

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Rodrigo Duarte Pechoneri

**Padrão atômico de frequência compacto transportável:
um caso de instrumentação**

São Carlos

2017

Rodrigo Duarte Pechoneri

**Padrão atômico de frequência compacto transportável:
um caso de instrumentação**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Dinâmica das Máquinas e Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Daniel Varela Magalhães

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA VERSÃO CORRIGIDA.

São Carlos

2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

D686p Duarte Pechoneri, Rodrigo
Padrão atômico de frequência compacto
transportável: um caso de instrumentação / Rodrigo
Duarte Pechoneri; orientador Daniel Varela Magalhães.
São Carlos, 2017.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Dinâmica
das Máquinas e Sistemas -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

1. Padrão de frequência. 2. Relógio atômico . 3.
Instrumentação. 4. Eletrônica embarcada. 5. CAN. 6.
Microcontrolador. 7. Computação Física. 8. Arquitetura.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RODRIGO DUARTE PECHONERI**.

Título da tese: "Padrão atômico de frequência compacto transportável: um caso de instrumentação".

Data da defesa: 01/11/2017.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Daniel Varela Magalhães**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Rafael Vidal Aróca**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Dr. **Gustavo Deczka Telles**
(Instituto de Física de São Carlos/IFSC-USP)

APROVADO

Prof. Associado **Ben Hur Viana Borges**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **André Carmona Hernandes**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Gherhardt Ribatski**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Este trabalho é dedicado aos meus pais, ao meu querido irmão, aos meus mestres e professores, a quem contribuiu direta ou indiretamente e a todos aqueles que amei em vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador professor Daniel.

Aos meus companheiros de laboratório.

A todo o grupo de óptica.

A todo departamento de engenharia mecânica da EESC.

A minha família.

A todos que contribuíram de alguma maneira, meu mais sincero muito obrigado.

Rodrigo Che.

‘Para nós, físicos presunçosos, passado, presente e futuro são apenas ilusões, o tempo não é absoluto.’

Albert Einstein

RESUMO

PECHONERI, R. D **Padrão atômico de frequência compacto transportável: um caso de instrumentação.** 2017. 170p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

O aumento do desempenho de exatidão e precisão sempre foram uma demanda em metrologia de tempo e frequência. Aplicações como sistemas de telecomunicações, posicionamento global, calibração industrial e metrologia científica, requerem um instrumento de alta performance e dimensões reduzidas. Devido a isso, o padrão de frequência compacto transportável, alvo deste projeto, é um sistema com aplicação de átomos frios que busca compactação e robustez e funciona com um princípio temporal, em que as diferentes etapas da operação acontecem em um só lugar: no interior da cavidade de micro-ondas. Este tipo de operação permite-nos implementar um padrão muito mais compacto, em que diferentes interações ocorrerem na mesma região do aparato. Neste sentido, é necessário redefinir toda a instrumentação associada com o experimento. Este trabalho apresenta uma visão geral da topologia que estamos adotando para o novo sistema. Também mostra detalhes de sua implementação no contexto de sistemas de instrumentação dedicados. Além disso, é realizado um estudo dos principais padrões de frequência compactos sob desenvolvimento ou já em escala industrial.

Palavras-chave: Padrão de frequência. Relógio atômico. Instrumentação. Eletrônica.

ABSTRACT

PECHONERI, R. D **Compact atomic frequency standard transportable: one case of instrumentation.** 2017. 170p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Accuracy and stability performance increases has always been a demand in time and frequency metrology, applications such as telecommunication systems and global positioning, industrial calibration and scientific metrology, require a high performance instrument and small dimensions. Due to this, the transportable compact frequency standard, the purpose of this work, is a system that use cold atoms seeking compactness and robustness and works with a temporal principle, in that, the different stages of the operation happen in one place: inside the microwave cavity. This kind of operation allows us to implement a more compact pattern in which different interactions occur in the same region of the apparatus. In this sense, it is necessary to redefine all the instrumentation associated with the experiment. This work presents an overview of the topology we are adopting for the new system. It also shows details of its implementation in the context of dedicated instrumentation systems. In addition, a study of the main compact frequency standards under development or already on an industrial scale is carried out.

Keywords: Frequency standard. Atomic Clock. Instrumentation. Electronics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Características do novo dispositivo: Câmara de vácuo, lasers e componentes ópticos na região de cima; sintetizador de microondas, controles, fontes e drivers acoplados na parte inferior	28
Figura 2 – Diagrama de níveis de energia hiperfinos para átomo de Césio 133	30
Figura 3 – Diagrama das funções essenciais de um padrão de frequência	32
Figura 4 – Esquema simplificado da malha de controle	33
Figura 5 – Exemplo de forma de onda digital usada para injetar os pulsos de microondas durante a fase de interrogação	34
Figura 6 – Exemplo de forma de onda analógica utilizada para controlar a frequência de lasers	35
Figura 7 – Exatidão e precisão no domínio do tempo e frequência	37
Figura 8 – Gráfico de estabilidade de frequência	39
Figura 9 – Gráfico usual de estabilidade para identificar tipo de ruído	40
Figura 10 – Esquema geral de um relógio atômico de feixe térmico	44
Figura 11 – Padrão de frequência atômico de feixe térmico comercial 5071A	45
Figura 12 – Esquema geral de um maser de hidrogênio	47
Figura 13 – Esquema geral de travamento de frequência de um maser	48
Figura 14 – Curva de estabilidade para o maser PHM QM1	49
Figura 15 – Versão comercial do maser PHM construído e comercializado	50
Figura 16 – Montagem da cavidade do HORACE	51
Figura 17 – Franja assinatura obtida com o HORACE	52
Figura 18 – Estabilidade HORACE	53
Figura 19 – Relógio MuClock	54
Figura 20 – Padrão de frequência de Rb FE5680A	54
Figura 21 – Modelo de três níveis usado para analisar o fenômeno CPT	55
Figura 22 – Esquema da montagem do sistema CPT	56
Figura 23 – Ressonância Raman apresentada pelo CPT com espectroscopia Ramsey	57
Figura 24 – Estabilidade de frequência obtida com CPT	58
Figura 25 – Estabilidade obtida com CPT e POP associados	59
Figura 26 – Franja obtida com CPT e POP associados	60
Figura 27 – Montagem física do CSAC: vista em corte e estrutura	60
Figura 28 – CSAC: placa de circuito impresso e sistema selado	61
Figura 29 – Curva de estabilidade CSAC	61
Figura 30 – Ilustração esquemática do relógio de feixe efusivo com bombeamento óptico desenvolvido no CEPOF	63
Figura 31 – Relógio atômico de feixe montado nas dependências da USP São Carlos	64

Figura 32 – Franja de Ramsey obtida com o relógio de feixe	65
Figura 33 – Curva de estabilidade do relógio de feixe	66
Figura 34 – Torre do sistema de vácuo onde os átomos são lançados no chafariz	68
Figura 35 – Chafariz de átomos frios: sistema óptico de rádio frequência e controle	69
Figura 36 – Franja de Ramsey normalizada obtida no chafariz	71
Figura 37 – Curva de estabilidade	72
Figura 38 – Esquema de funcionamento de um padrão de frequência baseado em uma nuvem de átomos frios em expansão em célula de vidro	76
Figura 39 – Ressonância atômica da transição relógio obtida no padrão de átomos frios em expansão utilizando célula de vidro com método Rabi de interrogação	76
Figura 40 – Franja obtida com o uso de método de Ramsey mostrando a simulação e a ressonância atômica experimental da transição relógio	77
Figura 41 – Desvio padrão de Allan para definição da precisão do padrão de átomos frios em expansão livre quando travado em um relógio comercial HP5071A	78
Figura 42 – Câmara de vácuo vista em corte e montagem real	79
Figura 43 – Ressonância observada para transição relógio utilizando pulsos Ramsey de 1 ms separados por 8 ms.	80
Figura 44 – Pontos da varredura experimental ajustados sobre a franja simulada no pico da ressonância com 47 Hz de largura à meia altura	80
Figura 45 – Desvio padrão de Allan do sistema compacto quando a franja central está travada ao sinal do MASER	81
Figura 46 – Sequência do ciclo atômico utilizado no relógio atômico compacto	82
Figura 47 – Fases do ciclo de operação do relógio compacto e seus principais sinais	84
Figura 48 – Diagrama de níveis de energia do Césio mostrando os níveis hiperfinos e as transições de resfriamento e detecção, rebombeio e a transição relógio utilizadas no processo de interrogação	85
Figura 49 – Perfil Doppler de uma absorção saturada do átomo de Césio	86
Figura 50 – Sinal de fluorescência típico, em que a integral da área é proporcional ao número de átomos	87
Figura 51 – Visualização geral da mesa óptica e seus principais componentes	89
Figura 52 – Diagrama esquemático da mesa óptica	90
Figura 53 – Esquema de um modulador acusto-óptico	92
Figura 54 – Esquema com as frequências de sintonia do feixe de resfriamento e aprisionamento obtidas com os moduladores de 125MHz inseridos na montagem óptica	93
Figura 55 – Visualização geral das bobinas de aprisionamento e compensação	94
Figura 56 – Câmara de vácuo em inox em octógono	95
Figura 57 – Placa de aquisição PCI 6259 National Instruments	96

Figura 58 – Esquema de <i>hardware</i> utilizado no relógio atômico compacto	97
Figura 59 – Painel Frontal programa de controle	99
Figura 60 – Placa de comunicação PCI-GPIB	101
Figura 61 – Esquema da cadeia de síntese de micro-ondas para a interrogação dos átomos	103
Figura 62 – Configuração geral do sistema de instrumentação distribuído adotado para o padrão de frequência transportável	106
Figura 63 – Abordagem de distribuição de sinal de referência de <i>clock</i> baseado em um oscilador componente da síntese de microondas	108
Figura 64 – Sistema de distribuição de <i>clock</i> montado	110
Figura 65 – Avaliação de sinais do oscilador	110
Figura 66 – Medida de ruído de fase do sinal distribuído	111
Figura 67 – Quadro comparativo dos recursos de <i>hardware</i> presentes nas placas de computação embarcada disponíveis no laboratório	113
Figura 68 – BeagleBone Black	114
Figura 69 – Troca de mensagens entre os canais CAN (CAN 0 e CAN 1) da BeagleBone Black.	116
Figura 70 – BeagleBone Black montada em caixa padrão para <i>rack</i> com módulo CAN desenvolvido	117
Figura 71 – Configuração de mensagem especificação CAN 2.0 A	119
Figura 72 – Exemplo de barramento CAN	120
Figura 73 – Transmissão diferencial de mensagens no barramento CAN	121
Figura 74 – Experimento de validação para rede CAN nos microcontroladores LPC1768	122
Figura 75 – Programas de teste de envio e recebimento de mensagem CAN na BeagleBone Black	123
Figura 76 – Arquivo de texto de configuração do módulo de saídas digitais	124
Figura 77 – Funcionamento dos programas python de comunicação CAN	125
Figura 78 – Comunicação realizada entre BeagleBone Black e Mbed via rede CAN para configuração de saídas digitais	126
Figura 79 – Kit de <i>hardware</i> para desenvolvimento Mbed	128
Figura 80 – Esquema geral de <i>hardware</i> e <i>firmware</i> do módulo de saídas digitais	131
Figura 81 – Placa de circuito do módulo de saídas digitais vista frontal e lateral	132
Figura 82 – Kit Mbed alternativo desenvolvido no laboratório	133
Figura 83 – Diagrama de sistema de medida utilizado no experimento	134
Figura 84 – Equipamentos de avaliação de sinais de tempo e frequência	134
Figura 85 – Desvio padrão de Allan para atendimento de interrupção do LPC1768	135
Figura 86 – Características de entrada e saída de conversores de sinal digital para analógico	136
Figura 87 – Parâmetros de forma de onda utilizados pelo sistema para gerar os desvios	138

Figura 88 – Forma de onda analógica gerada pelo dispositivo	139
Figura 89 – Forma de onda analógica	139
Figura 90 – Caixa padrão rack do sistema de geração de formas de onda analógicas	140
Figura 91 – Forma de onda analógica para aquisição	142
Figura 92 – Forma de onda analógica adquirida com o sistema	142
Figura 93 – Esquema do sistema optomecânico dos lasers de diodo geração 1 e 2 . .	143
Figura 94 – Gerações dos lasers utilizados nos relógios atômicos	144
Figura 95 – Esquema geral do controle eletrônico para laser de diodo	145
Figura 96 – Espectros dos sinais de ruído dos lasers de diodo, utilizado para fazer a comparação entre os sistemas	149
Figura 97 – Layout compacto da placa de driver de controle do laser	150
Figura 98 – Diagrama básico do AD9912	152
Figura 99 – DDS com o AD9912 customizado e interface com Mbed	154
Figura 100 – Sinal de 1 MHz senoidal	155
Figura 101 – Medida realizada com analisador de espectro tanto da fonte de 100 MHz quanto da saída de 12 MHz	156
Figura 102 – Estrutura metálica com o rack de instrumentos e rodas	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Endereço eletrônico de fabricantes e distribuidores de relógios atômicos	46
Tabela 2 – Recursos de <i>hardware</i> da placa de aquisição PCI 6259	97
Tabela 3 – Principais recursos de <i>hardware</i> disponíveis na BeagleBone Black	115
Tabela 4 – Relação de comprimento do barramento e taxa de transmissão	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOM	Acousto Optic Modulator
ARM	Advanced RISC Machine
API	Application Programming Interface
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
CPT	Coherent Population Trapping
CSAC	Chip Scale Atomic Clock
CAN	Controller Area Network
DSP	Digital Signal Processing
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DDS	Direct Digital Synthesis
DAC	Digital to Analog Converter
GPIB	General Purpose Interface Bus
HORACE	Horloge à Refroidissement d'Atomes en Cellule
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
MASER	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
MACAFS	Miniature Cold-Atom Frequency Standard
MOT	magneto-optical trap
MOPA	Master Optical Power Amplificator
NIST	National Institute of Standards and Technology
OCCO	Oven Controlled Crystal Oscillator
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
POP	pulsed optically pumped
PCB	Printed Circuit Board
PCI	Peripheral Component Interconnect

