. Neste método as moléculas emergem de uma

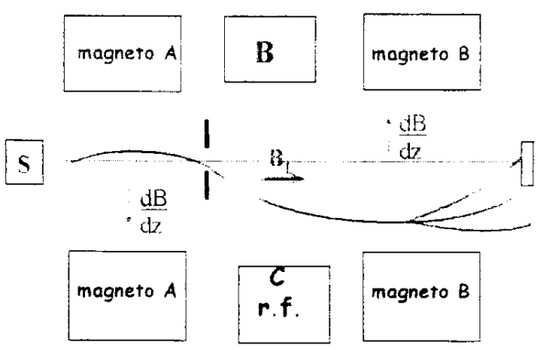

Fig 1.8 : Esquema do método de ressonância molecular proposto por Rabi.

fonte S e viajam em uma linha reta, exceto as defletidas pelo magneto inhomogêneo A e redirecionalizadas para o detetor D pelo magneto B. A condição de redirecionalização é destruída se os átomos mudam de estado entre A e B. Consequentemente a intensidade do feixe medida no detetor apresentará uma alteração máxima quando a frequência de oscilação for igual a v_0. No método de Rabi, a região de campo oscilante estendesse por todo comprimento do magneto uniforme C, já no método de campo oscilantes separados, mostrado na Fig 1.9 os campos oscilantes coerentes em fase são confinados em duas pequenas regiões no início e fim do magneto C. Se as moléculas em todo feixe tem a mesma velocidade, a variação de intensidade do feixe com a frequência de oscilação v deve ser como mostra a Fig 1.7. Mas, como na distribuição de velocidade normal de um feixe molecular todos os picos exceto o de $v = v_0$ ocorrem em diferentes velocidades e são alargados de tal forma que a média da ressonância final sobre a velocidade é como na Fig 1.10. Assim, com um resultado em feixe molecular comum podemos escolher a ressonância principal, na qual $v = v_0$.

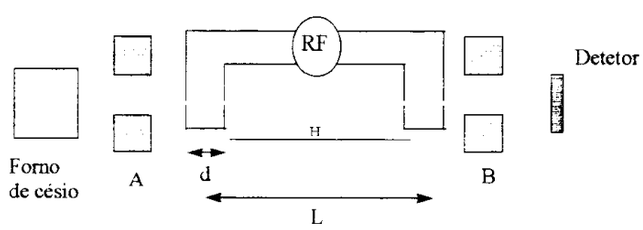

Fig 1.9: Diagrama do método de interrogação de Ramsey. A e B são magnetos, L é a distância entre as regiões de campos oscilantes, d é o comprimento destas regiões e H é um campo magnético fraco paralelo ao campo gerado pelo sinal de RF.

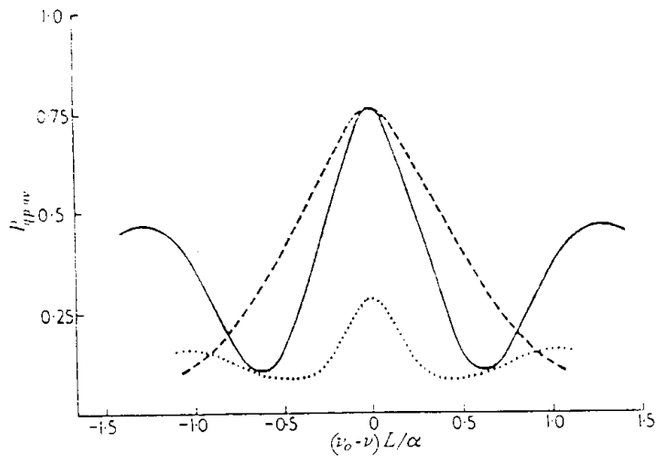

Fig 1.10 : Como as moléculas possuem a distribuição de velocidade de Maxwellian, a probabilidade de transição é mostrada pela linha cheia para uma amplitude de campo oscilante otimizada. (α é a velocidade molecular mais provável). A curva pontilhada é a probabilidade utilizando apenas 1/3 do campo oscilante. A curva tracejada é do método de Rabi como o mesmo campo.

No trabalho substituímos os campos eletromagnéticos por dois campos de laser coerentes em fase, como mostra a Fig 1.11. Utilizamos um único laser de diodo (λ = 852.12 nm), que ao passar por um modulador acústico-óptico produz as frequências necessárias para a fase de bombeio e o de detecção dos átomos.

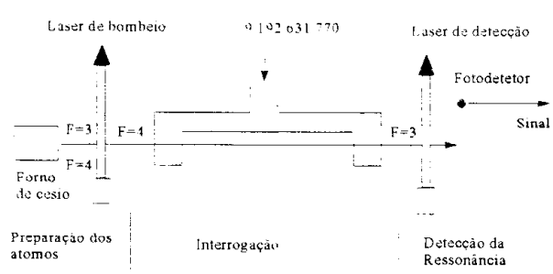

Fig 1.11: Método de Ramsey com a utilização de laser de diodo.

Referências

[1] J. A Barnes, " Atomic timekeeping and statistics of precision signal generator", Proceedings of the IEEE, **54**, 2, 1966.

[2] N. F. Ramsey, "Measurements with Separated Oscillatory Fields and Hydrogen Masers", IEEE T. I and Measurement, **40**, 2 (1991).

II. Sistema mecânico

II.1) Câmara de vácuo

Para implementação do relógio foi necessária a construção de uma câmara de vácuo de aço inox com 90 cm de comprimento e 20 cm de diâmetro para armazenar a cavidade de microondas, o feixe de césio o sistema de detecção e a cavidade de acoplamento. Na Fig 2.1 temos um esboço da câmara de vácuo, que foi dividida em partes para um melhor entendimento. Assim temos : A - Recipientes, que são chamados de fornos onde são armazenadas as cápsulas de césio. Esta câmara permita

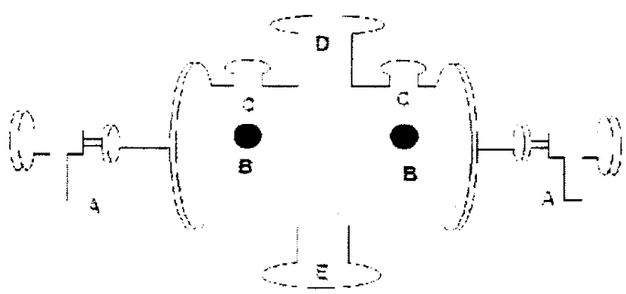

Fig 2.1 - Câmara de vácuo, que contem a cavidade de microondas.

a utilização de dois fornos, aumentando assim o intervalo de tempo para a troca do césio e consequentemente o tempo de funcionamento ininterrupto do relógio. B - Janelas por onde entram o laser de bombeio e detecção. C - "Feedthrough" pelo qual temos acesso ao sistema óptico montado para coletar a fluorescência do feixe. Este sistema de detecção será descrito posteriormente. D - "Feedtrrough" pelo qual injetamos 9.192 GHz na cavidade de microondas, que se encontra dentro da câmara , como mostra a Fig 2.2. E - Cavidade pela qual acoplamos uma bomba turbo molecular e uma bomba mecânica para obtermos um pressão de 10^{-7} torr no interior da câmara. Este acoplamento é feito através de um "bellow" para obtermos um amortecimento da vibração das bombas.

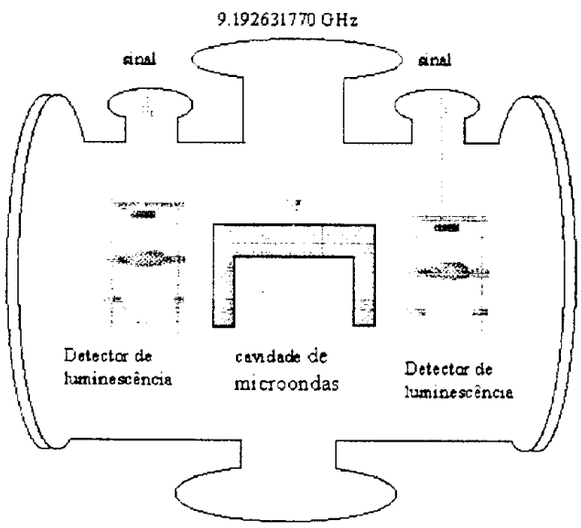

Fig 2.2 : Esquema da distribuição da cavidade de microondas e sistemas de detecção de luminescência na câmara de vácuo.

II.2) Sistema de detecção da fluorescência do feixe atômico

Para detectarmos a fluorescência emitida pelo átomo ao decair do estado $6P_{3/2}$ (F'=5) para o estado fundamental, que dá origem as franjas de Ramsey, utilizamos o esquema mostrado na Fig 2.3. Este sistema consiste de 3 placas de inox de 5 cm de largura, 5 cm de comprimento e 1.5 cm de espessura, que estão seguras por quatro hastes. Na primeira placa colocamos um detetor de 30 ms de tempo de resposta, na segunda uma lente com 3 cm de foco e na terceira temos um espelho esférico de 4 cm de diâmetro. O espelho serve para captar a maior quantidade possível de fluorescência e a lente é utilizada para focalizar a luminosidade captada pelo espelho para o detetor, de forma que o sinal captado pelo detetor é o maior possível. O sinal de fundo, ou seja, a luminosidade externa a câmara de vácuo, é de 10 mV, enquanto o sinal decorrente da transição atômica é de aproximadamente 20 mV. Junto com este sinal existe um sinal de "offset" de 100 mV, que nos levou a utilizar um amplificador para o seu controle. Este amplificador será descrito no capitulo 3.

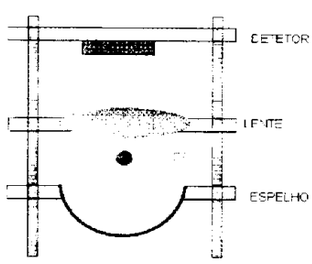

Fig 2.3 - Sistema de detecção de luminescência.

II.3) Forno

Como dito anteriormente, o forno é o recipiente onde são armazenadas as cápsulas de césio. Quando quebramos uma destas cápsulas e aquecemos esta região, geramos uma diferença de pressão entre o forno e o resto da câmara, que resulta na expulsão dos átomos do forno para câmara e gera um feixe efusivo, como mostra a Fig 2.4.

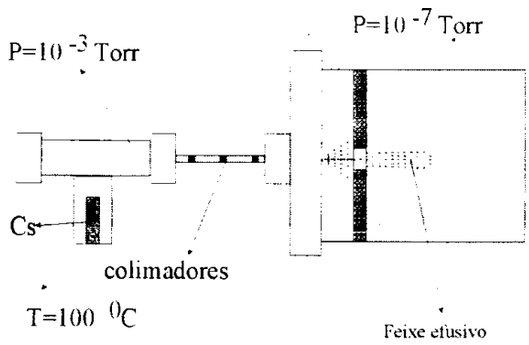

Fig 2.4 - Esquema do forno.

O aquecimento do forno é feito por fita térmica (que é uma resistência envolvida por uma manta à base de lã de vidro) colocada ao redor do mesmo. A temperatura do forno é medida através da verificação da tensão de um termorpar, colocado em contato com o forno, e controlada pela variação da tensão de alimentação da fita. Trabalhamos com a temperatura do forno em aproximadamente 100^0 C. O problema com este sistema de aquecimento é que não conseguimos controlar a temperatura do forno com grande precisão e consequentemente não produzimos um feixe perfeitamente uniforme. Para

solucionar este problema podemos utilizar um sistema de controle de aquecimento com realimentação, que nos permita ter um maior ajuste da temperatura. Existem controles comerciais com estas características que já estão em estudo para utilização futura.