RSE	Reference Single Ended
SENA	Sistema Embarcado de Navegação Autônoma
SYRTE	Systèmes de Référence Temps-Espace
SPI	Serial Peripheral Interface
SMD	Surface Mount Device
SMA	SubMiniature version A
TAI	Tempo Atômico Internacional
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting laser
VCO	voltage controlled oscillators

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Contextualização	25
1.2	Objetivo	29
1.3	Princípio de funcionamento e operação de padrões de frequência de microondas	29
1.4	Principais sinais de entrada e saída envolvidos na arquitetura de um padrão de frequência	33
1.5	Características de desempenho de padrões de frequência atômicos	35
1.6	Exatidão	36
1.7	Precisão ou estabilidade	37
2	PADRÕES DE FREQUÊNCIA COMPACTOS	41
2.1	Padrões de frequência compactos de átomos frios	41
2.2	Relógios de feixe	42
2.3	MASER	46
2.4	Padrões de frequência compactos em desenvolvimento	50
2.5	Trabalhos e pesquisas desenvolvidos pelo CEPOF	62
3	PADRÃO DE FREQUÊNCIA COMPACTO DE ÁTOMOS FRIOS	75
3.1	Visão geral sobre o padrão de frequência compacto	75
3.2	Princípio de funcionamento e operação cíclica	81
3.3	Configuração opto-mecânica	88
3.4	Sistema de instrumentação	96
3.5	Síntese de micro-ondas	101
4	PADRÃO DE FREQUÊNCIA TRANSPORTÁVEL: INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA	105
4.1	Arquitetura de instrumentação e controle para o padrão de frequência transportável	105
4.2	Sistema de referência de sinal de sincronismo e atualização em laço fechado	108
4.3	Plataforma computacional de gerenciamento e comunicação central	111
4.4	Rede local de comunicação e interface	117
4.5	Sistema de processamento e controle local	126
4.6	Sistema gerador de padrões de saída digital	128

4.7	Sistema de geração de formas de onda analógica para desvios de frequência	135
4.8	Sistema de aquisição de dados	140
4.9	Sistema de laser e <i>driver</i> de controle compacto	142
4.10	Sistema de geração de sinal senoidal (sintetizador) baseado em chip DDS AD9912	150
4.11	Estrutura mecânica para acomodação e transporte do sistema	157
5	CONCLUSÃO	159
	REFERÊNCIAS	161

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Padrões de frequência ou relógios atômicos, como são popularmente conhecidos, desempenham um papel de fundamental importância na manutenção das escalas de tempo, telecomunicações e sistemas de navegação. Produzem uma frequência conhecida, estável e com boa precisão, servindo de referência para diversas áreas da ciência e tecnologia. Por ser uma grandeza aferida em propriedades atômicas é altamente reproduzível (LEWIS, 1991).

Um padrão de frequência atômico é um dispositivo que produz um pulso de sinal elétrico na saída, a uma taxa de ocorrência relacionada à oscilação eletromagnética de um dado átomo. Dado ao fato da frequência de saída ser relacionada com as oscilações atômicas pode-se atingir medidas extremamente precisas.

O segundo, para o sistema internacional de unidades (SI), adotada em 1967 na décima terceira conferência geral de pesos e medidas, é definido como a duração de 9192631770 períodos de radiação correspondentes entre a transição de dois níveis hiperfinos do átomo de Césio 133 (LEVINE, 1999).

Por isso, os padrões de frequência que utilizam átomos de Césio como referência são chamados de padrões primários de frequência, os que fazem uso outros átomos são chamados padrões secundários. Existe também uma diferenciação entre padrões que são ativos e passivos, os passivos usam o sinal da ressonância atômica para escravizar um oscilador macroscópico enquanto os ativos utilizam a própria resposta da amostra atômica para gerar um sinal de saída (RIEHLE, 2004).

Com as técnicas de resfriamento de átomos uma significativa melhoria na estabilidade do sinal de saída dos relógios foi obtida. Isso devido à redução dos efeitos que provocam desvios na frequência de interrogação da amostra atômica, resultando em uma expressiva melhora no desempenho da medida na frequência nominal obtida com o instrumento (LETT et al., 1988).

Contudo, o tamanho dos relógios atômicos que operam no regime das microondas e que apresentam melhor desempenho, os chafarizes, é incompatível com algumas aplicações, nas áreas espacial e industrial, por exemplo. Para aplicações com restrições existe a necessidade de balancear desempenho e tamanho do instrumento (STÄHLER et al., 2011). É válido considerar que aplicações industriais não necessitem, muitas vezes, de todo desempenho de precisão e exatidão obtidas por relógios atômicos como, por exemplo, os obtidos nos chafarizes.

A aplicação civil e industrial tem uma demanda por sistemas de desempenho comparável a um MASER (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) de hidrogênio ou um relógio atômico de feixe efusivo, mas que possua também mobilidade, compactação e robustez permitindo que o padrão de frequência seja levado até sua aplicação (SCHILLER et al., 2012).

Nas últimas décadas, laboratórios de todo mundo vem demonstrando que o uso de átomos frios pode conferir um grande aumento de desempenho de muitos instrumentos de medidas de alta confiabilidade como relógios, gravímetros, giroscópios, entre outros (TARELHO et al., 2015).

Porém, a complexidade de seus subsistemas ainda faz com que seu uso industrial, civil e espacial seja limitado, principalmente devido ao seu banco óptico. Logo, técnicas e sistemas que tornem o desenvolvimento de relógios utilizando átomos frios mais simplificados e robustos são de profundo interesse do setor industrial, podendo assim, usufruir o uso de instrumentos com medidas baseadas em transições atômicas.

Nesse sentido, institutos de pesquisa vêm desenvolvendo padrões visando compactação. Pode-se citar: o padrão compacto HORACE (Horloge à Refroidissement d'Atomes en Cellule) desenvolvido pelo observatório de Paris LNE-SYRTE, os relógios em escala de chip desenvolvidos pelo NIST (National Institute of Standards and Technology), os esforços do PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) para tornar os relógios ópticos compactos e robustos para fins de aplicações em viagens espaciais e os projetos desenvolvidos pela agência de defesa norte americana DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) que visam a miniaturização de relógios atômicos para aplicações portáteis em ambientes hostis, seja em conflitos ou exploração espacial.

Nos últimos cinco anos, principalmente a agência DARPA e o programa espacial europeu, vem concentrando esforços em seus trabalhos desenvolvidos com o MCAFS (Miniature Cold-Atom Frequency Standard) e o HORACE, respectivamente.

O interesse nesse tipo de instrumento aumenta com a necessidade de experimentos na exploração espacial e defesa, pois a incerteza de precisão em curtos períodos (em torno de 10000 s) apresentada por estes dispositivos esta na ordem da décima casa decimal após a vírgula da unidade (JESPERSEN; FITZ-RANDOLPH, 1999).

A equipe do laboratório de sistemas de referência da Escola de Engenharia de São Carlos, junto ao grupo de óptica, concentra esforços intensivos para estabelecer vários experimentos com padrões de frequência e consolidar parcerias para o desenvolvimento de sistemas nacionais de referência em tempo e frequência. Atualmente, o INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) firmou uma parceria com este grupo de pesquisa que, em conjunto, estão desenvolvendo trabalhos de metrologia de tempo e frequência com o padrões de frequência experimentais.

Com o objetivo de atender esta demanda, tanto nacional quanto internacional, iniciou-se, no contexto de sistemas embarcados ou embutidos, o desenvolvimento de um padrão de frequência atômico compacto e transportável utilizando átomos frios.

Além de manter todas as características de exatidão e precisão dos relógios experimentais, fatores como operacionalidade e robustez são de grande importância para a implantação desta nova tecnologia, expandindo a aplicabilidade do sistema (MULLER, 2010).

Pode-se citar como exemplos de aplicação: o projeto de carro autônomo SENA (Sistema Embarcado de Navegação Autônoma), desenvolvido no departamento de engenharia mecânica da USP de São Carlos, no qual um padrão de frequência contribuirá significativamente para a calibração dos sensores de posicionamento e navegação, que utilizarão o sinal de frequência do padrão atômico como referência de sincronismo para comunicações e referência para sistemas de GPS do veículo.

Aplicações com fins de metrologia industrial, em que o relógio poderá ser deslocado até uma determinada empresa ou centro de pesquisa, para ser usado na calibração de instrumentos e comparação de sinais com outros padrões, ou seja, qualquer aplicação em que um sinal de referência confiável seja necessário. Espera-se que a implementação do sistema transportável permita a substituição do uso do MASER de hidrogênio na configuração inicial da frequência dos chafarizes atômicos do laboratório. Devido ao fato do desempenho apresentado pelo padrão compacto ser comparável ao MASER (HUMPHREY, 2003).

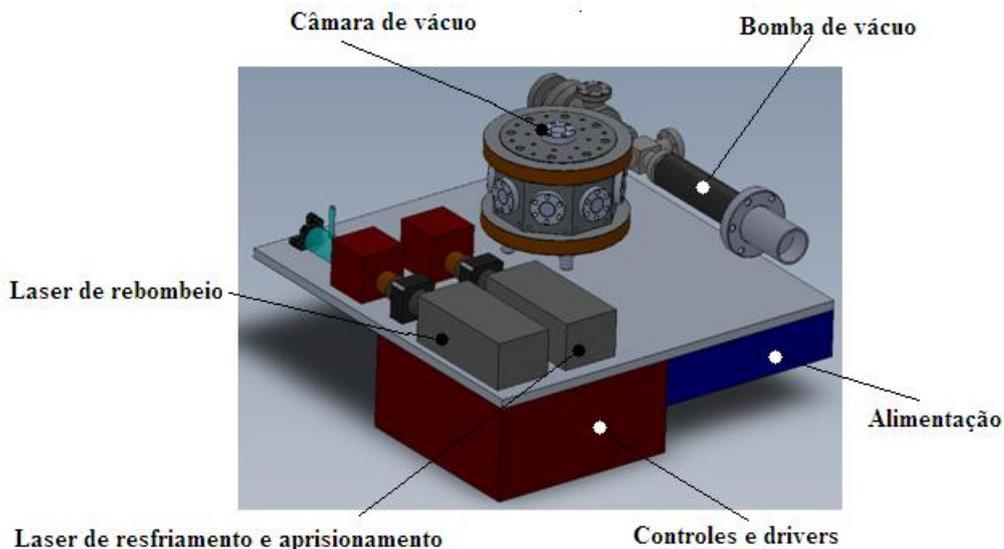
O fato do relógio ser baseado em uma nuvem de átomos frios em expansão permite uma significativa redução nas dimensões gerais do relógio. Pretende-se, ao final do projeto geral, obter em único bloco, em que todos os subsistemas necessários para seu funcionamento ficarão alocados e estabelecer um experimento que possa ser movido para aplicações externas ao laboratório. No padrão transportável de átomos frios, todos os elementos que serão integrados são desenvolvidos separadamente utilizando uma abordagem de engenharia de sistemas distribuídos.

Numa primeira proposta de arranjo experimental a mesa óptica e sistema de vácuo ficarão na parte superior do aparato, como mostra a [Figura 1](#). O controle, sintetizador de microondas, fontes e drivers ficarão acopladas na parte de baixo.

A câmara de vácuo é um dispositivo mecânico em que os átomos de césio ficam alocados em estado gasoso em baixíssima pressão (vácuo) é nesse local do experimento que a espectroscopia ocorre, a bomba de vácuo é um dispositivo comercial que proporciona a baixa pressão à câmara, o laser de rebombeio é um sistema laser que excita uma transição atômica que permite os átomos encontrarem-se em um estado definido, o laser de aprisionamento e resfriamento é responsável pela desaceleração dos átomos efetundo

uma armadilha óptica, drivers de controle são os circuitos eletrônicos responsáveis pelo controle da luz laser e do experimento, o sistema de alimentação é composto por banco de baterias e fontes e circuitos de proteção.

Figura 1: Características do novo dispositivo: Câmara de vácuo, lasers e componentes ópticos na região de cima; sintetizador de microondas, controles, fontes e drivers acoplados na parte inferior



Fonte: próprio autor

Com pesquisa e desenvolvimento contínuo existe grande possibilidade de, no futuro, obter-se um produto brasileiro de ampla aplicabilidade, contribuindo com a indústria nacional e atraindo empresas nacionais e estrangeiras. Além de formar mão de obra especializada e *know how* na área de metrologia de tempo e frequência que contribui para planos de exploração marítima e aero espaciais brasileiros e são de fundamental importância.

Além disso, contribuí cientificamente com o estado da arte no desenvolvimento de padrões de frequência de átomos frios, que atualmente são estudados nos laboratórios de ponta de todo o globo, para que se possa atingir sempre o melhor desempenho com a maior compactação.

O desenvolvimento deste trabalho também contribui para o avanço pessoal e científico do candidato, devido a oportunidade de avanço profissional e acadêmico envolvido em sua produção, é uma chance ímpar proporcionada para estudantes no contexto do ensino superior brasileiro, contemplando também a mão de obra especializada em medições e metrologia de tempo e frequência.

Este tipo de conhecimento e pesquisa são cruciais para que o Brasil atinja forte influência mundial, também é necessário para reforçar o avanço de áreas estratégicas do

país, tais como: defesa, indústria, padronização de sistemas de medidas e telecomunicações (CALMANOVICI, 2011).

1.2 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo principal estabelecer, em contraste a arquiteturas disponíveis, uma arquitetura para o sistema de instrumentação para o relógio atômico compacto transportável. Além disso, estudar, definir e estabelecer protótipos para os sistemas ou dispositivos necessários ao seu desenvolvimento. Servindo como base principal para o futuro desenvolvimento de um padrão de frequência como produto de inovação tecnológica nacional.

Os objetivos secundários são: Analisar dispositivos que possam atender as necessidades e especificidades da implantação dos controles do padrão atômico, projetar e construir as placas dos sistemas eletrônicos, programar os dispositivos para integração do sistema e seu ciclo de funcionamento (sequência temporal analógica e digital, detecção, e etc).

1.3 Princípio de funcionamento e operação de padrões de frequência de microondas

Relógios atômicos ou padrões de frequência fazem uso de um sistema quântico como se fosse seu “pendulo”, seu discriminador de frequência, em que a frequência do sinal de saída está intimamente relacionada à diferença de energia entre dois estados quânticos dos átomos, no caso de padrões primários, átomos de Césio 133.

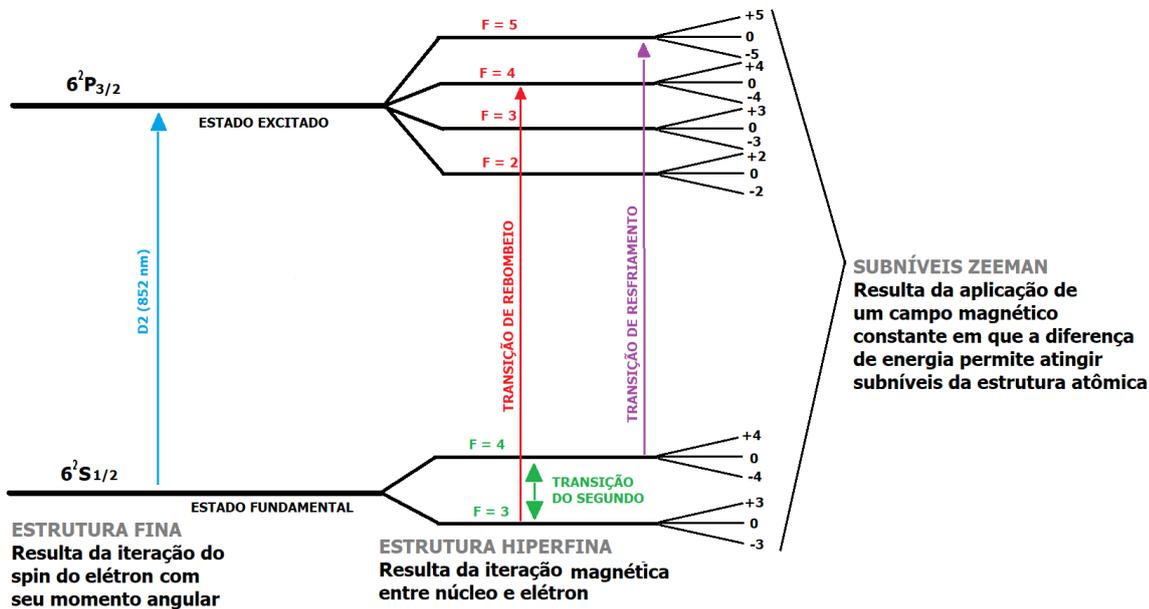
Qualquer padrão de frequência baseado em átomos frios tem no mínimo quatro etapas para efetuar seu ciclo de operação: aprisionamento, resfriamento, interrogação e detecção, que serão descritos com maiores detalhes nos próximos capítulos. A necessidade de sincronismo entre cada uma das etapas é de vital importância para o êxito do experimento.

A frequência da transição relógio que define o segundo encontra-se no regime de microondas. Compreende-se microondas como o intervalo de frequência que abrange aproximadamente dos 0,3 GHz até 300 GHz, podendo ser manipulada utilizando técnicas e circuitos de uso comum em sistemas de microondas e rádio frequência, ou seja, aplicando sinal de microondas que esteja ressonante com a frequência de transição entre estados quânticos hiperfinos dos átomos de Césio produzimos um sinal de resposta que caracteriza o padrão de frequência.

Os níveis quânticos considerados para a transição relógio no átomo Césio são apresentados pela [Figura 2](#). Os níveis de transição que caracterizam a frequência que define o segundo como unidade primária são $F = 3$ para $F = 4$ (VANIER; AUDOIN, 1989). A frequência necessária para excitar a transição entre os níveis atômicos de interesse é de 9192631770 Hz ou 9 GHz. As outras transições mostradas referem-se à linha D2 do Césio

e são bastante úteis nos processos de resfriamento e manipulação dos átomos.

Figura 2: Diagrama de níveis de energia hiperfinos para átomo de Césio 133



Fonte: próprio autor

A interrogação dos átomos é um processo de medida do estado eletrônico em que a amostra de Césio transitou após a aplicação de radiação de microondas, caso os átomos tenham experimentado a transição relógio, ou seja, absorvido uma quantidade exata de energia da radiação eletromagnética, a eficiência do sinal de interrogação aplicado é aferida sendo possível travá-lo no pico de máxima ressonância com a transição. Existem dois métodos bem difundidos na literatura e aplicados na prática para interrogação dos átomos e são eles: o método de Rabi e o método de Ramsey (LOMBARDI; HEAVNER; JEFFERTS, 2007).

Cada etapa do ciclo é executada sincronizadamente e em tempo real, devido à necessidade de correção do sinal de microondas antes que um novo ciclo de operação se inicie. Com esse propósito o sistema de controle realiza o desvio de frequência dos lasers, aplicação do sinal de microondas, acionamento do campo eletromagnético, captura do sinal de transição e processamento do sinal obtido.

Métodos de interrogação de átomos foram aperfeiçoados, mas com o advento do laser, tornou-se possível manipular as populações dos níveis atômicos. Com isso os padrões de frequência operados por luz foram desenvolvidos, utilizando luz para a seleção e manipulação dos átomos e como detecção, porém continua-se excitando a transição com sinal de microondas.

A importância de se resfriar os átomos em relógios atômicos está diretamente ligada à sua exatidão, pois o átomo em movimento “enxerga” a radiação com frequência

deslocada (efeito Doppler de primeira ordem), provocando um deslocamento na medida da frequência de saída.

Como num gás há uma distribuição de velocidades, cada parcela de átomos enxerga uma frequência diferente, distribuindo a resposta da ressonância atômica para cada classe de velocidades. O resfriamento dos átomos faz com que a distribuição de velocidades seja muito pequena. Além disso, com velocidades absolutas muito baixas (cm/s) reduz-se muito o efeito Doppler de segunda ordem, minimizando efeitos de deslocamento de frequência ligados ao movimento dos átomos.

Um padrão de frequência de átomos frios utiliza técnicas de resfriamento atômico para que a amostra esteja “bem comportada” durante as outras fases do ciclo de funcionamento, o que permite atingir maior exatidão na medida da frequência do que em relógios que não utilizam átomos frios.

A idéia principal desse resfriamento óptico, realizado com lasers, é redistribuir o momento quântico dos átomos de modo que eles obedeçam a um ciclo de absorção e emissão espontânea. Dessa forma, existindo certa probabilidade da amostra atômica que estava em uma classe de velocidades diferente de zero serem bombeados opticamente para um estado armadilhado, os átomos são aprisionados em um ponto do espaço por meio de uma armadilha magnetoóptica, dentro de uma distribuição em que a classe de velocidades seja igual ou muito próxima a zero (COHEN-TANNOUDJI; PHILLIPS, 1990).

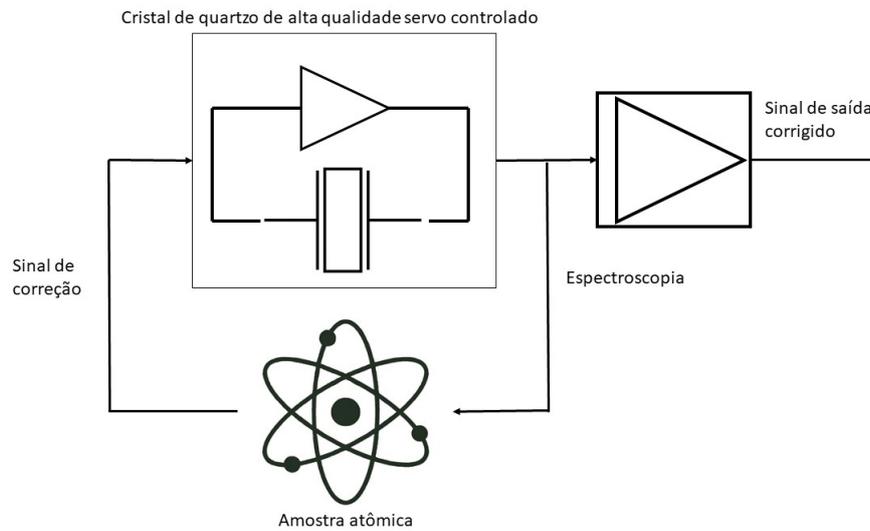
Basicamente, um padrão de frequência de Césio obedece a um ciclo de funcionamento, inicialmente a amostra atômica é preparada em um dos estados quânticos da transição $F = 3$ ou $F = 4$, um oscilador macroscópico (oscilador de quartzo de alta qualidade servo acionado) é sintonizado em torno da frequência da transição relógio.

O oscilador é a fonte do sinal de interrogação, logo após, os átomos interagem com um campo eletromagnético, sinal de microondas, que induz a transição dos átomos para o outro nível de energia menos populado, os átomos que fizeram a transição entre os níveis são detectados. Dessa forma, pode-se determinar se a frequência de interrogação está no máximo da ressonância.

A [Figura 3](#) apresenta o esquema de funcionamento de um padrão atômico de frequência de forma genérica e traz os elementos essenciais para seu controle e operação. A frequência do sinal de microondas injetado para excitar a transição é corrigida antes que se inicie um novo ciclo, então a saída do sistema é ajustada e devidamente tratada de forma a produzir um sinal de um pulso por segundo (PPS) a cada 9 192 631 770 períodos do sinal injetado. As variações na eficiência da transição atômica fornecem a correção necessária ao sintetizador de microondas.

Dessa maneira, determina-se o quanto o sinal de interrogação gerado pela cadeia de microondas afastou-se do valor da ressonância da transição atômica. O sinal de erro de

Figura 3: Diagrama das funções essenciais de um padrão de frequência



Fonte: próprio autor

frequência é injetado no oscilador local de modo a corrigi-lo. Isto feito, o sinal injetado pelo oscilador local nos átomos será cada vez mais ressonante com a frequência entre os níveis da transição relógio.

O *hardware* utilizado nos sistemas de controle de um relógio é baseado em interfaces de comunicação, entradas e saídas analógicas e digitais, usadas para gerar sequências de saída, formas de onda, e adquirir sinais do padrão atômico. Atualmente, ambos os sistemas experimentais (chafariz e compacto) presentes no laboratório fazem uso de placas de aquisição do tipo DAQ (Data Acquisition) da National Instruments que possuem interface direta de programação com o ambiente Labview. O que facilita sobremaneira a tarefa de manipulação dos dados e interface homem-máquina. Porém, é inviável em um sistema transportável devido a necessidade de um computador de bancada.

Quando operado travado no pico da frequência de ressonância o sistema de controle corrige o sinal do sintetizador de microondas em tempo real usando um algoritmo de controle do tipo PI (Proporcional Integrativo), descrito em (BIZE, 2001), que calcula os desvios da frequência do oscilador local (oscilador macroscópico) do pico da ressonância, e gera o sinal de erro que faz a correção do sintetizador. Assim, garantindo um padrão primário a 9192631770 Hz.

Para encontrar o pico da ressonância o programa de controle implementa uma varredura em torno da frequência 9, 1926GHz com uma determinada faixa de largura spectral e a um passo fixo e alta resolução estreito o suficiente para resolver a frequência central das franjas de interferência do método de Ramsey.

A Figura 4 traz um esquema simplificado da malha de controle dos padrões de

frequência em que no computador, é ajustado o tempo e valor da saída da sequência temporal, que por sua vez atua no sistema ajustando o processo de interrogação dos átomos.

Figura 4: Esquema simplificado da malha de controle



Fonte: próprio autor

1.4 Principais sinais de entrada e saída envolvidos na arquitetura de um padrão de frequência

Conforme já descrito um padrão de frequência de átomos frios funciona obedecendo a etapas de um ciclo que prepara, interroga e detecta a transição que define o segundo. Que no caso envolve aprisionamento, resfriamento, interrogação e detecção. Que utiliza como método de interrogação atômica a espectroscopia magnética nuclear de Ramsey dos campos separados. Além disso, todas essas etapas são realizadas de forma síncrona, pois cada uma delas tem certo intervalo de tempo para ocorrer dentro da câmara contendo césio, que é o núcleo de um relógio atômico (RAMSEY, 1950).

Um sinal fixo de clock é utilizado para referenciar a atualização das entradas e saídas do sistema e partindo dessa base de tempo os sinais envolvidos no ciclo de trabalho do relógio são gerados e adquiridos, e então tratados por software. O processo completo envolve geração de sinais digitais TTL (Transistor Transistor Logic), sinais analógicos de tensão, comunicação digital e aquisição de dados. A correta atuação desses sinais na manutenção dos processos do ciclo atômico é a principal tarefa do sistema de instrumentação, e está diretamente envolvida em uma operação satisfatória.

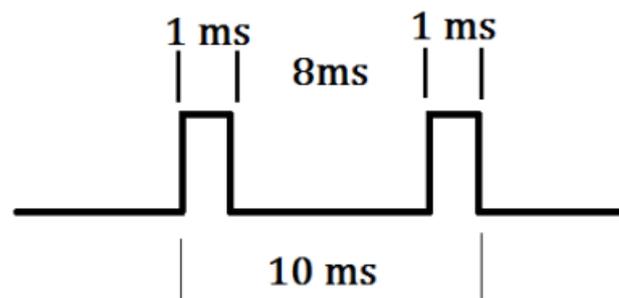
Durante as fases de aprisionamento e resfriamento a frequência dos feixes de laser é controlada, assim como sua potência (SALOMON et al., 1990). O controle dessas fases é realizado com sinais analógicos de tensão para realizar os desvios de frequência, por meio de moduladores acusto-ópticos (AOM- acousto-optic modulator), ao final dessa etapa os feixes são totalmente atenuados dentro da câmara com a atenuação dos moduladores e auxílio de obturadores mecânicos que são controlados com sinal digital. Na fase de aprisionamento, em que os átomos são aprisionados existe também um campo magnético utilizado na armadilha magneto-óptica gerado por duas bobinas que são acionadas por um sinal digital (PHILLIPS, 1998b).