Além de efusivo e uniforme, o feixe atômico necessita ser razoavelmente bem colimado ao percorrer o comprimento da câmara de vácuo. Para obtermos esta colimação utilizamos 3 discos de inox com diâmetro de 7.6 mm e furo passante de 2mm de diâmetro no centro. Eles estão dispostos na câmara de vácuo como mostra a Fig 2.4.

II.4) Cavidade de microondas

A cavidade de microondas é um guia de microondas de cobre, com 25 cm de comprimento, 10 cm de altura e 5 cm de largura, como mostra a Fig 2.5. Ela possui um furo de 0,5 cm para passagem do feixe. A cavidade é envolvida por uma estrutura em forma, de "μ metal", para blindagem magnética do campo da terra. Na base desta estrutura de proteção temos uma bobina, utilizada para gerar o campo fraco (H) na região da cavidade sem campo oscilante, como mostra a Fig 1.9. Como este campo é paralelo ao campo magnético forte gerado pelo sinal de microondas na cavidade, somente as transições com $F = \pm 1$ e $m_f = 0$ poderão ocorer. Esta bobina é alimentada por uma fonte de corrente de 2% de precisão e caracterizada pelo gráfico da Fig 2.6. A corrente utilizada foi de 62 mA o que equivale a um campo de aproximadamente 6 mG.

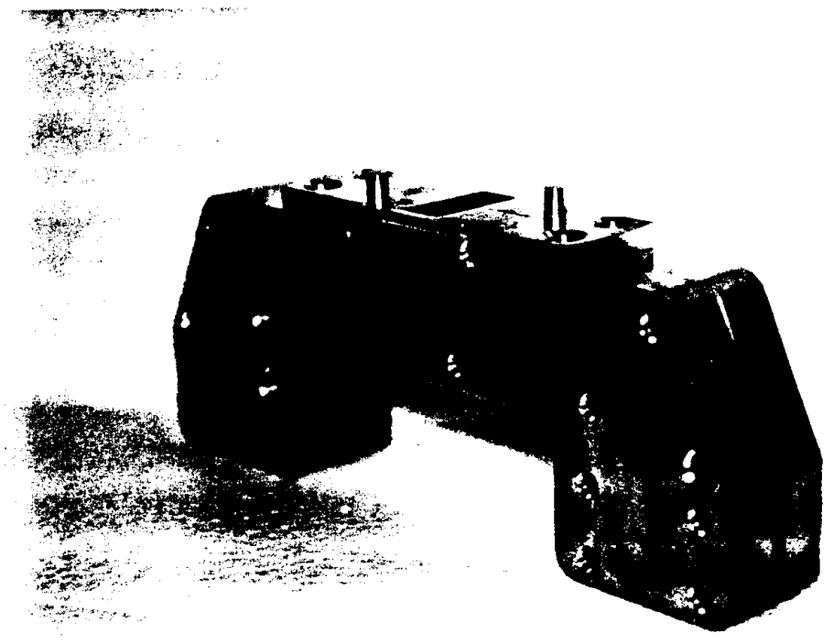

Fig 2.5 : Foto da cavidade de microondas. O furo retangular no extremo direito da figura serve para a passagem do feixe atômico. O furo no topo é a entrada de microondas.

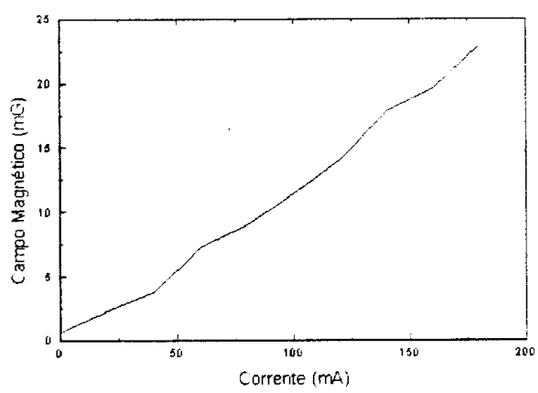

Fig 2.6 : Caracterização da bobina externa.

BIBLIOTECA

II.5) Cavidade para acoplamento de microonda

A cavidade de acoplamento é um dispositivo utilizado para transferir o sinal de 9.192 GHz do cabo coaxial, proveniente do sintetizador de rádio-frequência, para o guia de microondas (cavidade de microondas). Ela é colocada sobre a cavidade de microonda, como mostra a Fig 2.7. Para ajustarmos sua frequência em 9.192631770 GHz regulamos

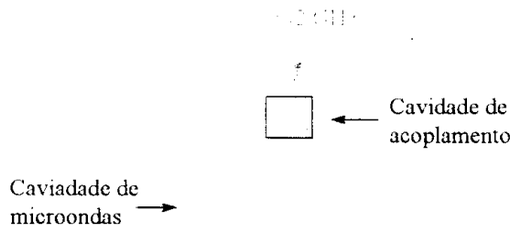

Fig 2.7 : Esquema da localização da cavidade de acoplamento em relação a cavidade de microondas.

a altura desta cavidade através da montagem do esquema apresentado na Fig 2.8. Utilizamos o sintetizador de rádio-frequência para alimentar a cavidade e observamos a ressonância através de um analisador de espectro. Variamos a altura da cavidade até que o sinal de ressonância fosse o mais próximo possível de 9.192631770 GHz . O melhor sinal foi obtido com uma cavidade de 38 cm de altura.

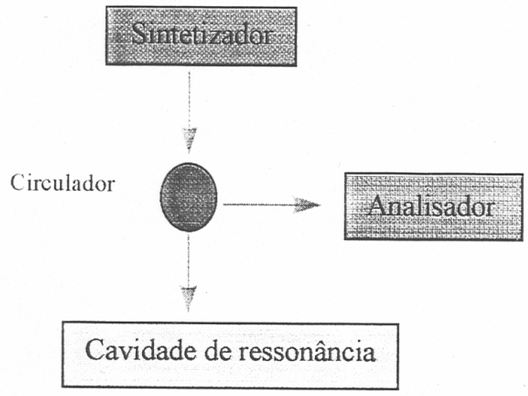

Fig 2.8 : Sistema para determinação do tamanho da cavidade de ressonância.

A cavidade de ressonância é constituída de peças de inox no formato apresentado Fig 2.9 e na configuração exposta na Fig 2.10. Os testes para determinação da melhor altura da cavidade foram feitos com o sistema de vácuo aberto, ou seja, com a cavidade

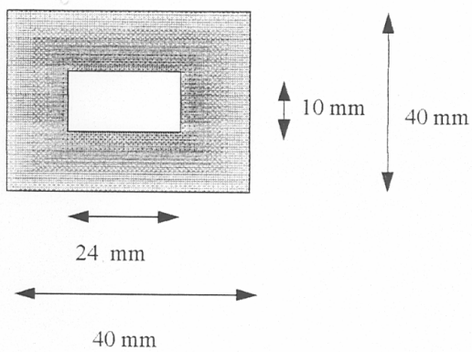

Fig 2.9: Peças de inox utilizadas para montar a cavidade.

exposta ao ar. Sabendo que o sistema iria operar em vácuo tivemos que acrescentar 2.7 MHz ao valor da ressonância determinada pelos testes, sendo este deslocamento

de frequência devido à permissividade do ar. Assim a cavidade com altura de 38 mm produziu uma ressonância em 9.189931770 GHz, que somado com 2.7 MHz produz 9.192631770 GHz.

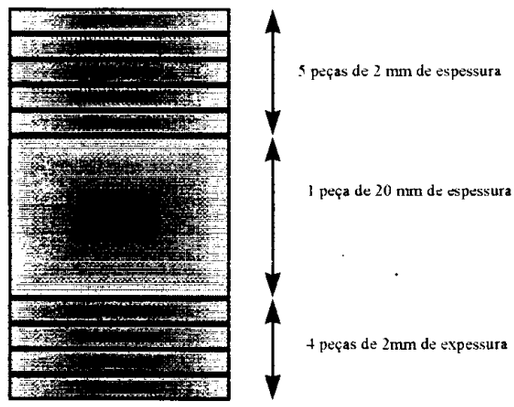

Fig 2.10 : Posicionamento das peças para formar a cavidade de 38 cm de espessura.

Nessa etapa foi utilizado um circulador, que é um dispositivo composto de 3 isoladores de ferrite colocados em sequência fechada [1], como mostrado na Fig 2.11. O uso deste dispositivo garante que o sinal do sintetizador é enviado para a cavidade e o sinal enviado para o analisador é o da ressonância da cavidade à frequência injetada.

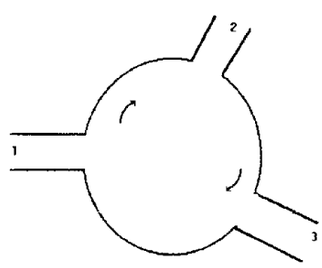

Fig 2.11 : Circulador de rádio-frequência.

Referências

[1] J. Smit, "Microondas", Erica, São Paulo (1987)

III. Sistema óptico

III.1) Laser de diodo de cavidade externa

O laser de diodo é utilizado para preparar o estado eletrônico dos átomos antes que estes entrem na cavidade de microondas e detectar o estado eletrônico dos átomos que deixam a cavidade. A largura de linha de um laser de diodo livre, que possue controle de temperatura e de corrente de injeção, está em torno de dezenas de MHz devido às flutuações existentes na cavidade [1]. Várias técnicas de redução de largura de linha podem ser utilizadas, mas optamos pela de cavidade externa [2]. A cavidade ressonante de um laser de diodo normal é formada pelas próprias faces do meio ativo. Já em um laser de diodo de cavidade externa ela é composta pelo diodo com revestimento anti-refletor em uma das fases e um acoplador de saída, sendo este seletivo em frequência. Normalmente utiliza-se uma grade de difração como elemento refletor. A atração fundamental desta técnica é a grande possibilidade que é oferecida para o controle dos parâmetros ópticos do laser, como variações da frequência e redução da largura de linha.

No nosso projeto utilizamos um laser operando em 852 nm, com uma grade de difração que possui 1200 linhas/mm, montada numa configuração na qual o feixe difratado de primeira ordem é retrorefletido para o diodo (configuração Littrow). Como observamos na Fig 3.1, a grade está colocada numa cerâmica piezoeléctrica, utilizada para ajustar o tamanho da cavidade óptica de modo a variar a frequência de operação do laser.

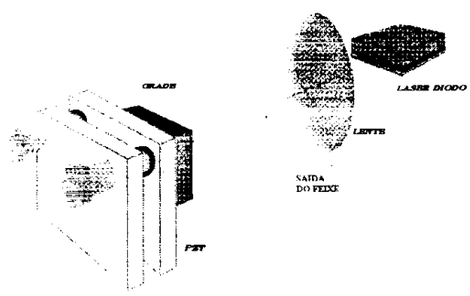

Fig 3.1 - Esquema de montagem do laser de diodo de cavidade externa.

O laser é alimentado por uma fonte de corrente de baixo ruído, que permite a modulação da corrente e possui um sistema de proteção, que serve para desligar suavemente a fonte quando houver uma queda de energia e impedir sua reativação brusca quando a energia for restabelecida. Isto é feito para evitar picos na corrente de alimentação do laser, que prejudicariam o seu funcionamento podendo até queimá-lo. O laser também possui um controle de temperatura que utiliza um circuito PID (proporcional, integral e derivativo), e está é apresentada no capitulo 4. Utilizamos um termistor como elemento sensor e um "Peltier" como elemento atuador, que irá transferir calor do laser para o reservatório, ou vice-versa [3], como mostra a Fig 3.2. O laser de cavidade externa é montado em uma caixa de alumínio com 23 cm de comprimento, 12.5

cm de largura e 11.5 cm de altura. Esta caixa é utilizada como uma proteção térmica e acústica.