Após a preparação da amostra, a nuvem formada pelos átomos frios é exposta a um campo eletromagnético proveniente da síntese de microondas que realiza a interrogação da transição relógio, após, o sinal de fluorescência de resposta dos átomos é detectado por entradas analógicas sincronizadamente evitando diferenças temporais entre o disparo da aquisição do sinal e o sinal adquirido, o que permite a avaliação em tempo real do sistema como um todo.

Os principais sinais que o sistema de instrumentação e controle deve gerar para o padrão durante seu ciclo são: o padrão digital gerado nas saídas que realiza o chaveamento dos dispositivos externos para as diversas etapas, os sinais analógicos necessários para o deslocamento de frequência realizado pelos moduladores acusto-ópticos e a comunicação com o sintetizador externo para a atualização da modulação central da cadeia de microondas. Além disso, ajustar os valores de iniciais do experimento antes do início da varredura da cadeia de microondas.

Os sinais digitais gerados acionam bobinas para realização do resfriamento atômico, chaves de RF que atenuam os o sinal de saída dos VCO's (*Voltage Controlled Oscillator*) que modulam a RF injetada nos AOM's (*Acousto-Optic Modulator*), o sinal de atualização das leituras analógicas, chave de travamento de fase ou frequência para os VCO's, os contadores temporizadores e os obturadores mecânicos que atuam no ciclo.

Figura 5: Exemplo de forma de onda digital usada para injetar os pulsos de microondas durante a fase de interrogação

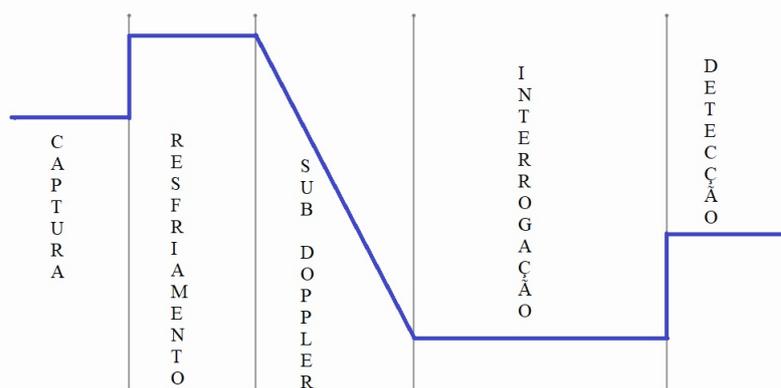


Fonte: próprio autor

O sinal digital apesar de em um primeiro momento parecer simples, de fato é a base da sequência temporal utilizada pelos relógios, pois recebem o sinal de atualização (*clock*) e com base nele controlam todo o restante do sistema inclusive as aquisições, acionando ou não cada função em seu momento certo de atuação. A Figura 5, por exemplo, apresenta a forma de onda digital do chaveamento de sinal de interrogação utilizada no relógio compacto.

As saídas analógicas são responsáveis por controlar a entrada de tensão dos VCO'S, que determinam a modulação de RF para os AOM's, que realizam os desvios de frequência nos feixes de laser, ou seja, fazendo uma rampa com o sinal de tensão podemos realizar as rampas de desvio de frequência dos feixes.z. A Figura 6, traz a forma de onda da saída analógica que controla o deslocamento de frequência do laser fonte dos feixes de aprisionamento no chafariz, como exemplo.

Figura 6: Exemplo de forma de onda analógica utilizada para controlar a frequência de lasers



Fonte: próprio autor

Por fim, o sistema de controle se comunica com um gerador de frequência (sintetizador digital direto) que faz a modulação da frequência central da cadeia de microondas que é a fonte do sinal de interrogação, ajustando seu valor de frequência para a ressonância, corrigindo os desvios de frequência entre a fonte de microondas e a frequência de ressonância de transição do Césio. No caso dos relógios experimentais do laboratório essa comunicação é feita por meio do computador de controle e uma DDS (Direct Digital Synthesizer) ambos com interface de comunicação no padrão IEEE 488/ GPIB (General Purpose Interface Bus), onde o controle envia via barramento de comunicação digital o valor de frequência a ser ajustado pela DDS.

1.5 Características de desempenho de padrões de frequência atômicos

A medida do segundo é definida baseada na transição hiperfina entre os dois níveis do estado fundamental do átomo de césio quando estão em repouso, isolados e sem

perturbação (CIPM, 1998). Condições estas que em caráter prático para a reprodução do segundo são impraticáveis.

Por este motivo, o desempenho de padrões atômicos de frequência é caracterizado em termos de sua exatidão e precisão, que são mensuradas seguindo as convenções praticadas na área de metrologia de tempo e frequência.

1.6 Exatidão

A exatidão é o grau de conformidade de um valor medido ou calculado em relação a sua definição e esta relacionada ao desvio do valor mensurado em relação ao valor ideal da grandeza medida. O deslocamento de frequência é a diferença entre a frequência medida e uma frequência ideal com zero de incerteza, essa frequência ideal é chamada de frequência nominal.

O deslocamento de frequência pode ser medido no domínio da frequência ou no domínio do tempo. O deslocamento de tempo geralmente é medido com um contador de intervalo de tempo, com entradas para dois sinais. Um sinal inicia o contador e o outro sinal o para. O intervalo de tempo entre os sinais de início e de parada é medido por ciclos de contagem a partir do oscilador da base de tempo. Sendo a resolução da contagem é limitada ao período de sua base de tempo. Contadores mais elaborados usam esquemas de interpolação e detectam partes de um ciclo de base de tempo com resolução muito maior (SHULER, 2014).

Medidas no domínio da frequência simples envolvem a contagem direta e a exibição da saída de frequência do relógio mensurando com um contador de frequência. A referência para esta medida é o oscilador de base de tempo do contador. A resolução do contador, ou o número de dígitos que ele pode exibir, limita sua capacidade de medir o deslocamento de frequência.

Existem diversos métodos para estimar ou medir a exatidão de osciladores. No contexto dos padrões de frequência de alto desempenho, seu deslocamento de frequência é caracterizado sistematicamente por fenômenos físicos tais como: efeito Doppler, radiação de corpo negro, efeito Zeeman, efeito Stark, efeitos relativísticos, por exemplo. Tais efeitos estão diretamente relacionados a imperfeições de origem prática, como vazamentos de micro-ondas, harmônicos do sinal de micro-ondas, flutuações, ou seja, todos os fenômenos que podem perturbar a diferença de energia entre os níveis da transição relógio (JEFFERTS et al., 2003).

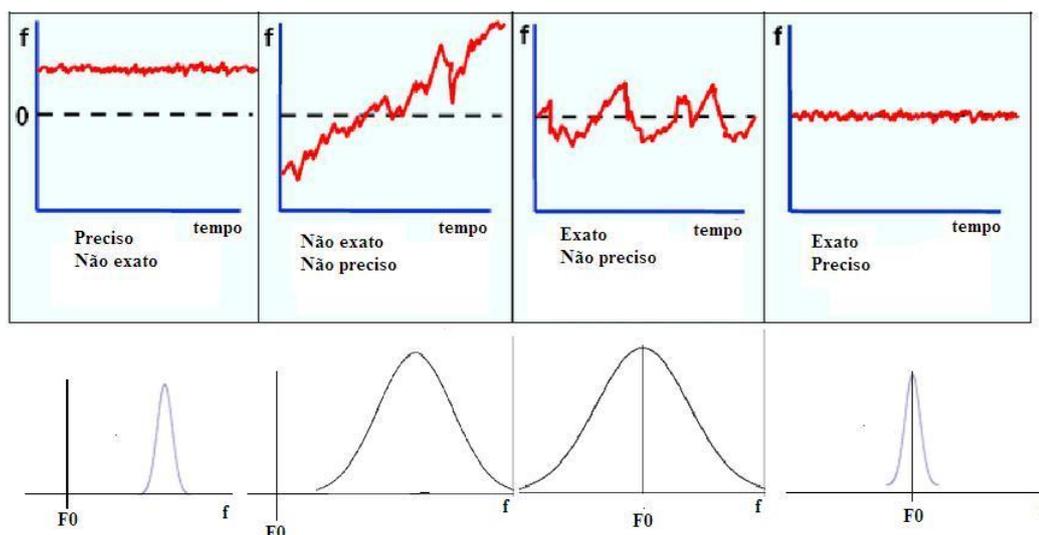
Cada um desses efeitos tem uma incerteza associada à sua medida, que, somados, contribuem para a incerteza total da exatidão da medida da frequência do relógio, ou seja, a incerteza com a qual a saída de frequência do relógio encontra-se em relação a frequência da transição que define o segundo.

1.7 Precisão ou estabilidade

A precisão ou estabilidade indica o quanto um oscilador pode produzir o mesmo valor de saída para tempo ou frequência em um determinado intervalo de tempo. Não indica se o tempo ou a frequência estão corretos ou errados, mas apenas por quanto tempo o valor de saída permanece sem alterações, atribuindo assim, uma indicativa da qualidade do oscilador. Em contraste, a exatidão indica a proximidade da saída um oscilador estar próxima no tempo ou na frequência de seu valor nominal.

Para ilustrar essa diferença, considere que um oscilador estável pode produzir um valor fixo de frequência mesmo com grande deslocamento do valor nominal precisando de ajuste para essa correção. Ou, um oscilador instável que pode apenas produzir temporariamente uma frequência próxima ao seu valor nominal. A [Figura 7](#) mostra a relação entre precisão e exatidão.

Figura 7: Exatidão e precisão no domínio do tempo e frequência



Fonte: próprio autor

Em uma fonte de frequência, medições consecutivas da frequência de um oscilador são realizadas, em que o desvio dessa frequência em relação frequência nominal corresponde ao alargamento da curva de distribuição. Uma fonte de frequência precisa pode ser usada como um padrão de frequência. Na [Figura 7](#), as curvas mais largas apresentam menor precisão, correspondendo a dispersão no valor da frequência medida em relação a nominal. Nesse caso, fonte de frequência correspondente sofreria de estabilidade temporal reduzida, mas a média da frequência média durante um período mais longo seria precisa. Quando há um desvio de frequência da frequência nominal bem definido. Se este deslocamento é estável no tempo, a fonte pode ser usada como um padrão de frequência desde que o *offset* seja determinado e posteriormente corrigido.

A estabilidade é definida como a estimativa estatística das flutuações de frequência de um sinal durante um determinado intervalo de tempo. Essas flutuações são medidas em relação a uma frequência média (SULLIVAN et al., 1990). A estabilidade de curto período geralmente se refere a flutuações em intervalos inferiores a 100 s. A estabilidade de longo período pode se referir a intervalos de medição maiores que 1000 s, mas geralmente se referem a períodos superiores a 1 dia.

As estimativas de estabilidade podem ser feitas no domínio da frequência ou no domínio do tempo e podem ser calculadas a partir de um conjunto de medidas de desvios de frequência ou intervalo de tempo. Em alguns campos de medida, a estabilidade é estimada tomando o desvio padrão do conjunto de dados. No entanto, o desvio padrão considera-se apenas dados estacionários, em que os resultados são independentes do tempo e o ruído é branco, o que significa que está distribuído uniformemente na faixa de frequência da medida (HOWE, 2002).

Os dados do oscilador, geralmente, não são estacionários, uma vez que contém o ruído dependente do tempo contribuído pelo deslocamento de frequência. Com dados estacionários, a média e o desvio padrão convergem para valores particulares à medida que forem feitas mais medições. Com dados não estacionários, o desvio padrão e médio nunca convergem para valores particulares (ALLAN; ASHBY; HODGE, 1997). Em vez disso, há uma média móvel que muda sempre que adicionamos uma medida.

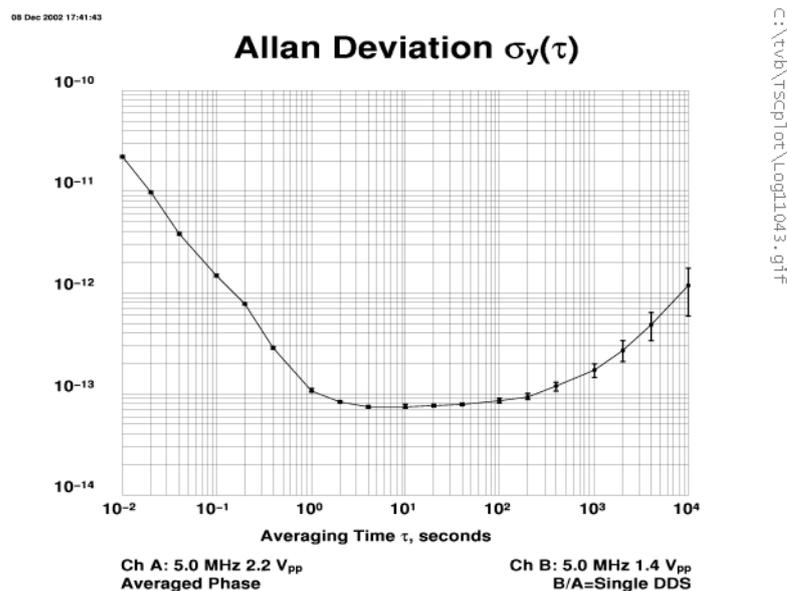
Por estas razões, uma estatística não clássica é frequentemente usada para estimar a estabilidade no domínio do tempo. Esta estatística, às vezes, é chamada de variância de Allan, mas como é a raiz quadrada da variância, é chamada de desvio de Allan. A equação para o desvio Allan σ_y é:

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^M (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (1.1)$$

Em que y_i é o desvio de frequência medido contendo o somatório das medidas sucessivas. M é o número de valores da serie de medidas e os dados são igualmente espaçados em seguimentos de τ segundos de comprimento. Note que, embora o desvio padrão subtraia a média de cada medida antes de efetuar a soma, o desvio de Allan subtrai o ponto de dados anterior. Essa diferenciação de pontos de dados sucessivos remove o ruído dependente do tempo contribuído pelo deslocamento de frequência.

Um gráfico de desvio Allan é mostrado na Figura 8. Ele mostra a estabilidade do dispositivo melhorando à medida que o período de média τ aumenta, uma vez que alguns tipos de ruído podem ser removidos pela média. Em algum momento, no entanto, uma média maior não melhora os resultados. Este ponto é chamado de piso de ruído, ou o ponto em que o ruído restante consiste em processos não estacionários, como o *flicker noise* ou *Randon walk*. O dispositivo medido é estável para 8×10^{-14} em 10 s e é melhor do que 1×10^{-13} para todos os τ de 1 s a 400 s.

Figura 8: Gráfico de estabilidade de frequência



Fonte: <http://www.leapsecond.com/museum/osa8607/>

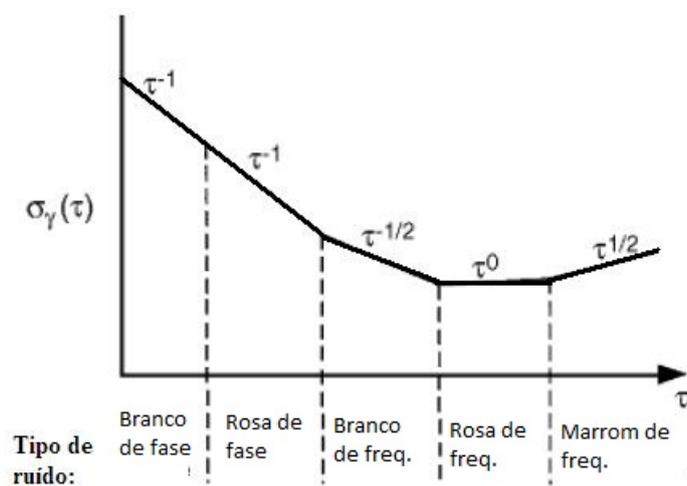
No sentido prático, um gráfico de estabilidade de frequência também nos diz quanto tempo precisamos de média para obter uma medida livre do ruído inerente à referência e pelo sistema de medição. O nível de ruído fornece alguma indicação da quantidade de médias necessárias para obter uma medida de frequência boa o suficiente para nos mostrar o desvio de frequência do oscilador atômico.

Cinco tipos de ruído são comumente discutidos na literatura de tempo e frequência: *white phase*, *flicker phase*, *white frequency*, *flicker frequency*, e *random walk frequency*. A inclinação da linha do gráfico de desvio Allan pode ajudar a identificar a quantidade de média necessária para remover esses tipos de ruído. O primeiro tipo de ruído a ser removido pela média é o ruído da fase, ou as flutuações rápidas e aleatórias na fase do sinal (NELSON et al., 2001).

Idealmente, apenas o dispositivo sob teste contribuiria com o ruído de fase para a medição, mas em relação à técnica, ruído de fase do sistema de medição e referência precisa ser removido através da média. Note-se que o desvio de Allan não faz distinção entre o ruído *white phase* e o ruído *flicker phase*.

Identificar e eliminar fontes de ruído do oscilador pode ser um assunto complexo, mas traçar as primeiras diferenças de ordem de um conjunto de medições de domínio do tempo pode fornecer uma compreensão básica de como o ruído é removido pela média. A Figura 9 foi feita usando segmentos dos dados do gráfico de estabilidade. Ele mostra parcelas de fase dominadas pelos ruídos característico de cada curvatura.

Figura 9: Gráfico usual de estabilidade para identificar tipo de ruído



Fonte: adaptada de [Nelson et al. \(2001\)](#)

2 PADRÕES DE FREQUÊNCIA COMPACTOS

Este capítulo aborda e discorre sobre a evolução alcançada na busca por padrões de frequência compactos, de funcionamento simplificado e de alto desempenho. Utilizando resfriamento atômico por meio de laser, o principal enfoque será dado aos padrões primários de micro-ondas, porém também serão discutidos relógios secundários, relógios de célula e comerciais.

2.1 Padrões de frequência compactos de átomos frios

O resfriamento atômico por laser provocou um aumento significativo no desempenho de padrões de frequência (TREMINE, 2016). Atualmente, as técnicas de resfriamento atômico estão bem estabelecidas, tanto em teoria quanto em tecnologia, esforços são agora concentrados na transição para escalas industriais (ESNAULT, 2009).

Contudo, o tamanho dos melhores relógios atômicos é incompatível com algumas aplicações que requerem um balanço entre volume do relógio e suas características de desempenho, com objetivo de usá-los na referência de sinal estável (ESNAULT et al., 2011). Assim, este é o principal fator na motivação do desenvolvimento de padrões compactos de frequência utilizando átomos frios.

Os padrões de frequência de micro-ondas primários de melhor desempenho são os chafarizes atômicos de átomos resfriados por laser. Sendo que os principais laboratórios de metrologia de tempo e frequência do mundo desenvolvem pesquisas com este tipo de tecnologia. Tais sistemas atingem patamares de precisão que ficam em torno de 10^{-13} em curtos períodos chegando a 10^{-16} em longos períodos de amostragem (BIZE et al., 2004).

Porém, são complexos, grandes e necessitam de manutenção constante, tornando-os incompatíveis com aplicações que necessitam de mobilidade, compactação e limitações de recursos humanos.

Ainda nesse sentido, de altíssimo desempenho, pode-se citar os relógios ópticos que, atualmente, são os de melhor desempenho, porém mais complexos e volumosos que os chafarizes, sendo utilizados exclusivamente para fins de pesquisas em laboratórios (MARGOLIS, 2009).

Além desses relógios de altíssima performance, de uso quase que exclusivo para fins científicos e de desenvolvimento de pesquisa, existe ainda uma vasta gama de aplicações industriais e comerciais que aceitam relógios de menor exatidão e precisão, porém que exigem compactação, robustez e autonomia (SHAH et al., 2012).

Em vistas de aplicações que vão desde exploração espacial e navegação por satélite

até uso comercial e industrial de padrões de frequência. Diversos centros de pesquisa vêm, desde meados do ano 2000, desenvolvendo tecnologias para obter relógios compactos de átomos frios, que posteriormente, serão utilizadas em escala industrial (KOZLOVA, 2012).

Centros de pesquisa associados a empresas em diversos países como França, EUA e Alemanha vêm buscando compactar o volume do aparato tecnológico utilizado, reduzir o consumo de energia, simplificar o princípio de funcionamento e aumentar a ordem de grandeza de desempenho em relação a primeira geração de relógios compactos, composta por MASER de hidrogênio e relógios de feixe térmico de Césio (V.Shah R. Stoner V. Vuletic R. Lutwak, 2011). A área de tempo e frequência seguiu, neste sentido, para a aplicação de átomos frios em padrões de tamanho reduzido, transportáveis e com boa autonomia de funcionamento. Empregando diferentes abordagens tecnológicas e métodos de manipulação da amostra atômica, visando principalmente aplicações em projetos de missões espaciais e telecomunicações.

O projeto do relógio compacto Brasileiro faz uso deste tipo de abordagem, comprometendo-se com compactação e desempenho, devido ao fato de utilizar resfriamento atômico por laser, assim como os chafarizes, permitindo alcançar níveis consideráveis em termos de exatidão e precisão (AMARAL et al., 2016). Discorreremos com aprofundamento maior sobre o projeto nos próximos capítulos.

Nesse segmento ainda encontram-se padrões de frequência utilizando células de vapor contendo amostras de átomos como gás, porém os graus de exatidão e precisão obtidos com o relógio de célula de vapor distinguem-se dos relógios de átomos frios, devido aos deslocamentos de frequência complicados de serem contornados (ESNAULT; DONLEY; KITCHING, 2010) e (DONLEY et al., 2013).

Os desenvolvimentos obtidos na área guiaram projetos de padrões com bom desempenho utilizando técnicas de CPT (Coherent Population Trapping) como o micro relógio CSAC (Chip Scale Atomic Clock) (LUTWAK et al., 2003). MuClock, relógio baseado em átomos frios de rubídio que já se encontra em escala industrial e sendo comercializado (UQUANS, 2017). Visando aplicações de sincronização de equipamentos, telecomunicações, redes de dispositivos móveis, receptores de sinais de satélite, aplicações militares e navegações terrestres.

2.2 Relógios de feixe

É notório que a tecnologia de relógios atômicos refinou o campo da metrologia, da física e de muitos outros campos de aplicação. Diversos órgãos mundiais sejam eles civis, de pesquisa ou militares, mantém em operação padrões primários de frequência de césio e MASER's de hidrogênio, devido à precisão obtida com os dispositivos que possuem níveis de 10^{-13} em curtos períodos chegando a 10^{-14} em médios e longos períodos de medição

(KUSTERS; CUTLER; POWERS, 1999).

No contexto dos relógios atômicos compactos clássicos, relógios de feixe de Césio, MASERS de hidrogênio e padrões de rubídio bombeados ópticamente, são também classificados como padrões de frequência compactos de primeira geração. Sendo outras tecnologias, como átomos frios e nano relógios desenvolvidos e utilizados atualmente, assumidas como segunda geração (VANIER; TOMESCU, 2015) e (TREMINE, 2016).

A maioria dos padrões de frequência em uso são os relógios de feixe térmicos de microondas condicionados em câmaras de vácuo. Com projeto e funcionamento ainda muito similar aos primeiros relógios construídos com essa tecnologia, como por exemplo, o relógio desenvolvido pelos cientistas Louis Essen e Jack Parry em 1965 (National Physical Laboratory, 2017).

A implementação prática de um padrão deste tipo consiste no travamento da frequência de ressonância atômica à frequência do oscilador de cristal de quartzo que é usado para gerar a radiação de microondas que induz as transições atômicas na cavidade de microondas.

Os átomos fluem por meio de feixe térmico através de um sistema de canais de um forno, aquecido a uma temperatura de 100 °C ou mais e é preenchido com alguns gramas de césio. Devido à separação de energia entre os estados $F = 3$ e $F = 4$, ambos os níveis são quase igualmente preenchidos no feixe térmico. Consequentemente, os átomos devem ser preparados num destes estados, de modo a permitir a detecção de transições entre os níveis induzidos por um campo oscilante externo.

Em dispositivos de feixes atômicos de Césio, como a maioria dos relógios atômicos em uso e relógios primários mais antigos, os átomos em um estado particular são selecionados por meio de seus momentos magnéticos.

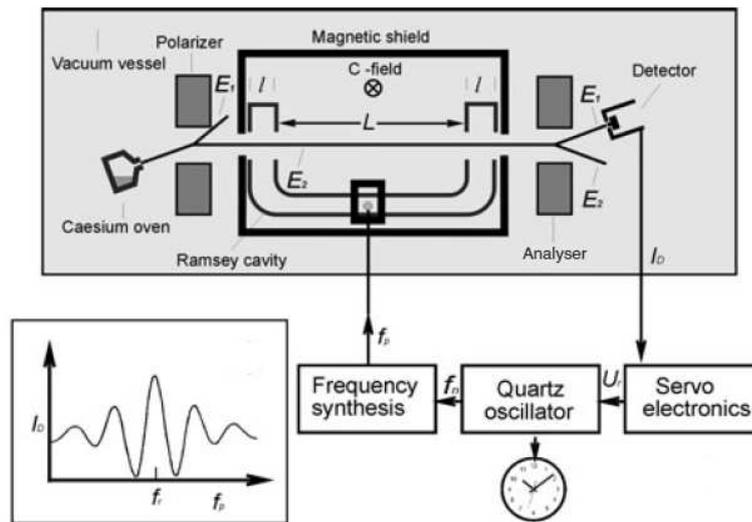
Com campo magnético forte acima de 0,4T, a energia de um átomo Césio em qualquer um dos subníveis do estado $F = 3$ é reduzida quando o campo magnético aumenta, o mesmo é verdadeiro para o estado $F = 4$. Então, utiliza-se o chamado polarizador magnético, com um campo magnético não homogêneo, seleciona-se os átomos de acordo com seu momento magnético e pode ser usado para preparar os átomos no estado desejado (RIEHLE, 2004).

O ressonador de microondas em forma de U é ajustado a 9,1926 GHz. O ressonador é geralmente uma guia de onda ou cavidade padrão de seção transversal retangular com placas de extremidade que curto-circuitam a guia de onda. O feixe atômico entra e sai das duas seções da extremidade da cavidade através de pequenos orifícios perto das placas da extremidade.

Os átomos passam pela primeira região de interação e depois de uma região sem campo de microondas atravessam o segundo segmento de interação da cavidade de

microondas, em forma de U em uma configuração espacial clássica, em que a transição do estado $F = 3$ para o estado $F = 4$ dos átomos pode ser induzida numa excitação de Ramsey, dependendo da diferença entre a frequência do oscilador externo e a transição atômica. Uma segunda combinação de seletor de estado, isto é, o analisador, desvia os átomos que realizaram a transição relógio para dentro do detector.

Figura 10: Esquema geral de um relógio atômico de feixe térmico



Fonte: Bauch (2014)

A Figura 10 apresenta um esquema geral de um padrão de feixe que utiliza seletores magnéticos de estado, configuração essa ainda aplicada por boa parte dos relógios comerciais deste tipo. A forma do sinal da ressonância observada quando a frequência de microondas é varrida lentamente sobre a ressonância atômica de 9192631770 Hz é apresentada no canto esquerdo inferior da figura. Embora mostrada paralelamente à direção do feixe, na prática o campo magnético estático que permite a quantização dos subníveis hiperfinos é perpendicular ao feixe atômico geralmente gerado por uma bobina.

A franja central, com o seu máximo na frequência de transição, é utilizada para estabilizar a frequência do oscilador macroscópico, travado na frequência de transição atômica. Para este fim, a frequência do sintetizador é modulada através do pico central. O sinal do detector é sensível à fase e age na eletrônica de controle, e o servo-sinal é usado para o travamento. Deste oscilador são derivadas as frequências de saída de uso prático, tais como 5MHz ou um sinal 1 PPS, por exemplo.