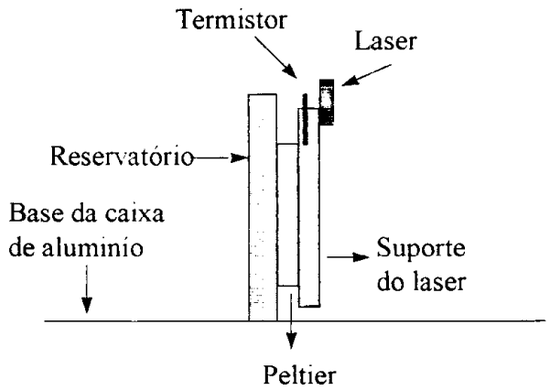

Fig 3.2 : Esquema do suporte mecânico do laser.

III.2) Estabilização do laser de diodo utilizando absorção saturada [4]

Para estabilizar a frequência, o laser de cavidade externa é travado na transição hiperfina 6 $S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6\ P_{3/2}\ (F'=5)$ do átomo de césio pela técnica de absorção saturada. Esta técnica utiliza um laser monocromático e sintonizável interagindo com um sistema atômico, alargado inhomogeneamente pelo efeito Doppler, para saturar seletivamente a transição de um grupo específico de velocidades.

Considere um feixe de laser (feixe incidente) , com frequência w_L e vetor de onda **k**, incidindo sobre uma célula de um gás que possui uma transição entre dois níveis atômicos (a e b), de separação em frequência w_0 . O laser interagirá ressonantemente com os átomos cujas velocidades axiais satisfaçam a condição de ressonância dada por :

$$w_L - kv = w_0 \tag{3.1}$$

A distribuição de população inicial nos níveis atômicos como função da velocidade, dada pela distribuição de Maxwell-Boltzmann, é modificada pela interação do laser com os átomos do gás. Esta modificação é apresentada na Fig 3.3. Nela percebemos a produção de um buraco na distribuição populacional do nível fundamental (a), que é conhecido como buraco de Bennet, e de um pico na distribuição do nível excitado (b). A técnica de absorção saturada consiste em sondar essas alterações nas populações atômicas.

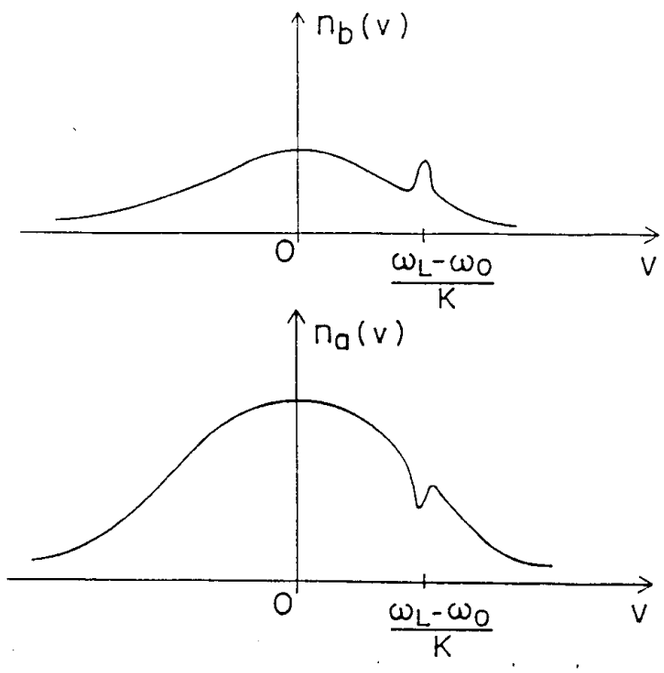

Fig 3.3 : Distribuição de populações para os átomos nos estados fundamental (a) e excitado (b) na presença do laser de bombeio.

Para determinarmos a posição em frequência do buraco de Bennet, que foi aberto pelo feixe incidente, colocamos um outro feixe de laser (feixe de prova) de incidindo sobre a cela em sentido contrário ao feixe de incidente. Obtemos o feixe de prova colocando um espelho após a célula, de modo que o feixe refletido retorne exatamente sobre o primeiro, este feixe será praticamente igual ao incidente [3]. O feixe de prova estará em ressonância com os átomos cujas velocidades satisfaçam a condição dada por :

$$w_L + kv = w_0 \tag{3.2}$$

que difere da eq.(3.1) pela troca de sinal de K.Assim teremos dois buracos de Bennet na distribuição de população nas posições $v_{\pm} = \pm (w_L - w_0)/k$. Quando $v = 0$ os dois feixes vão interagir com os mesmos átomos, fazendo a intensidade sentida por eles ser dobrada e tornando o buraco mais largo e profundo, como mostra a Fig 3.4. A quantidade medida experimentalmente na absorção saturada é a variação relativa da intensidade do feixe sonda, que determina o coeficiente de absorção no meio. O coeficiente de absorção do meio é dado por :

$$\alpha_S(w_L) = \alpha_0\left[1 - \frac{S}{2}\left(\frac{\Gamma^2}{(w_L - w_0)^2 + \Gamma^2}\right)\right] \tag{3.3}$$

onde , α_0 é o coeficiente de absorção linear, com largura Doppler, Γ é a largura de linha homogênea da transição e S o parâmetro de saturação. Para $w_L = w_0$ temos uma diminuição no coeficiente de absorção para $\alpha_0(1-S/2)$ e longe do centro temos α_0. Assim é possível observar o " lamb dip" no perfil de absorção exatamente na linha de transição, como mostra a Fig 3.4.

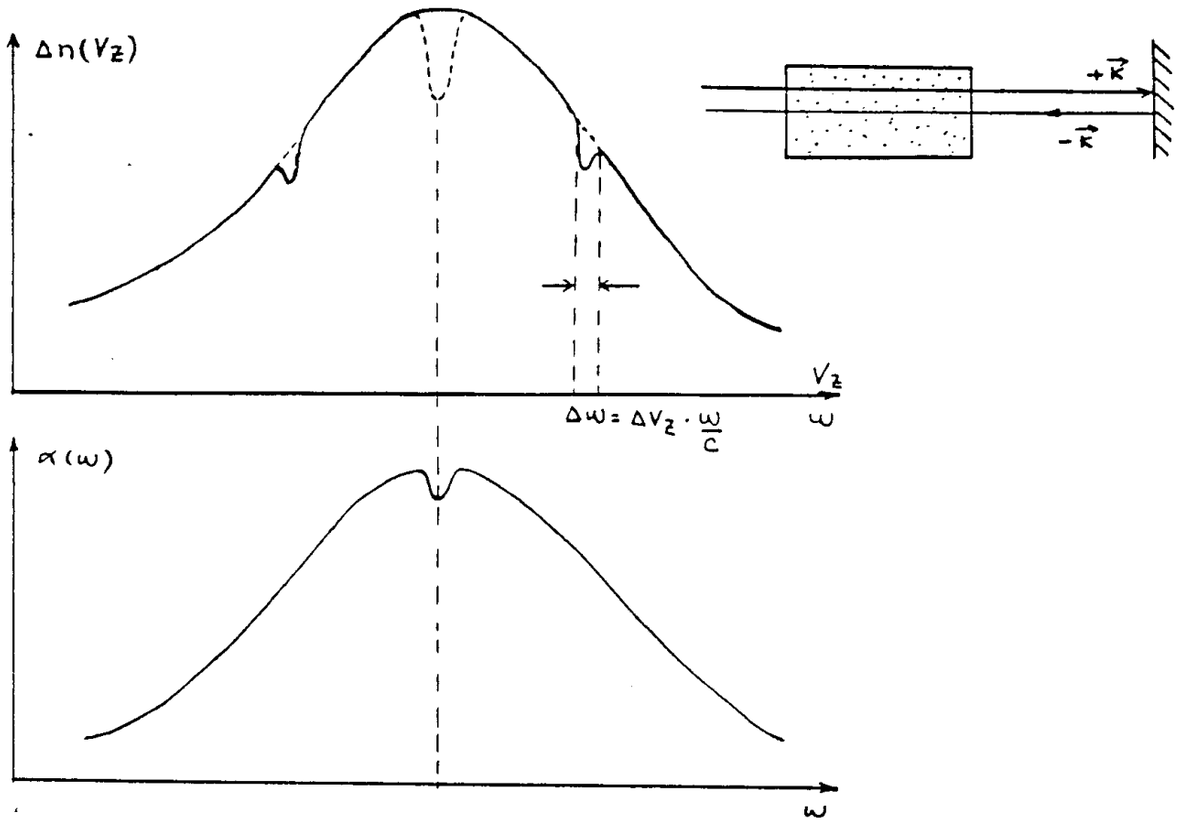

Fig 3.4 Distribuição de população e coeficiente de absorção para dois feixes (incidente e prova).

O esquema montado da para a absorção saturada, mostrado na Fig 3.5, funciona da seguinte maneira: a saída do diodo laser tem uma pequena fração desviada por uma lâmina de vidro para uma cela de referência. Um espelho colocado após a cela provoca o retorno do feixe de modo a ocorre a saturação da absorção. O foto-diodo colocado após a lâmina de vidro capta o sinal da absorção saturada, que é enviado para o sistema de controle, para travar o laser na transição desejada. A porção do feixe de laser que não é desviada pela lâmina de vidro passa através de um isolador ótico de Faraday, cuja função é evitar o retorno óptico para o laser. Após o isolador, o feixe de laser incide num

modulador acusto-óptico, cujas saídas são os chamados laser de bombeio e de detecção, utilizados no processo de transição atômica.

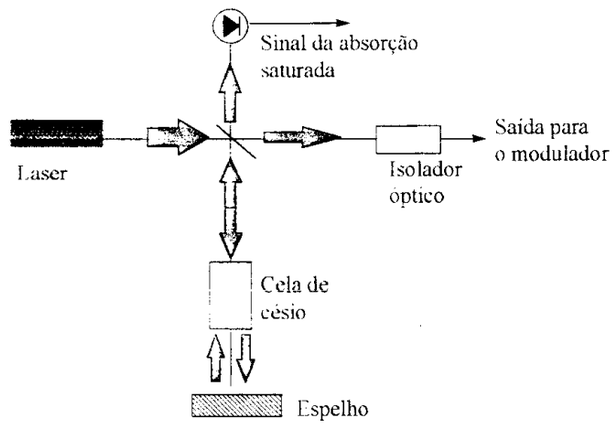

Fig 3.5 : Montagem óptica para a observação da absorção saturada.

Para estabilizar a frequência do laser na linha de absorção saturada do césio, utilizamos um esquema de modulação de baixa frequência, que é mostrado na Fig 3.6. A frequência do laser é modulada por um sinal senoidal de 80 KHz, proveniente do oscilador interno de um amplificador lock-in, aplicado à fonte de corrente do laser. O sinal de absorção detectado pelo foto-diodo é amplificado, filtrado e demodulado pelo lock-in [1]. O sinal de saída do lock-in é utilizado como sinal de erro para a correção de frequência do laser. O sinal de erro é integrado e aplicado ao driver do PZT, sendo antes somado com uma rampa, que quando ligada permite a varredura do laser em 3.5 GHz, cobrindo facilmente a largura Doppler do césio.

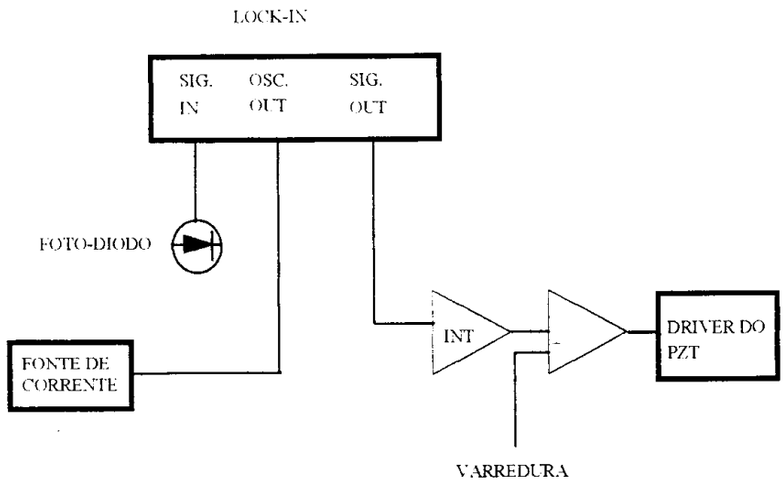

Fig 3.6 : Esquema para estabilização do laser de diodo.

III.3) Modulador acústo-óptico

Como dito anteriormente, o laser tem sua frequência travada na transição hiperfina $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}$ (F'=5) do átomo ^{133}Cs, ou seja, este feixe já é a frequência de detecção. Para a produção do laser de bombeio, o feixe de saída do isolador óptico (laser de detecção) passa através de um modulador acústo-óptico que dá origem a um outro feixe com frequência travada na transição $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}$ (F'=4), funcionando como laser de bombeio. Este modulador modifica a frequência da luz difratada por uma quantidade igual a frequência acústica nele injetada [5], como pode ser vista na Fig 3.7.

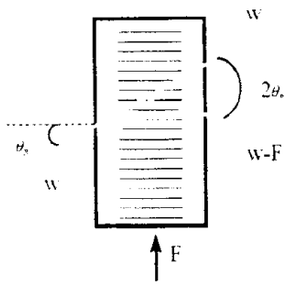

Fig 3.7 : Modulador acusto-óptico.

O feixe de entrada do modulador (laser de bombeio) possui frequência W. F é um sinal de 251.4 MHz produzido por um gerador de sinal RF (Fluke 6060B), que corresponde à diferença de frequência entre os níveis $6P_{3/2}$(F =4) e $6P_{3/2}$ (F'=5). O laser de bombeio terá então frequência W-F, que é a frequência desejada.

III.4) Sistema óptico completo

O esquema do sistema óptico completo do relógio atômico é mostrado na Fig 3.8. No esquema podemos observar o laser de diodo, que foi construído em uma caixa de alumínio, na qual se colocou uma vedação acusto-mecânica, o sistema de absorção saturada, o isolador óptico e o modulador acusto-óptico. Todo o sistema óptico foi montado sobre uma mesa de Granisin (granito sintético), como mostra a Fig 3.9, projetada e construída no Laboratório de Máquinas Ferramentas (Lamafe) da USP em São Carlos. Esta mesa reduz em 8 vezes as vibrações mecânicas, colaborando para a estabilização do laser.

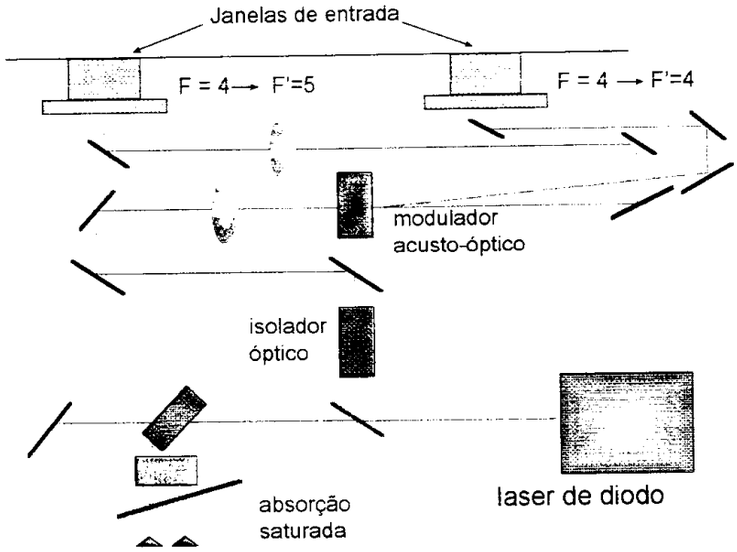

Fig 3.8 : Esquema completo da sistema óptico

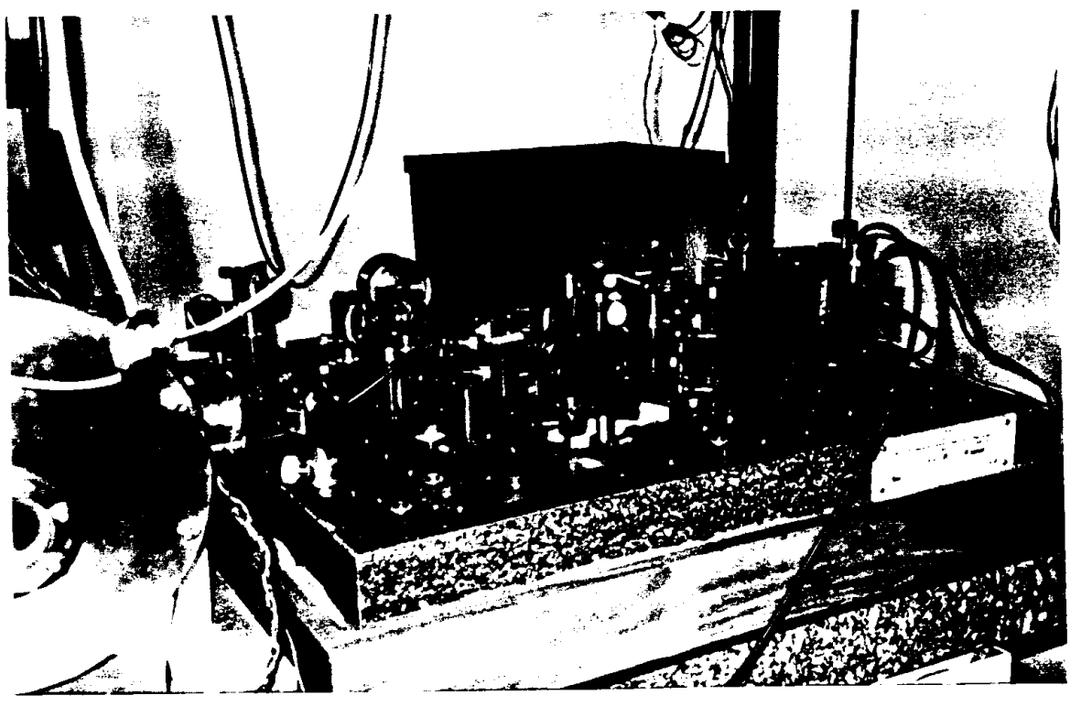

Fig 3.9 : Foto da montagem óptica.

Referências

[1] G. D. Rovera, G. Santarelli and A Clairon, Rer. Sci. Instrum **65**, 1502 (1994).

[2] M. W. Fleming and A. Moorodian, IEEE J. Quantum Electron QE-**17**,_44 (1981).

[3] A. M. Tuboy - Tese de mestrado IFSC/USP (1990).

[4] W. Demtröder, "Laser Spectroscopy", Springer Series in Chemical Physics Springer-Verlag, Berlin (1982).

[5] R. D. Guenther, "Modern Optics", Jonh Wiley & Sons, New Iork(1990).

IV. Eletrônica e controle

IV.1) Rádio-frequência

Como dito anteriormente, o sintetizador é utilizado para gerar um sinal de 9.192631770 GHz, que é enviado para a cavidade de microondas. Para produzir este sinal, o sintetizador conta com 3 osciladores de cristal de quartzo, um de 5 MHz, um 100 MHz e um de 10.7 MHz, como mostra a Fig 4.1. O sinal do oscilador de 5 MHz é multiplicado por dois, gerando 10 MHz. Ao mesmo tempo, outro sinal de 10 MHz é gerado pela divisão por 10 do sinal do oscilador de 100 MHz. Esses dois sinais de 10 MHz tem suas fases comparadas. Desta comparação é gerado um sinal de erro que é usado para sintonizar a fase do oscilador de 100 MHz. Uma vez sintonizado, o sinal deste oscilador é multiplicado por 5 produzindo um sinal de 500 MHz, que é somado com um sinal de 10.7 MHz produzindo 510.7 MHz. O sinal de 10.7 MHz também é produzido pelo oscilador dede 10.7 MHz, sendo este sintonizado por um sinal de 10.7 MHz produzido num gerador de função sintetizado (Stanford DS345). O sinal de 510.7 MHz é filtrado e tem sua potência aumentada antes de ser usado para conduzir um " step-recovery diode" (SRD), que produz um pente de bandas de frequência . Estas bandas, ao passarem por um filtro de 9.192 GHz fornecem uma saída de 9.192 GHz. Este

sintetizador possui características necessárias para atender estabilidade de frequência de 1 parte em 10^{17} para medidas de tempo de um dia ou mais [1].

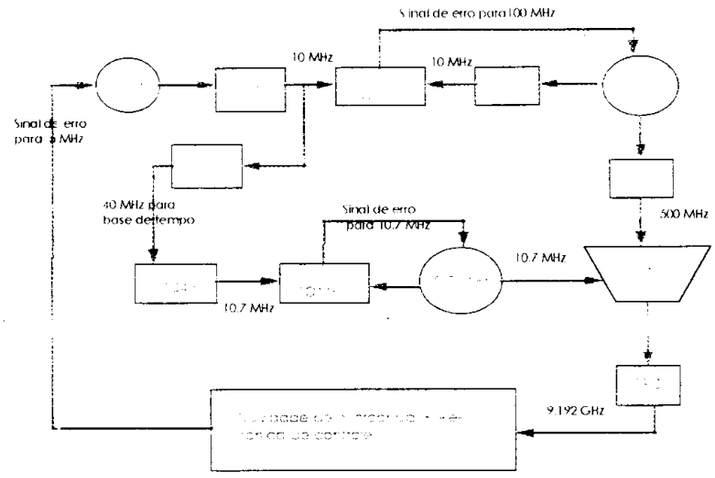

Fig 4.1 - Esquema do sintetizador de rádio-frequência e sua ligação com a cavidade de microondas e o sistema de controle.

Uma vez que o gerador de função (DS345) é usado na produção do sinal de 9.192 GHz, é necessário que ele esteja sincronizado com um dos osciladores fundamentais do sintetizador do NIST (5 MHz ou 10 MHz). Esta sincronização é feita através de um sinal de 40 MHz, produzido através de multiplicações do sinal do oscilador de 5 MHz, que é conectado com a base de tempo do DS345. O oscilador de 5 MHz, que é utilizado para sincronização do oscilador de 100 MHz e do gerador de função, é sincronizado através de um sinal de erro proveniente da transição entre níveis hiperfinos do estado

fundamental do césio. Assim temos um sistema fechado, caracterizando um padrão de frequência atômico.