Devido à grande largura da distribuição de velocidade atômica, apenas as franjas centrais de Ramsey sobrevivem à média de velocidade associada. Em contraste, o pedestal

de Rabi reflete a linha ampliada resultante da interação dos átomos em uma única zona (VANIER; AUDIOIN, 1989).

Os desvios que causam incertezas podem ser separados em três grupos principais: os intrínsecos às propriedades atômicas, as introduzidas na detecção do sinal de ressonância e as introduzidas no travamento do gerador de microondas à linha de ressonância. E costumam ser estudados com profundidade em avaliações e caracterizações mesmo em relógios experimentais de mais alto desempenho (RIEHLE, 2004).

Figura 11: Padrão de frequência atômico de feixe térmico comercial 5071A



Fonte: Bauch (2014)

Os relógios de feixes atômicos de Césio estão comercialmente disponíveis por diversos fabricantes (como Microsemi e KVARZ, por exemplo) desde a década de 1950 (FORMAN, 1985). Em geral, se encaixam em caixas de 30 cm e têm massa em torno de 25 kg e um consumo de energia por volta de 50W. As incertezas variam de 2×10^{-12} a 5×10^{-13} . O piso de ruído de 5×10^{-15} pode ser alcançado após cerca de 10 dias de média (BAUCH, 2014).

Atualmente, encontram-se algumas empresas que projetam e fabricam relógios atômicos e algumas que apenas os comercializam. A Tabela 1 lista algumas dessas empresas com sua página na internet. A Figura 11 apresenta o relógio o modelo 5071A atualmente comercializado pela empresa Microsemi, sendo que este modelo de relógio de feixe é muito encontrado em sistemas de sinais de tempo e frequência espalhados pelos laboratórios de metrologia ao redor do globo.

Tabela 1: Endereço eletrônico de fabricantes e distribuidores de relógios atômicos

www.microsemi.com
www.oscilloquartz.com
www.spectracom.com
www.frequelec.com
www.brandywinecomm.com
www.chronos.co.uk
www.muquans.com
www.spectratime.com

2.3 MASER

O primeiro MASER (Microwave Amplification By Stimulated Emission Of Radiation) foi concebido em 1954 ([GOLDENBERG; KLEPPNER; RAMSEY, 1960](#)). Os pesquisadores não estavam trabalhando na busca por um relógio, estavam em busca de uma maneira de amplificar sinais de rádio na banda das microondas. Porém, os masers serviram muito bem como referência de frequência em que pode-se observar diretamente o sinal de radiação atômica ([BENDER, 1963](#)) e ([KLEPPNER et al., 1965](#)).

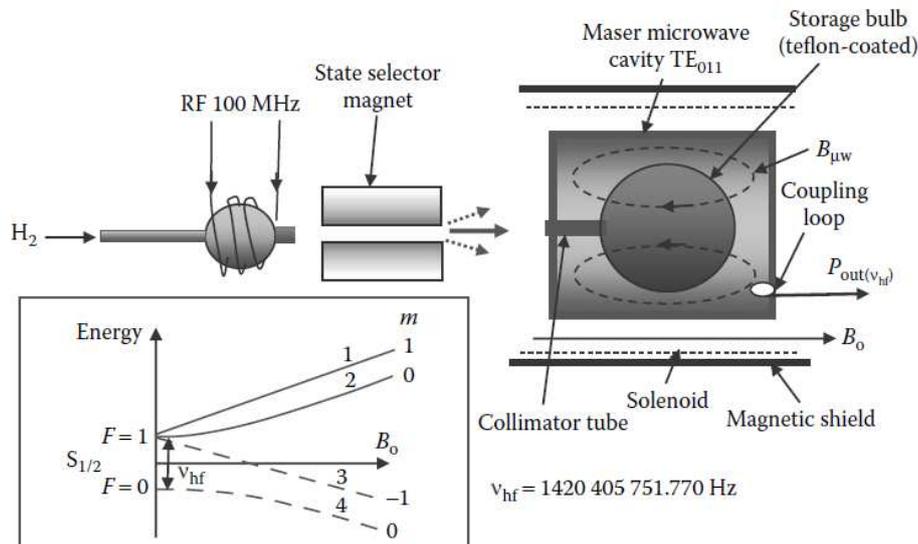
Os masers foram testados com várias espécies atômicas ou moleculares para realizar investigações espectroscópicas de microondas de alta resolução. A partir dos vários tipos de masers desenvolvidos para padrões de frequência e com base, por exemplo, em amônia, hidrogênio, rubídio ou césio, o maser de hidrogênio (H maser) tornou-se o principal de uso prático ([RIEHLE, 2004](#)).

O maser de hidrogênio utiliza uma transição entre dois níveis de estado fundamental $F = 1$ e $F = 0$, com ressonância na frequência 1.420.405.752 Hz. Masers de hidrogênio usados hoje não diferem muito da primeira realização no grupo de Norman Ramsey ([KLEPPNER; GOLDENBERG; RAMSEY, 1962](#)).

De forma semelhante ao feixe de Césio, o gás de hidrogênio segue através de um seletor magnético que permite apenas os átomos em um estado emissor de energia passar. Os átomos que passam pelo seletor entram em um bulbo de vidro de quartzo de armazenamento. O bulbo é revestido internamente com um material de Teflon semelhante ao usado em utensílios de cozinha antiaderente. Os átomos permanecem no bulbo cerca de um segundo antes de sair.

Assim, a célula de armazenamento, que é colocada num ressonador de microondas, contém mais átomos no estado excitado que podem emitir radiação por emissão estimulada. A radiação é detectada por uma antena e usada para ajustar a frequência de um oscilador de cristal à transição dos átomos de hidrogênio. A [Figura 12](#) apresenta um diagrama esquemático conceitual do maser clássico de hidrogênio.

Figura 12: Esquema geral de um maser de hidrogênio



Fonte: Vanier e Tomescu (2015)

O princípio da operação é o seguinte: assumindo a presença de um campo de microondas na cavidade, os átomos que entraram no bulbo de armazenamento no nível $F = 1$, $m_f = 0$ emitem energia em 1420.405 MHz através do processo de emissão estimulada de radiação.

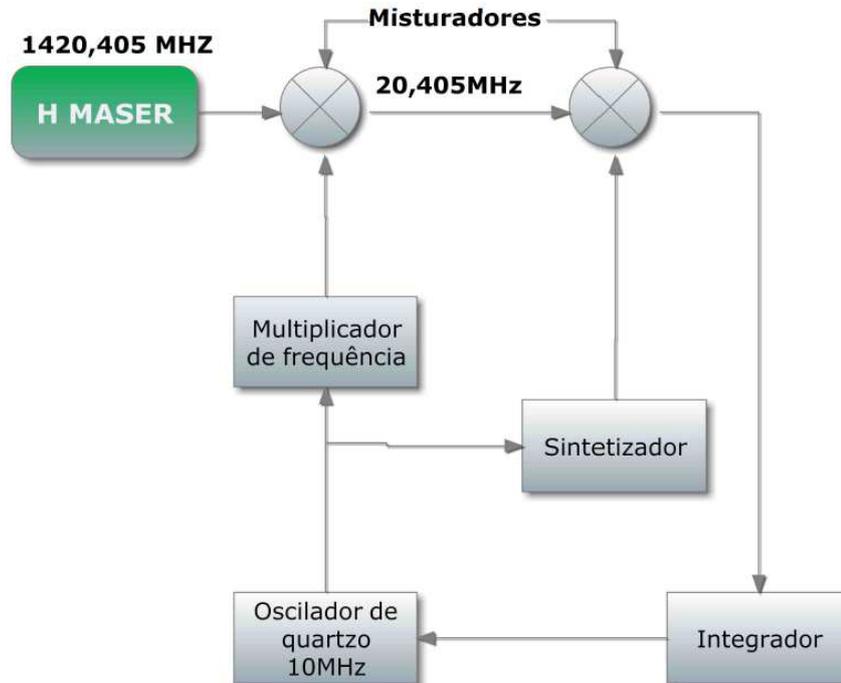
A energia (fóton) emitida choca-se em outro átomo em estado de emissão eminente forçando a emissão de radiação em fase, resultando em um processo de amplificação. A energia entregue pelos átomos é parcialmente dissipada nas paredes da cavidade e parcialmente entregue aos circuitos externos através de uma antena de acoplamento. Os átomos no nível $F = 1$, são continuamente reabastecidos pelo feixe de entrada, e se as perdas de microondas são pequenas e o tempo de relaxação suficientemente longo, inicia-se o processo de oscilação contínua.

Esta situação resulta em um maser ativo. No outro caso em que as perdas por microondas são demasiado grandes, não existem oscilações contínuas. No entanto, ainda é possível observar o fenômeno de emissão estimulada através de técnicas apropriadas de amplificação-deteção passiva. Esta abordagem é chamada de maser passivo.

O solenóide mostrado na Figura 12 cria um campo magnético que fornece um eixo de quantização para a amostra atômica. A frequência relógio é originada das transições

$\Delta mF = 0$ que pelas regras de seleção da mecânica quântica exigem que o campo magnético DC e o campo magnético de microondas sejam paralelos.

Figura 13: Esquema geral de travamento de frequência de um maser



Fonte: próprio autor

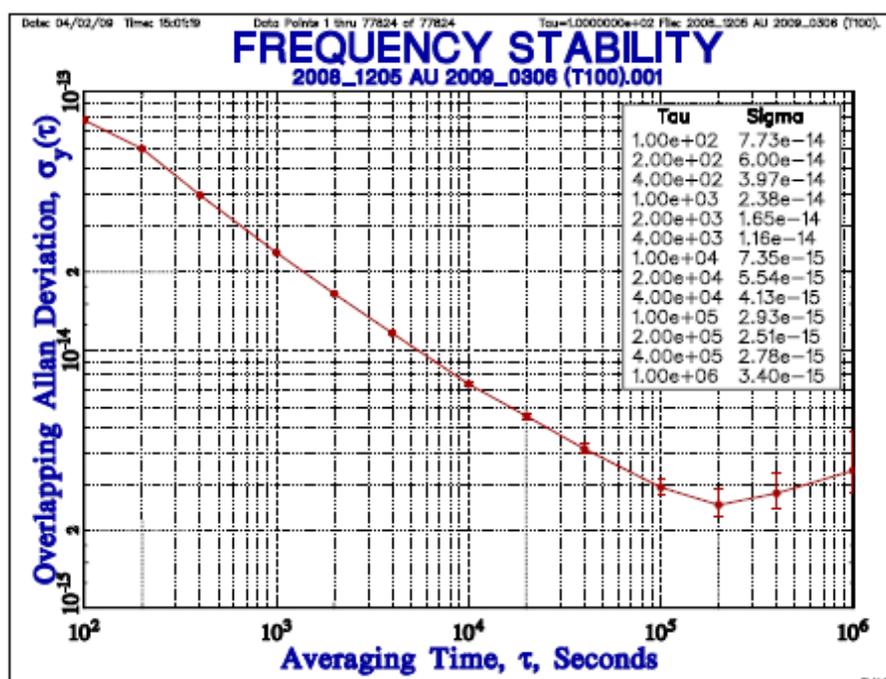
O seletor magnético, o bulbo de armazenamento e cavidade são mantidos sob vácuo geralmente menor que 10^{-7} Torr mantido por bombas tipo getter. O bulbo de armazenamento e a cavidade são colocados dentro de um conjunto de escudos magnéticos concêntricos para reduzir a influência das flutuações ambientais do campo magnético da terra. A frequência de saída do dispositivo é sensível a pequenas variações de tamanho da cavidade que é função da sua dimensão (WALLER et al., 2009).

A potência de saída de um maser é, geralmente, da ordem de 10^{-13} a 10^{-14} W e tem frequência nominal de 1420.405 MHz, e não possui caráter prático geral. Por esse motivo, este sinal é normalmente processado por meio de um sistema digital, travado em fase com um oscilador de cristal de quartzo a uma frequência nominal de 10 MHz para o sinal de saída do maser. Um típico esquema para sintetizador *phase locked loop* é apresentado na Figura 13.

O sinal é detectado por meio de técnicas de heterodinagem. A frequência de referência utilizada na detecção é gerada a partir de um oscilador de cristal de quartzo multiplicado por uma frequência, por exemplo 1400 MHz, resultando numa frequência de

batimento de 20,405 MHz chamada frequência intermediária. O sinal de batimento obtido pode ser integrado até em algumas fases. Na fase final, o sinal de saída do cristal oscilador é travado em fase com o sinal de saída do maser.

Figura 14: Curva de estabilidade para o maser PHM QM1

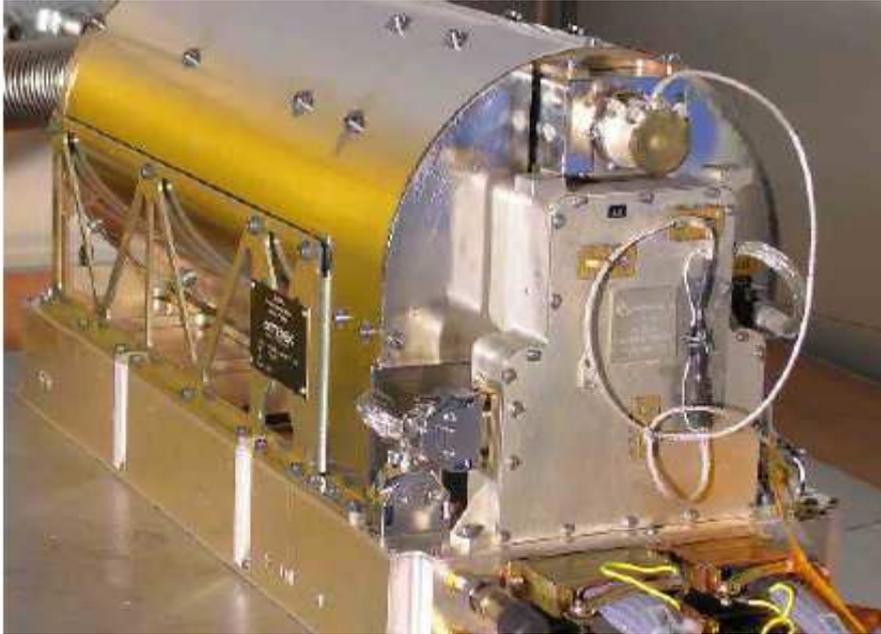


Fonte: Droz et al. (2009a)

Em masers de hidrogênio ativos bem projetados e construídos, a estabilidade de frequência para tempos de média na faixa de $10\text{s} < \tau < 1000\text{s}$ é principalmente limitada pelo ruído branco de frequência interno. A estabilidade de frequência é geralmente da ordem de 10^{-13} para $\tau = 1\text{s}$ (DROZ et al., 2009b) e (GOUJON et al., 2010). A Figura 14 apresenta a curva de estabilidade para o maser PHM QM1 construído pela iniciativa europeia para o projeto Galileo.

Vários laboratórios desenvolveram masers passivos e ativos. Alguns dos pioneiros foram o Smythsonian Astrophysical Observatory (SAO) da Universidade de Harvard em Cambridge, Vremya em Nizhny Novgorod na Rússia e Spectratime na Suíça (WANG et al., 2013). A Figura 15 mostra a versão comercial do maser PHM construído e comercializado pela Spectratime.

Figura 15: Versão comercial do maser PHM construído e comercializado



Fonte: Droz et al. (2009a)

2.4 Padrões de frequência compactos em desenvolvimento

Conforme foi dito anteriormente, diversos centros de pesquisa e desenvolvimento espalhados pelo globo terrestre possuem interesse no desenvolvimento de padrões compactos de frequência que façam uso de átomos esfriados ópticamente e espectroscopia Ramsey, pela vantagem obtida na resolução espectral e qualidade do sinal de resposta da interrogação atômica.

Dentre os vários centros que possuem estrutura para o desenvolvimento desta tecnologia os laboratórios do observatório de Paris SYRTE (*Systèmes de Référence Temps-Espace*) na França iniciaram no final da década de noventa o desenvolvimento do projeto HORACE (*HOrloge à Refroidissement d'Atomes en Cellule*) (GUILLOT et al., 1999).

Diferentemente dos desenvolvimentos, feitos pelo centro, com seus chafarizes atômicos, a motivação principal não era atingir a maximização no aumento da estabilidade ou exatidão para faixas de 10^{-16} ou melhor, mas, utilizar a tecnologia dos átomos frios em um aparato experimental de tamanho reduzido e modo de funcionamento simplificado em relação aos chafarizes (TREMINE et al., 2004)

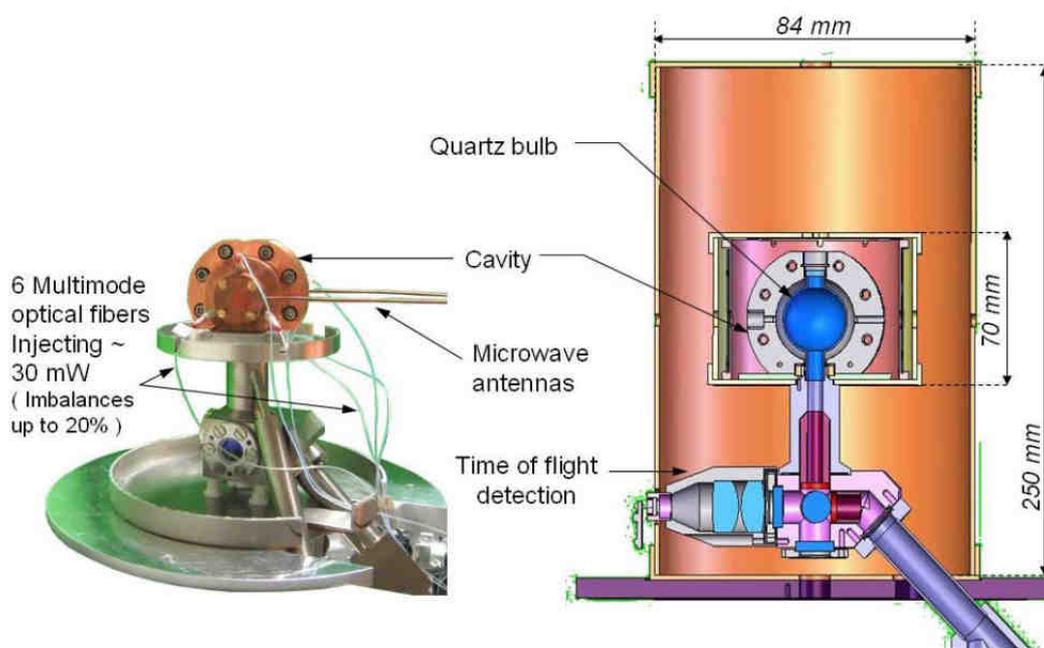
A idéia fundamental era obter um relógio em que todas as etapas de seu ciclo de funcionamento ocorressem em uma mesma região do experimento. No caso, dentro da cavidade de microondas (TREMINE et al., 2005).

Duas cavidades foram analisadas e testadas sendo uma esférica e outra cilíndrica

respectivamente. Resultando na escolha da cavidade esférica devido ao fato de utilizarem o método de resfriamento óptico isotrópico, permitindo uma redução considerável do aparato experimental em torno de $1m^3$ atingindo estabilidade de $\sigma(y) = 10^{-16}$ em 1 segundo(ESNAULT et al., 2007).

Utilizando a cavidade esférica no resfriamento isotrópico da amostra de césio, todas as etapas do ciclo de funcionamento, as fases de resfriamento, preparação, interrogação e detecção, do HORACE puderam ser realizadas com os átomos dentro da cavidade (ESNAULT et al., 2011). A Figura 16 apresenta a configuração, em vista cortada, do sistema montado do relógio HORACE e também sua cavidade ressonante esférica em que é possível notar as fibras para o esfriamento isotrópico e antenas de alimentação de microondas.

Figura 16: Montagem da cavidade do HORACE



Fonte: Tremine et al. (2005)

O foco principal do projeto deu-se na aplicação em sistema de navegação por satélites do projeto GALILEO, servindo de referência de sinal de frequência tanto em bases terrestres quanto inserido no equipamento (ESNAULT et al., 2006) .

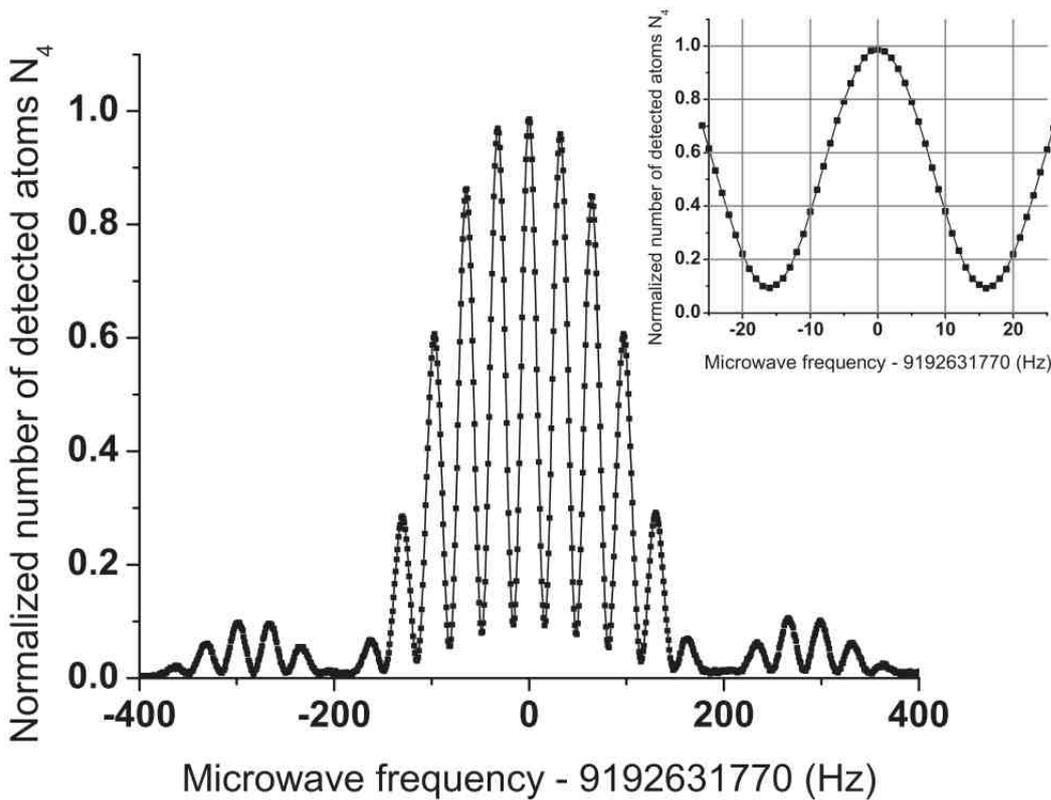
Seu ciclo de funcionamento consiste basicamente em resfriar o vapor de átomos de Césio dentro da cavidade utilizando quatro feixes laser fornecidos por quatro fibras ópticas, fazer o bombeamento óptico preparando a amostra no estado $F = 3$, aplicar os pulsos de interrogação da espectroscopia Ramsey, utilizando pulsos separados temporalmente, por

fim, detecção da eficiência da transição utilizando um feixe de absorção que atravessa a amostra. (ESNAULT et al., 2007) e (TRÉMINE et al., 2004).

A medida de absorção fornece a quantidade da população atômica em cada um dos estados fundamentais, após a interrogação. Com isso, calcula-se a probabilidade da transição. As correções de frequência são enviadas a um DDS para corrigir a frequência do oscilador local da síntese de microondas (ESNAULT et al., 2011). Maiores detalhes sobre o laço de correção do oscilador local podem ser consultados em (ROSSETTO et al., 2011).

Utilizando uma sequência temporal de 80 ms, sendo a interrogação do césio com 35 ms (dois pulsos de 5 ms espaçados temporalmente por 25 ms) foi obtido uma largura de linha de 18Hz com 90% de contraste mostrada pela Figura 17 (ESNAULT et al., 2011) e (POTTIE et al., 2003).

Figura 17: Franja assinatura obtida com o HORACE



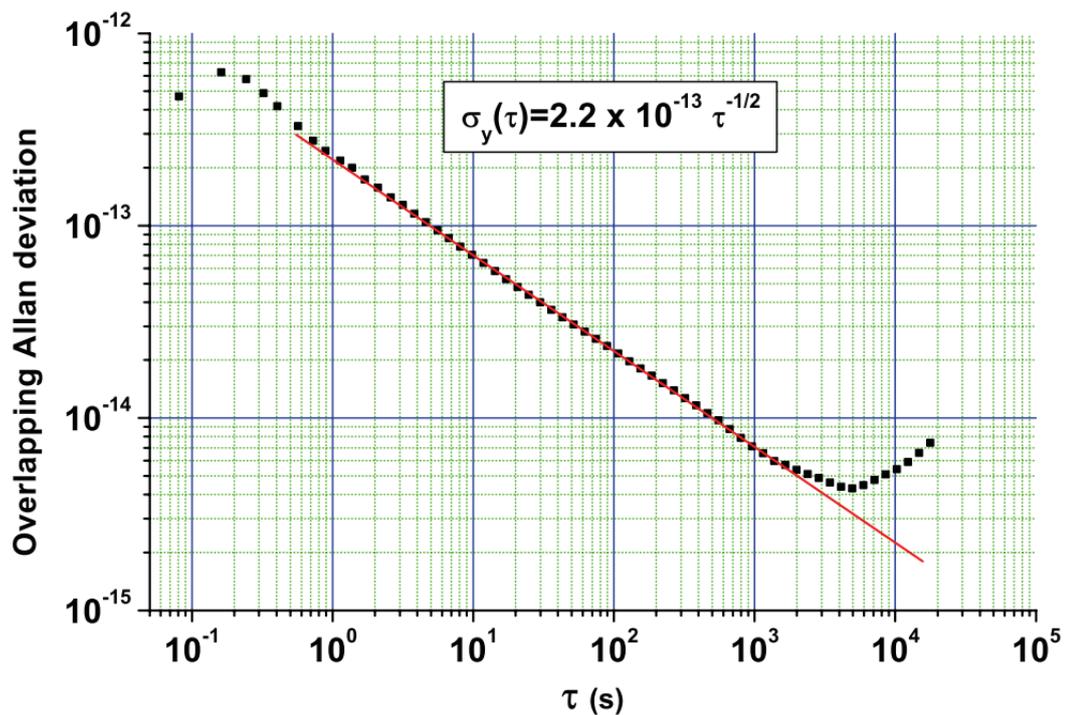
Fonte: Esnault et al. (2010)

Com esta configuração, a estabilidade relativa atingida ficou abaixo dos $\sigma(y) = 2,2 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ em curto período. Chegando a $\sigma(y) = 4 \times 10^{-15} \tau^{-1/2}$ em aproximadamente 5000 segundos (ESNAULT et al., 2010). Resultado apresentado pela Figura 18.

Os mais de quinze anos de pesquisa e experiência adquirida pelo grupo SYRTE culminou no desenvolvimento de um produto de escala industrial, comercializado pela

empresa Muquans, baseado no relógio HORACE. Porém, utilizando átomos de rubídio com mesmo princípio de funcionamento do relógio HORACE. Atingindo seu limite esperado de precisão e estabilidade em torno de 10^{-15} após 5000 segundos. Consumindo 200 W de potência e pesando 75 Kg com profundidade de 40 cm, largura de 51 cm e altura de 120 cm, respectivamente. A [Figura 19](#) apresenta o produto comercial de alto valor agregado obtido com o desenvolvimento do relógio HORACE e outras pesquisas com padrões de frequência compactos ([UQUANS, 2017](#)).