No esquema do sintetizador, o único componente que não tem seu funcionamento claramente explicitado é o "step-recovery diode" (SRD). Ele é um diodo que possui característica de condução não linear, do tipo diodo armazenador de carga e é útil para aplicações em multiplicação de frequência, onde uma alta eficiência em geração de harmônicas é necessária [2]. Na Fig.4.2 temos a resposta do diodo quando polarizado com uma voltagem V_b, e uma voltagem RF senoidal é colocada através dele. O diodo irá conduzir corrente quando a soma da voltagem dc (V_b) com a voltagem RF for maior que a voltagem de corte direto (V_0). Quando a voltagem do diodo ficar abaixo da voltagem de corte e começar a porção negativa da onda de RF, a corrente de condução permanecerá devido à carga armazenada na estrutura, até que esta carga seja totalmente extraida do diodo. A rapidez no decréscimo da corrente terminal cria um mecanismo de formas de ondas que são muito ricos em harmônicas. Se colocarmos um filtro após o diodo podemos selecionar uma determinada frequência. Por isso usamos o SRD para obtermos a frequência de 9.192GHz a partir de 510.7 MHz

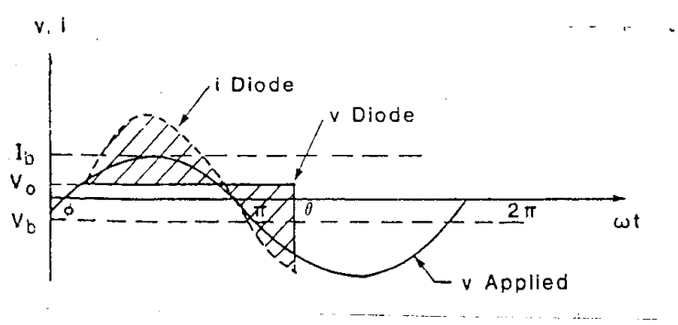

Fig 4.2 : Curva característica de um SRD.

IV.2) Eletrônica

A parte eletrônica do laser de diodo, que envolve o controle de temperatura do laser e a fonte de tensão para sinal de varredura aplicado no PZT, foi desenvolvida na tese de mestrado de A. M. Tuboy [3]. Esta seção se restringe a explicar a eletrônica utilizada para o tratamento do sinal de luminescência e fonte de corrente utilizada na alimentação do laser.

A fonte de corrente, mostrada na Fig 4.3, é um esquema relativamente simples. Um LM399 é utilizado para produzir uma tensão estável de 6,4 V. Esta tensão é enviada para dois potenciômetros para permitir um ajuste grosso e um ajuste fino da corrente. A saída destes potenciômetros é somada ao sinal de modulação da fonte de corrente, através de amplificador somador de ganho 1. A saída deste amplificador alimenta um transistor na topologia de fonte de corrente. A corrente produzida é enviada para o laser e monitorada por um sistema de realimentação, que compensa qualquer alteração da corrente que não seja proveniente dos potenciômetros de ajuste ou da modulação. A principal característica desta fonte é a utilização de componentes de precisão. Todos os resistores utilizados são de 1% de precisão no valor de sua resistência. Os amplificadores operacionais utilizados, OP27 e OP37, são operacionais de alta precisão e baixo ruído [4], ou seja, a qualidade desta fonte é determinada pela qualidade dos seus componentes.

O tratamento realizado no sinal de luminescência consiste em uma amplificação, pois o sinal medido pelo detetor é muito baixo, seguido por um controle de offset e uma

filtragem. Na amplificação usamos uma topologia de transimpedância com o amplificador operacional BB 3528 (OP) na Fig 4.4.

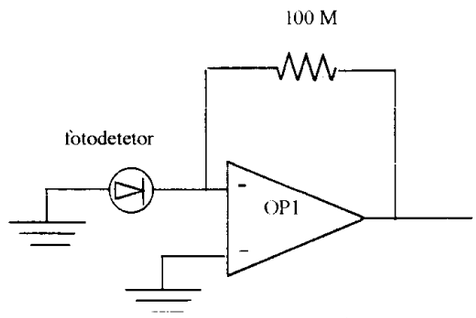

Fig 4.4 : Amplificação do sinal de luminescência.

Após a amplificação, o sinal passa por um circuito de filtragem, descrito na Fig 4.5. Neste circuito, o primeiro estágio serve para diminuir o "offset" do sinal de luminescência, o segundo estágio para retirar o ruído de 60 Hz do sinal e o terceiro estágio é um filtro passa baixa, para retirada de algum ruído de alta frequência. Todo esse tratamento é realizado para obtermos as franjas com a maior amplitude possível, sem ruído e sem "offset". O sinal captado na detecção de luminescência é da ordem de mV e após passar pelo tratamento descrito acima atinge a amplitude de alguns volts. O sinal, já na ordem de volts, é enviado para o computador através de placas de aquisição, onde o sistema de controle é realizado.

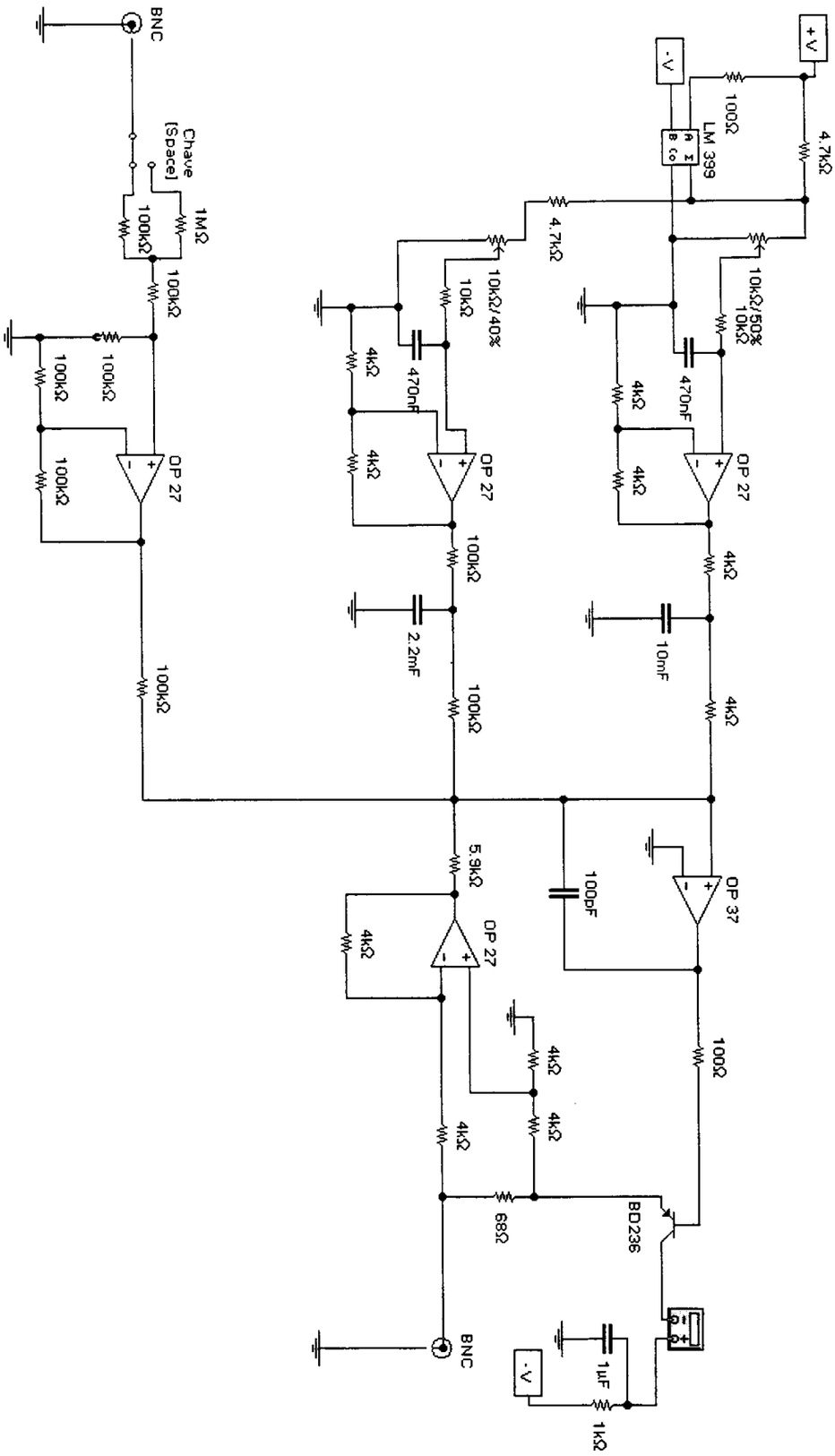

Fig 4.3 : Esquema da fonte de corrente

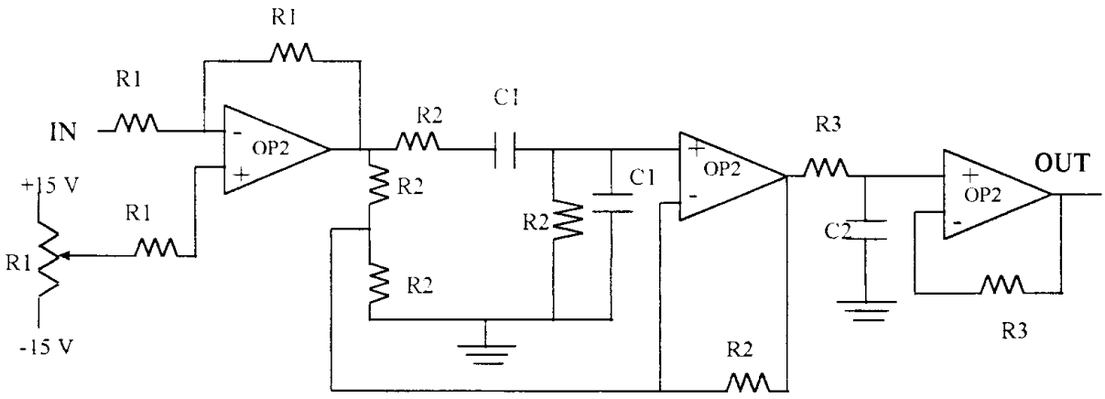

Fig 4.5 : Circuito de filtragem do sinal de luminescência. OP2 é um amplificador 3140, R1=100 KΩ, R2 = 820Ω, R3 = 3,9 KΩ, C1 = 3,3 μF, C2 = 1 μF.

IV.3) Sistema de controle

Como dito anteriormente, o controle é realizado por um micro-computador utilizando um programa escrito na linguagem C (LOOP, ver apêndice A). Este programa analisa o sinal enviado pelo sistema de detecção de luminescência, após sofrer todo tratamento descrito na seção anterior. O programa gera um sinal de erro que é a diferença de tensão captada no detetor entre dois pontos pre-definidos na franja de Ramsey, como mostra a Fig 4.6. Estes pontos são chamados de ponto de frequência baixa (frequência central - modulação) e ponto de frequência alta (frequência central + modulação). A frequência central é 9.192631770 GHz e a modulação é de 20 Hz. Estas variáveis são definidas dentro do programa. O sinal de erro

é integrado digitalmente por adição simples, gerando um sinal de saída. Optou-se por um controle digital para que fosse possível realizar uma integral numérica, evitando todos os problemas de um integrador analógico com ganho finito [5]. O sinal de saída deste controle é utilizado para corrigir a frequência do oscilador de 5 MHz, modificando os pontos de alta e baixa frequência na franja de Ramsey, de maneira a produzir um novo sinal de erro. O objetivo do controle é modificar a frequência do oscilador até o sinal de erro tornar-se zero, pois neste instante os pontos de alta e baixa frequência estarão centralizados em relação à frequência central, ou seja, a frequência que chega à cavidade de microondas é exatamente de 9.192631770 GHz.

Para obtermos as franjas de Ramsey precisamos injetar na cavidade de microondas um sinal modulado em torno da frequência de 9.192 GHz, como descrito na seção I.3. Este sinal é obtido ao modularmos o sinal de frequência 10.7 MHz produzido no gerador de frequência. A modulação deste sinal implica na modulação do sinal de frequência 9.192 GHz produzido pelo sintetizador de rádio-frequência, pois o sinal de 10.7 MHz é um dos componentes da cadeia de multiplicação que produz o sinal de 9.192 GHz. Assim, todos os programas utilizados no controle agem sobre o gerador de frequência da Stanford determinando a modulação do sinal de 10.7 MHz. O gerador de frequência está interligado com o computador através de uma placa GPIB. Com isso, podemos controlar a modulação do sinal de frequência de 9.192 GHz através do micro-computador.

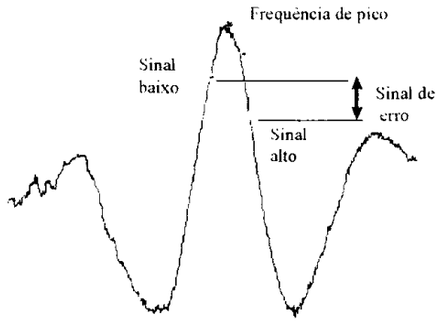

Fig 4.6 : Determinação do sinal de erro na franja de Ramsey.

Referências

[1] Manual do sintetizador de frequência "NIST HR1#003"(1996).

[2] I. Bahl and P. Bhartia, "Microwave solid state circuit design", Jonh wiley & Sons, New York (1988).

[3] A. M. Tuboy - Tese de mestrado, IFSC/USP (1990).

[4] Data Book of Linear Circuits, Texas Instruments, vol 1(1992).

[5] G. D. Rovera, E. Clercq and A. Clairon, "An analiser of major frequency shifts in the LPTF optically pumped primary frequency standard", IEEE T. U. F. and Frequency Control **42**, 2 (1994).

V. Resultados

V.1) Franjas de Ramsey

Como dito anteriormente, nosso objetivo é travar o oscilador de 5 MHz na transição $6S_{1/2}(F=3, m_F=0) \rightarrow 6S_{1/2}(F'=4\ m_F=0)$ do césio e assim obtermos um padrão de frequência atômico. Utilizamos o programa Ramsey (apêndice A) para determinar as características da modulação do sinal de 10.7 MHz. As características da modulação são o tipo de onda do sinal de 10.7 MHz, sua amplitude, sua frequência central e varredura em torno desta. Os valores destas características são parametros do programa Ramsey, que podem ser modificados pelo usuário.

A franja de Ramsey apresentada na Fig 5.1, foi obtida com um sinal de 10.7 MHz na forma de onda triangular, com 10 dB de amplitude, uma varredura de 300 Hz e frequência central de 10.701765 MHz. Ao aumentarmos a varredura da modulação para 3000 Hz, através de modificações nos parâmetros do programa Ramsey, observamos as todas as transições possíveis, mostra a Fig 5.2.

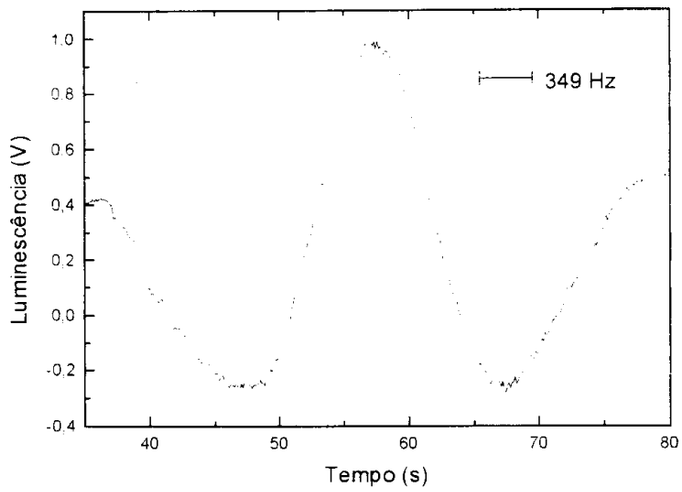

Fig 5.1 : Franjas de Ramsey mostrando a transição F=4,(m_F =0) → F=3 (m_F =0).

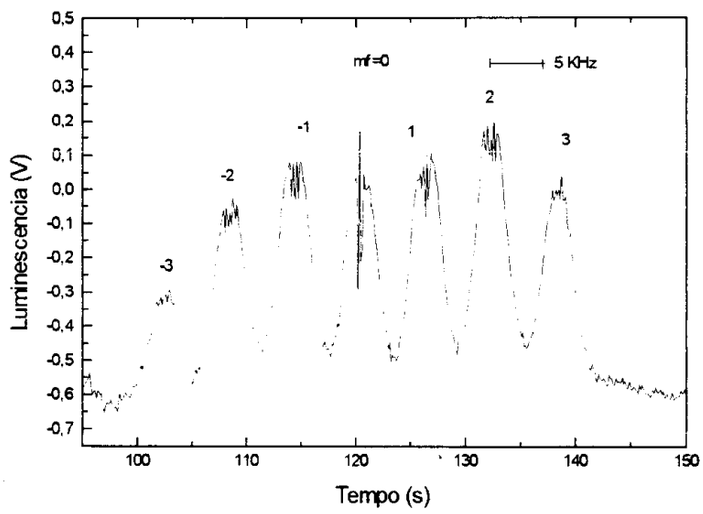

Fig 5.2 : Franjas de Ramsey nas 7 transições do césio.

V.2) Avaliação típica do relógio atômico

Para avaliarmos um padrão de frequência é necessária a utilização de um outro padrão para comparação, que seja mais preciso do que o que se deseja aferir. Um padrão de frequência mais preciso que o relógio atômico de césio que construímos é o maser de hidrogênio, que se utilizado para sincronizar o oscilador de 5 MHz, como mostra a Fig 5.3, fará com que o oscilador tenha a precisão do maser [1]. A necessidade desta sincronização é facilmente entendida se lembramos que o oscilador de 5 MHz é utilizado para gerar o sinal 9.192 GHz. Este sinal produz a transição do átomo de césio e esta gera, através da técnica das franjas de Ramsey, um sinal de erro no sistema de controle utilizado para correção do oscilador de 5 MHz. Se o oscilador de 5 MHz já está sincronizado, o sinal de saída do programa de controle não é mais enviado para o oscilador e sim armazenado e utilizado posteriormente para o calculo da variância de Allan.

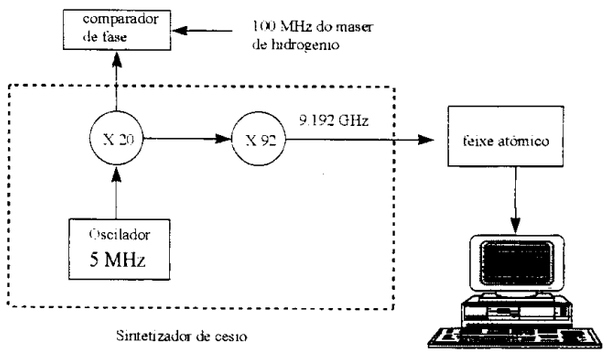

Fig 5.3: Esquema para aferição de uma padrão de frequência atômico.

A variância de Allan é uma medida que nos fornece a estabilidade do padrão de frequência em relação ao padrão mais preciso. Ela é uma relação entre os valores esperados do desvio padrão da flutuação de frequência para um número finito de dados e o valor médio de tempo finito do desvio padrão [2]. Esta é uma importante medida para determinação do fator de qualidade de um padrão de frequência. Outros fatores também são medidos para a caracterização do padrão de frequência atômico. Entre eles temos a homogeneidade do campo magnético, o efeito do deslocamento Doppler de segunda ordem, os erros relacionados com a cavidade de microondas, o deslocamento devido à radiação de corpo negro e "offsets" eletrônicos [1,3]. Na tabela abaixo apresentamos o esquema dos principais deslocamentos de frequência em um padrão de frequência primário no LPTF e incertezas em uma parte em 10^{-14} [1].

Tabela I - Principais deslocamentos de frequência do relógio atômico francês

Fonte de variação de frequência	Variação de frequência (x 10^{-14})	Incerteza (x 10^{-14})
Campo magnético	24020	0.3
Dopller de segunda ordem	-35	3
Deslocamento de fase da cavidade	128	8
Influência da cavidade	-6.6	1.5
Influência de Rabi	0.3	.3
Deslocamento inexplicável	____	6
Eletrônicos	____	3

USC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA E INFORMAÇÃO

Como até o presente momento não conseguimos um outro padrão de frequência para realizarmos a sincronização, ficamos incapacitados de calcular a variância de Allan. Com relação a medidas dos erros e deslocamentos citados na seção anterior, elas não foram realizadas por uma questão de falta de equipamento adequado. Mas com o sinal de erro que é armazenado pelo programa LOOP, podemos para calcular o desvio padrão do oscilador de 5 MHz em relação à frequência de ressonância do átomo de césio.

Sendo δA(n) a amplitude do erro medido em cada ponto e supondo que δA=0 corresponde ao valor verdadeiro, a variância em cada ponto é dada pela equação:

$$\sigma^2(n) = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n}[\delta A(i)]^2 \qquad (5.1)$$

a variância do processo é :

$$\sigma^2{}_v = \lim_{n\to\infty}\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n}[\delta A(i)]^2 \qquad (5.2)$$

e o desvio padrão é dado por :

$$\sigma = \sqrt{\sigma_v^2} \qquad (5.3)$$

Para cada arquivo de sinal de erro armazenado calculamos a variância e o desvio padrão. O desvio padrão serve para sabermos em quantos Hz o oscilador de 5 MHz foi deslocado. A estabilidade do oscilador em relação à transição atômica é calculada dividindo este deslocamento pela frequência de transição. Um sinal de erro aquisionado é mostrado na Fig 5.4, sua variância na Fig 5.5 e seu desvio padrão na Fig 5.6.

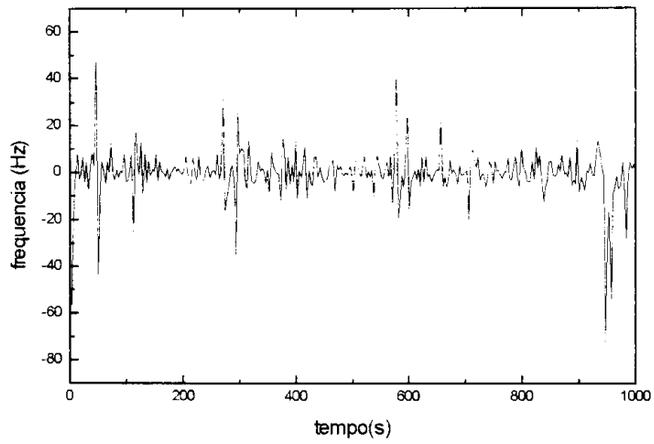

Fig 5.4 : Sinal de erro.

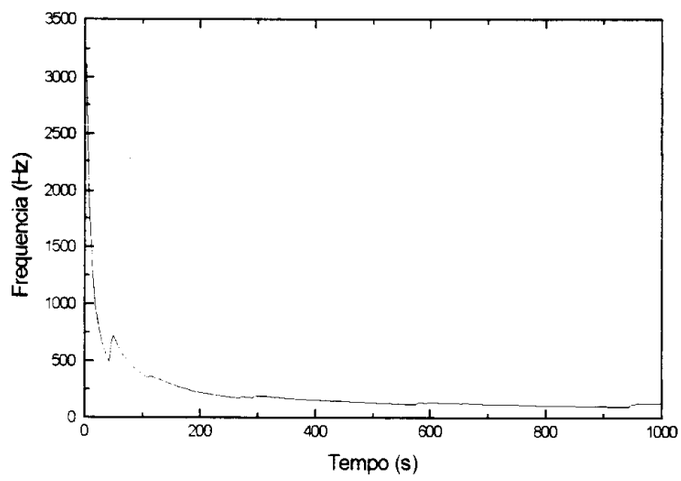

Fig 5.5 : Variância do sinal de erro.

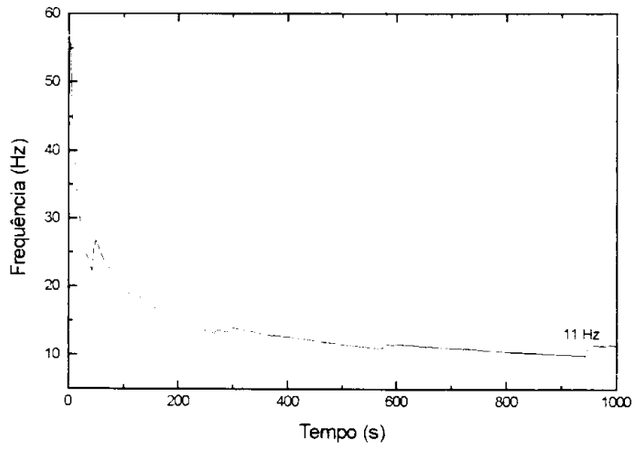

Fig 5.6: Desvio padrão do sinal de erro.

De acordo com o gráfico da Fig 5.6. o deslocamento de frequência do oscilador foi de 11 Hz. Analisando outros gráficos de desvio padrão concluímos que a média de deslocamento do oscilador é de aproximadamente 10 Hz. Dividindo este valor por 9. 192 631 770 GHz temos uma precisão de 10^{-9} do oscilador em relação a transição atômica, que é a precisão esperada para relógios atômicos de feixe de césio [4].

Referências

[1] G. D. Rovera, E. Clercq and A. Clairon, "An analiser of major frequency shifts in the LPTF optically pumped primary frequency standard", IEEE T. U. F. and Frequency Control **41**, 2 (1994).

[2] D. W. Allan , "Statitics of atomic frequency standards", Proccedings of IEEE **54**, 2 (1966).

[3] R. E. Drullinger, J. H. Shirley, J. P. Lowe and D. J. Glaze, "Error analysis of NIST optically pumped primary frequency standard", IEEE T. on Instrumentation and Measurement **42**, 2 (1993).

[4] N. F. Ramsey, J. Research of National Bureau of Standards **88**, 5 (1983).

VI. Conclusões

O objetivo deste trabalho era a construção de um relógio atômico de feixe de césio. Esta construção envolveu a parte mecânica (câmara de vácuo, acoplamento e refrigeração das bombas de vácuo), a parte elétrica (teste da fonte estabilizada de corrente alternada, distribuição das tomadas no laboratório), a parte eletrônica e alguns programas de controle. Como resultado deste trabalho temos um relógio atômico com uma precisão de 1 parte em 10^9.

Um dos principais problemas do relógio, que é evidenciado nos resultados aqui apresentados, é o pouco tempo que conseguimos manter o controle da frequência da cavidade de microondas funcionando, porque não conseguimos manter o laser de diodo na linha D_2 do césio. Vários fatores colaboram para instabilidade do laser, dentre eles podemos citar as flutuações da temperatura, que influem diretamente na variação de frequência. Por isso devemos ter um bom controle de temperatura no laser, que é realizado segundo o sistema descrito na ref [1]. Entretanto, sua eficiência é questionável pelo fato do circuito usar resistores comuns, quando deveria usar resistores mais estáveis em relação a temperatura (resistores de 150 ppm). Também devemos utilizar um controle de temperatura na caixa, para manter as vizinhanças do laser a uma temperatura constante. Este controle já está em fase de testes. Ainda com relação à temperatura,

necessitamos também ter um controle de temperatura na sala para evitar grandes variações na sua temperatura , como as mostra a Fig 6.1.

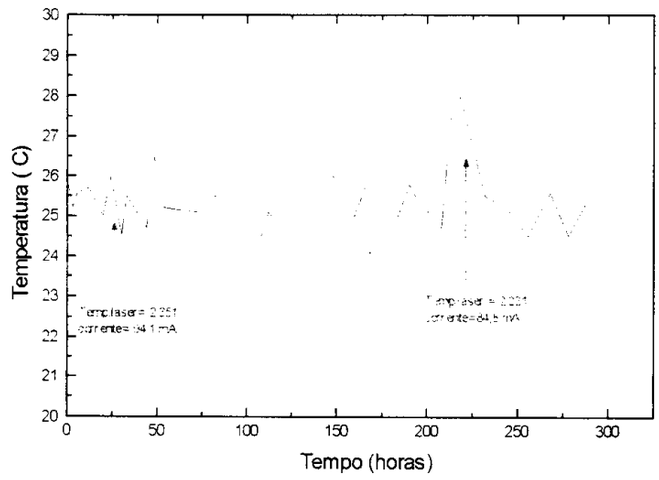

Fig 6.1: Variação da temperatura na sala.

Outro fator primordial para uma boa estabilização do laser é a fonte de corrente utilizada para sua alimentação. Esta fonte deve ser bastante estável e com pouco ruído. Podemos utilizar uma fonte comercial, pela qual iremos pagar caro para garantirmos uma boa estabilidade e baixo nível de ruído. Se optarmos por montar, que foi o nosso caso, enfrentaremos dificuldade na obtenção de componentes eletrônicos adequados, devido a falta de componentes de precisão e baixo ruído no Brasil. Mas em hipótese alguma podemos abrir mão da estabilidade e baixo nível de ruído da fonte a ser utilizada. Não só a fonte de corrente, mas todos os equipamentos utilizados no relógio devem ter seu

funcionamento observado para evitar a introdução de ruído eletrônico em qualquer etapa da produção de um padrão atômico. Outra questão é quanto ao ruído sonoro. A sala deve ter uma proteção contra ruídos externos e os internos devem ser minimizados o máximo possível, pois como mostra a Fig 6.2, o laser no seu estado atual é bastante sensível a ruídos sonoros.

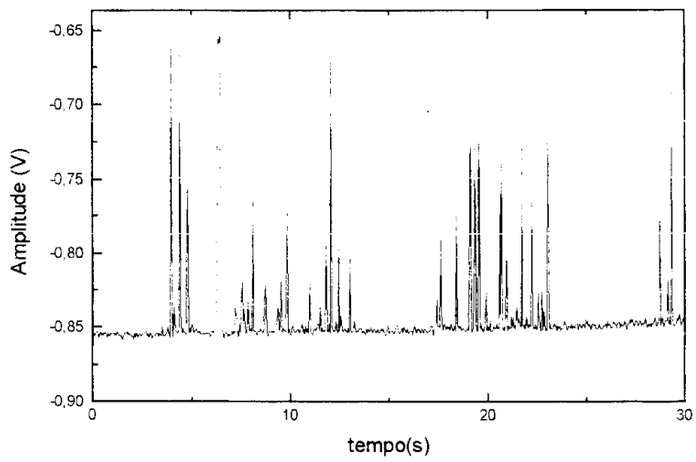

Fig 6.2 : Sinal de correção do laser com o ruído de palmas sendo batidas na sala.

O próximo passo a ser dado é realização das mudanças acima citadas, para conseguirmos manter o laser na linha por semanas. Isto inclui a instalação do contolador de temperatura na caixa de alumínio, manter a temperatura da sala estável e a utilização de controladores de temperatura do laser de maior precisão. Ao conseguirmos estabilizar o laser durante um período de tempo considerável, podemos sincronizar o oscilador de 5 MHz com um padrão mais preciso. Isto pode ser feito por comunicação via satélite e

assim podemos calcular a variância de Allan para sabermos a verdadeira precisão do relógio. Com a conclusão do relógio atômico de feixe de césio, partiremos para a construção de um relógio atômico mais preciso que este, o relógio de átomos frios.

Ainda há muitos melhoramentos a serem feitos, tanto na área de infra-estrutura do laboratório, como na estabilização do laser, na parte de detecção, no sistema de aquisição e controle. Mas o primeiro relógio atômico brasileiro foi construído e apresenta uma estabilidade inicial relativamente boa, dando conhecimento ao mundo que o Brasil é possuidor da tecnológica para determinação de tempo e frequência tempo.

Referências

[1] A. M. Tuboy - Tese de mestrado, IFSC/USP (1990)

Apêndice A

```
/*
 Programa LOOP
 Utilizado para a analise das franjas de Ramsey e
produção do sinal de correção
*/

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <conio.h>
#include "\p\at-gpib\c\decl.h"

#include      "\p\lw23\include\lwsystem.h"
#include      "\p\lw23\include\formatio.h"
#include      "\p\lw23\include\dataacq.h"

#define BUF_SIZE  500
char buffer[500] ;

/* funções internas */
void loop_cnf_read();
int sig_read();
void manda( int device, char *comando );
void report_error(int fd, char *errmsg);
void set_fr( int device, double freq );

/* Definição das constantes utilizadas no programa*/

# define MIO_BOARD  1 /* Placa de aquisição AT-MIO-16 */

void main ()
{

   int blankt, acqt, gain, vo_offs;
   double freq_p, modw, gate;

   int i ;
   int voltout;
```

```
   double freq_l, freq_h;
   long integ,integ2,maxinteg, sig_l,sig_h,sig_min, sig_peak;
  int  syn;
  char  *buffer;
   int err,boardCode;

  if( (buffer=malloc(BUF_SIZE))==NULL)
     report_error(syn,"Não há memoria suficiente \n");
/*
   Reading of parameters and display
 */
   loop_cnf_read(&freq_p,&modw,&blankt,&acqt,&gain,&vo_offs,&gate);
   freq_l = freq_p-modw;
   freq_h = freq_p+modw;
   maxinteg= (long) abs(gain) * 2048;
   FmtOut("\nfreql %f\nfreqh %f\ntb %d\nta %d\ng %d\n vo_offs%d \n",
            freq_l,freq_h, blankt, acqt, gain,vo_offs);
/*

Inicialização e configuração dos aparelhos
 */
err= Init_DA_Brds (MIO_BOARD, &boardCode);
   if(err) FmtOut (" err Init %d %d \n", err,boardCode);
   err= AO_Write(MIO_BOARD,0,vo_offs);
   if(err) FmtOut (" err AO_write  %d \n", err);
  /* Inicializando o gerador de função*/
  if ((syn = ibdev(0, 07, 0, T10s, 1, 0)) < 0)
     report_error(syn, "Nao pode abrir o gerador de função ");
  ibclr(syn);
  if (ibsta & ERR)
     report_error(syn, "Nao pode limpar o gerador ");
  manda(syn, "*RST");

/*
 Lendo os sinais e calculando o sinal
 */
   set_fr( syn, freq_p );
   sig_read(blankt,&sig_peak);
   sig_read(acqt,&sig_peak);
   set_fr( syn, freq_l );
   sig_read(blankt,&sig_l);
   sig_read(acqt,&sig_l);
   set_fr( syn, freq_h );
   sig_read(blankt,&sig_h);
```

```
  sig_read(acqt,&sig_h);

  if(sig_l<sig_h) sig_min= sig_peak-(sig_peak-sig_l)*1.2;
  else            sig_min= sig_peak-(sig_peak-sig_h)*1.2;

  FmtOut("sig_peak %d[b4] sig_l %d[b4] sig_h %d[b4] sig_min %d[b4]\n",
        sig_peak,sig_l,sig_h,sig_min);
/*
 * main loop
 */
  integ=0;
  integ2=0;
  while(!err)
  {
/*      voltout=(integ2+integ)/gain+vo_offs; */
     voltout=(integ2+integ)/gain+vo_offs;
     FmtOut ("s_d %d[b4] i %d[b4] i2 %d[b4] %d\n",
            sig_h-sig_l,integ,integ2,voltout);

     set_fr( syn, freq_l );
     if(AO_Write(MIO_BOARD,0,voltout))      err=1;
     if(sig_read(blankt,&sig_l))            err=2;
     if(sig_read(acqt,&sig_l))              err=2;
     integ+=sig_l;

     set_fr( syn, freq_h );
     if(AO_Write(MIO_BOARD,0,voltout))      err=1;
     if(sig_read(blankt,&sig_h))            err=2;
     if(sig_read(acqt,&sig_h))              err=2;
     integ-=sig_h;
     integ2+=(integ/50);


     if(integ<-maxinteg || integ>maxinteg)  err=4;
     if(_kbhit())                           err=5;
  }
  if (err==1) FmtOut ("Stopped by error on output card\n");
  if (err==2) FmtOut ("Stopped by error on reading\n");
  if (err==3) {
     FmtOut ("Para por baixo sinal\n");
     FmtOut ("sig_min %d[b4] sig_l %d[b4] sig_h %d[b4]\n",
            sig_min,sig_l,sig_h);
  }
  if (err==4) {
```

```
      FmtOut ("Parar pelo estouro da integração\n");
      FmtOut ("integ %d[b4] maxinteg %d[b4]\n",
            integ, maxinteg);
   }
   if (err==5) FmtOut ("Parar pelo usuario\n");
  ibloc(syn   );
/*  ibonl(syn, 0); */
}


int sig_read(int acqt,long *sig)
{
   int isig; /* Para 12 bits vai de -2048 a +2047 */
   int i, err;
   err= AI_Clear( MIO_BOARD);
   if(err!=0) {
      FmtOut (" errclear %d \n", err);
      return(err);
   }
  *sig=0;
   for(i=0;i<acqt;i++) {
      err= AI_Read( MIO_BOARD, 0,1,&isig);
      if(err!=0) {
         FmtOut (" errRead %d reading %d \n", err,isig);
         return(err);
      }
      *sig+=isig;
   }
   return(0);
}

void loop_cnf_read( freq_p, modw, blankt, acqt,gain,vo_offs,gate)
double  *freq_p , *modw, *gate;
int   *blankt,  *acqt,  *gain, *vo_offs;
{
   int yon, change;
   int err, file_cnf;

   file_cnf = OpenFile ("loop.cnf", 1,2, 1);
   if (file_cnf <= 0)
      err= FmtOut("Erro na abertura do arquivo");
   err= ScanFile(file_cnf, "%f %f %d %d %d %d %f",
         freq_p,  modw, blankt, acqt, gain, vo_offs, gate);
   err= CloseFile (file_cnf);
```

```
yon = 1;
change=0;
while(yon!=0) {
   FmtOut("\n1 Peak frequency %f\n2 Modulation width %f",
         *freq_p, *modw);
   FmtOut("\n3 blank time %d\n4 acquisition time %d",
         *blankt, *acqt);
   FmtOut("\n5 gain  %d\n6 DAC offset %d\n",
         *gain, *vo_offs);
   FmtOut("\n7 gate time  %f\n",
         *gate);
   FmtOut("\nType 0 for Keep value , n to change parmeter n ");
   ScanIn("%d",&yon);
   if(yon!=0) {
      change=1;
      if(yon==1) {
         err=FmtOut("%i Input new frequency ",yon);
         err=ScanIn("%f", freq_p);
      }
      if(yon==2) {
         err=FmtOut("%i Input new modulation width ",yon);
         err=ScanIn("%f", modw);
      }
      if(yon==3) {
         err= FmtOut("%i Input new blank time ",yon);
         err= ScanIn("%d", blankt);
      }
      if(yon==4) {
         err= FmtOut("%i Input new acquisition time ",yon);
         err= ScanIn("%d", acqt);
      }
      if(yon==5) {
         err= FmtOut("%i Input new gain ",yon);
         err= ScanIn("%d", gain);
      }
      if(yon==6) {
         err= FmtOut("%i Input new offset ",yon);
         err= ScanIn("%d", vo_offs);
      }
      if(yon==7) {
         err= FmtOut("%i Input new gate time ",yon);
         err= ScanIn("%f", gate);
      }
   }
```

```
    }
    if(change) {
        file_cnf = OpenFile ("loop.cnf", 2,0, 1);
        FmtFile(file_cnf, "%f %f %d %d %d %d %f",
          *freq_p, *modw, *blankt, *acqt, *gain, *vo_offs , *gate);
        FmtOut("%f %f %d %d %d %d %f",
          *freq_p, *modw, *blankt, *acqt, *gain, *vo_offs, *gate);
        CloseFile(file_cnf);
    }
    return;
}

void set_fr( int device, double freq )
{
  sprintf(buffer,"FREQ %f",freq);
/*   printf("%s\n",buffer); */
  manda(device, buffer);
}

void manda( int device, char *comando )
{
  ibwrt(device, comando, (long) strlen(comando));
  if (ibsta & ERR)
    report_error(device, "Could not write to device the command\n");
}
void report_error(int fd, char *errmsg) {

  fprintf(stderr, "Error %d: %s\n", iberr, errmsg);

  if (fd != -1) {
    printf("Cleanup: taking board off-line\n");
    ibonl(fd,0);
  }
  exit(1);            /* abort program */
}
```

```
/*
  Programa Ramsey
  Para a producão das Franjas de ramsey
*/
/*
#include <ansi_c.h>
*/

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "\p\at-gpib\c\decl.h"
#include        "\p\lw23\include\lwsystem.h"
/*#include        "\p\lw23\include\gpib.h"*/
#include        "\p\lw23\include\formatio.h"
#include        "\p\lw23\include\dataacq.h"

#define BUF_SIZE  5000
#define W_SIZE  4000

struct riferimento {
                double xinc; double xor; int xref;
                double yinc; double yor; int yref;
                };
enum          {STORE , TX, TXY } act;

extern disp_wav(char *bufptr, int size);
void report_error(int fd, char *errmsg);
void test_rif( int  act, struct riferimento s_rif);
void manda( int indir, char *comando );
int chiedi( int indir, char *comando ,char *buffer);
void pausa( void);
int leggi( int indir, char *comando );
int leggi_dati( int device, char *buffer, int * np,
                int *iarr , struct riferimento *s_rif );

void main() {

   int   osc,
         i, j;
   char  *buffer;

   int   *iarr;
   double *v1, *v2, tempo;
   FILE *outf;
   struct riferimento  s_rif;
   int   np, iret, nav=8;

   if( (buffer=malloc(BUF_SIZE))==NULL)
      report_error(osc,"Could not allocate memory for buffer\n");
   /* Initialize and Clear the oscilloscope */
   if ((osc = ibdev(0, 07, 0, T10s, 1, 0)) < 0)
      report_error(osc, "Could not open OSC_01 device");
   ibclr(osc);
   if (ibsta & ERR)
```

```
      report_error(osc, "Could not clear device");

   /* Set up to acquire waveform */
   manda(osc, "*RST");
   manda(osc, "AMPL 10.0DB");
   manda(osc, "MDWF 2");
   manda(osc, "MENA 1");
   manda(osc, "MTYP 0");
   manda(osc, "RATE 0.1");
   manda(osc, "SPAN 300");
   manda(osc, "FREQ 10701765.123");

   /* Take the scope off-line */
   ibonl(osc, 0);
exit(0);

   disp_wav(buffer, BUF_SIZE);

}

void report_error(int fd, char *errmsg) {

   fprintf(stderr, "Error %d: %s\n", iberr, errmsg);

   if (fd != -1) {
      printf("Cleanup: taking board off-line\n");
      ibonl(fd,0);
   }
   exit(1);              /* abort program */
}
int    disp_wav(char *bufptr, int size) {
   return(0);
   }
int  leggi( int device, char *buffer  )
{
   printf("ibcnt prima = %d ", ibcnt );
   ibrd(device, buffer, BUF_SIZE);
   if (ibsta & ERR)
      report_error(device, "Could not read from device");
   buffer[ibcnt] = '\0';
   printf(" ibcnt dopo = %d ", ibcnt );
   printf("Reading:%s\n", buffer);
   return(ibcnt);
}
int  chiedi( int device, char *comando, char *buffer  )
{
   ibwrt(device, comando, (long) strlen(comando));
   if (ibsta & ERR)
      report_error(device, "Could not write to device the command\n");
   printf("comando = %s ",comando);
   ibrd(device, buffer, BUF_SIZE);
   if (ibsta & ERR)
      report_error(device, "Could not read from device");
   buffer[ibcnt] = '\0';
```


IFSC-USP SERVIÇO DE BIBLIOTECA E INFORMAÇÃO

```
   printf("risposta:%s", buffer);
   return(ibcnt);
}
int leggi_dati( int device, char *buffer, int *np,
                int *iarr , struct riferimento  *base )
 {
   int i;
   int val ;
   char *pt, l_buf[9];
   unsigned char uff;
   double   volt, time;

   ibrd(device, buffer, BUF_SIZE);
   if (ibsta & ERR)
      report_error(device, "Could not read from device");
   buffer[ibcnt] = '\0';
   printf(" leggi dati ibcnt dopo = %d ", ibcnt );
/*
    lettura della prima parte del buffer, contenente il numero di bit
    da leggere, per avere il numero  di dati bisogna dividere per la
    lunghezza  del dato
*/
   pt = buffer;
   if( *pt++ !='#') printf("il primo char non e' #");
   if( *pt++ !='8') printf("il secondo char non e' 8");
   for(i=0;i<8; i++, pt++) l_buf[i]= *pt;
                     l_buf[i]= '\0';
   printf("\nl_buf %s \n", l_buf    );
   *np = atoi(l_buf);
   printf("num dati %d\n", *np    );

   printf( "#%d   \n", *np);
   for(i=0;i<*np; i++) {
      val   =   (unsigned char) *pt++;
      iarr[i] = (int) val;
   }
   chiedi(device,":WAV:XINC?",buffer);
   base->xinc = atof(buffer);
   chiedi(device,":WAV:XOR?",buffer);
   base->xor  = atof(buffer);
   chiedi(device,":WAV:XREF?",buffer);
   base->xref = atoi(buffer);
   chiedi(device,":WAV:YINC?",buffer);
   base->yinc = atof(buffer);
   chiedi(device,":WAV:YOR?",buffer);
   base->yor  = atof(buffer);
   chiedi(device,":WAV:YREF?",buffer);
   base->yref = atoi(buffer);

 /*
   printf("\nassaggio: %60.60s\n", pt    );
*/
   return(ibcnt);
}
```

```
void manda( int device, char *comando )
{
   ibwrt(device, comando, (long) strlen(comando));
   if (ibsta & ERR)
      report_error(device, "Could not write to device the command\n");
}
void test_rif( int  act, struct riferimento base )
{
  static struct riferimento loc;

  if( act == STORE ) {
     loc.xinc=base.xinc;
     loc.xor =base.xor ;
     loc.xref=base.xref;
     loc.yinc=base.yinc;
     loc.yor =base.yor ;
     loc.yref=base.yref;
  }
  if( act == TX ) {
     loc.yinc=base.yinc;
     loc.yor =base.yor ;
     loc.yref=base.yref;
     if(   (loc.xinc!=base.xinc)
        || (loc.xor !=base.xor)
        || (loc.xref!=base.xref)
        ) {
           printf("Time base changed during operation\n");
           exit(2);
      }
  }
  if( act == TXY ) {
     if(   (loc.xinc!=base.xinc)
        || (loc.xor !=base.xor)
        || (loc.xref!=base.xref)
        || (loc.yinc!=base.yinc)
        || (loc.yor !=base.yor)
        || (loc.yref!=base.yref)
        ) {
           printf("Setup changed during operation\n");
           exit(2);
      }
  }
}
void pausa()
{
   int  t;
/*
   scanf("%d", &t);
*/
}
```