Figura 18: Estabilidade HORACE



Fonte: [Esnault et al. \(2010\)](#)

Padrões primários de frequência são caracterizados geralmente por alta qualidade em sua exatidão e precisão, tal como os chafarizes atômicos. Enquanto relógios em células de vapor (Rubídio ou Césio), preenchida por vapor atômico como gás, tem seu desempenho afetado por desvios colisionais entre os átomos presentes no gás da amostra interna da célula. Portanto, em geral são usados como padrões secundários ([YUN, 2012](#)).

No entanto, este tipo de relógio, devido ao relativo baixo custo, tamanho reduzido, e estabilidade de curto período, são utilizados em muitas aplicações comerciais e industriais, tais como navegação terrestre e aeroespacial, sincronização de equipamentos de instrumentação, relógios embutidos em placas de sistemas de computação ([KANG et al., 2015](#)).

A [Figura 20](#) apresenta o padrão de frequência comercial FE5680A de Rubídio,

Figura 19: Relógio MuClock



Fonte: [Uquans](#) (2017)

comercializado pela empresa Frequency Electronics que possui como características estabilidade de 5×10^{-11} em um segundo, após 5 minutos para estabilizar em temperatura, consumo de 32 W, 2,5 cm de altura, 8,8 cm de largura, 12,5 cm de profundidade, pesando 0,434 Kg.

Figura 20: Padrão de frequência de Rb FE5680A



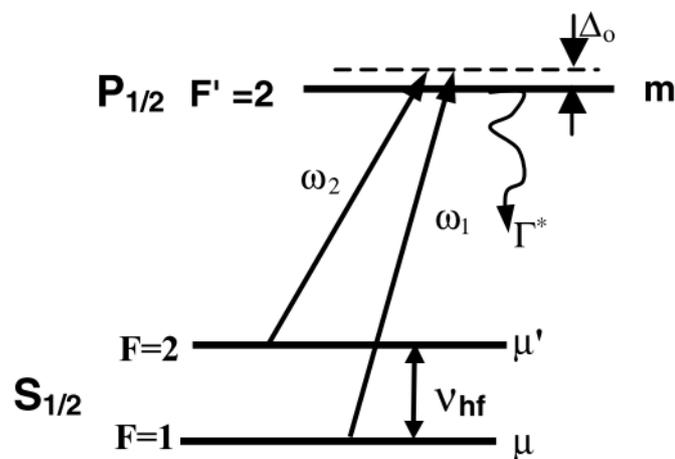
Fonte: [Frequency](#) (2016)

[Zanon et al. \(2005\)](#) propuseram o uso da técnica de CPT (*Coherent Population Trapping*), usando uma configuração de melado óptico em que, executavam com os átomos

em temperatura ambiente uma espectroscopia Ramsey simulando um chafariz, porém sem lançar a amostra em outras regiões do experimento.

A técnica de ressonância CPT, é um fenômeno de interferência quântica, cujo o campo eletromagnético de dois lasers travados em fase excitam continuamente dois estados fundamentais de uma transição atômica, acoplados a um estado excitado em comum a ambas (VANIER, 2005). Esse tipo de abordagem é conhecido como configuração Λ . A Figura 21 apresenta um esquema geral de um sistema Λ utilizado para analisar o método CPT.

Figura 21: Modelo de três níveis usado para analisar o fenômeno CPT



Fonte: Vanier (2005)

Nos primeiros relógios desenvolvidos com esta técnica, geralmente, observava-se a largura de linha monitorando a luz transmitida pelos lasers. O sinal de erro simétrico e assimétrico do CPT gerado é utilizado para realimentar um sistema de controle que faz o travamento do oscilador local. Dessa forma, travando o oscilador na ressonância atômica (ZHOLNEROV; VERSHOVSKIY; ROZHDESTVENSKIY, 2012). Porém, os resultados obtidos apresentavam forte influência de desvios causados na ressonância reduzindo seu contraste.

Por volta do ano de 2010 a equipe do NIST (*National Institute of Standards and Technology*) financiada pelo DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*), iniciou um projeto de Padrão de frequência utilizando CPT, porém, com uso de átomos frios (DONLEY et al., 2010). Consiste em um experimento que usa resfriamento bicromático de emissão estimulada para pré-esfriar átomos e aumentar o número de átomos presentes na amostra em uma configuração de armadilha magneto-óptica. Permitindo testar resfriamento bicromático de átomos com certo grau miniaturização (ESNAULT; KITCHING; DONLEY, 2012).

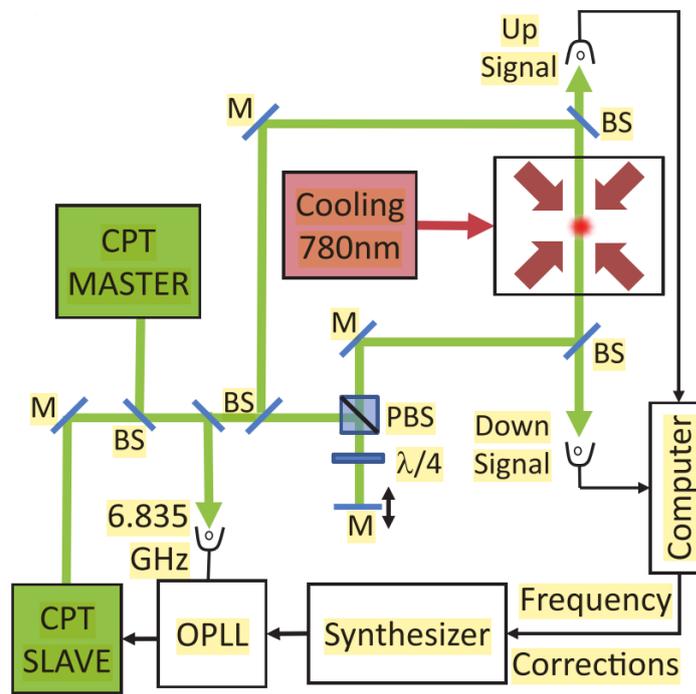
Os lasers de resfriamento ficam ligados durante um ciclo de 45 ms criando a

armadilha magneto óptica, contendo em torno de 10^6 átomos de Rb. Os átomos podem ser reciclados com uma eficiência de recuperação de cerca de 80% no final da sequência total do relógio. Após o resfriamento, os átomos são excitados por meio de um esquema de duplo delta.

Os dois feixes bicromáticos são polarizados linearmente e enviados para a célula, onde a amostra está em livre expansão, configurados em direções opostas em um sistema duplo delta que evita o efeito Doppler. O conjunto é primeiro bombeado para um estado de superposição por meio de um pulso Ramsey de 400 microsegundos de duração. O sistema é então deixado a evoluir livremente por um tempo (TR). Em seguida, o estado do sistema é detectado com um feixe laser de prova sob a forma de um pulso de $50 \mu\text{s}$ de duração.

A Figura 22 apresenta um esquema da montagem do sistema em que é possível notar os dois lasers bicromáticos contrapropagantes que bombeiam e interrogam a amostra de átomos e o laser de resfriamento dos átomos. Os feixes de laser são verticais para maximizar deslocamentos Doppler dependentes da velocidade de modo que as mudanças possam ser avaliadas.

Figura 22: Esquema da montagem do sistema CPT

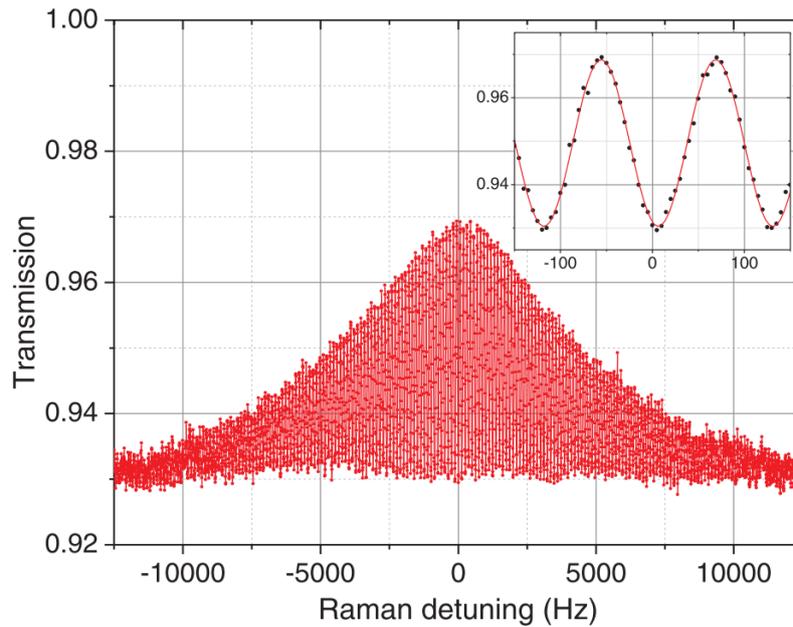


Fonte: [Esnault et al. \(2013\)](#)

Para uma TR de 8 ms, observou-se uma largura de linha de franja central de 62,5 Hz. Deve-se notar, que os dois sistemas Λ possuem deslocamentos de campo magnético de primeira ordem que são iguais, mas que tem sentidos opostos e são muito sensíveis aos gradientes do campo magnético. Sua estabilidade de frequência, operada sem blindagem

gem magnética foi caracterizada por uma estabilidade de frequência de $4 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ (ESNAULT et al., 2013). A Figura 23 apresenta a ressonância observada no experimento a largura da franja é 62,5 Hz, como esperado para $TR = 8$ ms. A largura do envelope Lorentziano medido foi de 15 kHz mostrando dependência da saturação óptica do pulso de detecção.

Figura 23: Ressonância Raman apresentada pelo CPT com espectroscopia Ramsey



Fonte: Esnault et al. (2013)

Devido a estabilidade de longo prazo do relógio ter apresentado limitações causadas por mudanças de efeito Zeeman com o sistema não blindado magneticamente e também devido a flutuações ópticas.

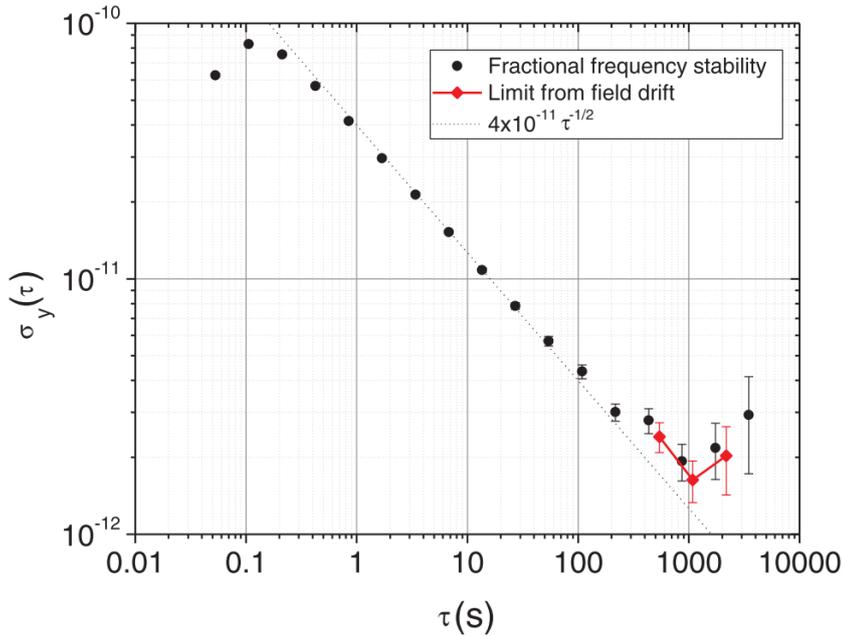
Segundo Esnault et al. (2013), espera-se com blindagem magnética e revestimento anti-reflexo, melhorar a estabilidade de longo prazo do relógio, estimada na escala de 10^{-13} . A Figura 24 apresenta Estabilidade de frequência fracionária versus período de integração, em que é observável o desvio limitante em 10^{-11} associado ao ruídos Zeeman.

Outros tipos de padrões frequência vem sendo desenvolvidos buscando compactação e desempenho utilizando métodos alternativos aos chafarizes que também foram pesquisados. Entre eles, o padrão utilizando a técnica de *pulsed optically pumped* (POP) com átomos de Rb, desenvolvido por (MICALIZIO et al., 2012).

Esta abordagem é geralmente chamada de técnica de dupla ressonância. O bombeamento óptico é utilizado para obter um desequilíbrio na população dos dois níveis do estado fundamental hiperfino, em vez da seleção do estado magnético. Isso é feito em uma célula fechada, contendo o vapor atômico em um gás quimicamente inerte, colocado dentro

de uma cavidade ressonante com a frequência de transição do átomo utilizado na amostra (VANIER; TOMESCU, 2015).

Figura 24: Estabilidade de frequência obtida com CPT



Fonte: Esnault et al. (2013)

As técnicas utilizadas permitiram alcançar estabilidades de frequência na ordem de $1,7 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ após 1000 segundos de integração. Segundo Godone et al. (2015), pretende-se chegar na gama de 10^{-15} para o médio e longo prazo. Sendo essa estabilidade duas ordens de magnitude melhores do que os atuais relógios Rb comerciais.

Outros grupos também avançaram no desenvolvimento de técnicas e experimentos novos, caso do uso da técnica CPT associada ao POP, que vem mostrando resultados bastante promissores para metrologia de tempo e frequência. Nesse sentido, o SYRTE vem desenvolvendo um relógio CPT de alto desempenho baseado em um único laser, combinando interrogação com pulsos Ramsey em um esquema de bombeamento CPT otimizado.

Este relógio CPT de Césio apresentou um desvio de Allan de $2,3 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ para tempos de média de 100 segundos. Nível de desempenho comparável com o sinal de um maser de hidrogênio ativo, referência no estado da arte, com uma estabilidade de frequência de 8×10^{-14} e 3×10^{-15} em 1 e 100 segundos, respectivamente. A Figura 25 apresenta a estabilidade em dois regimes de experimento com laser contínuo (triângulos pretos) e fazendo interrogação pulsada (quadrados vermelhos), no caso, a curva com laser contínuo foi simulada e a pulsada é experimental.

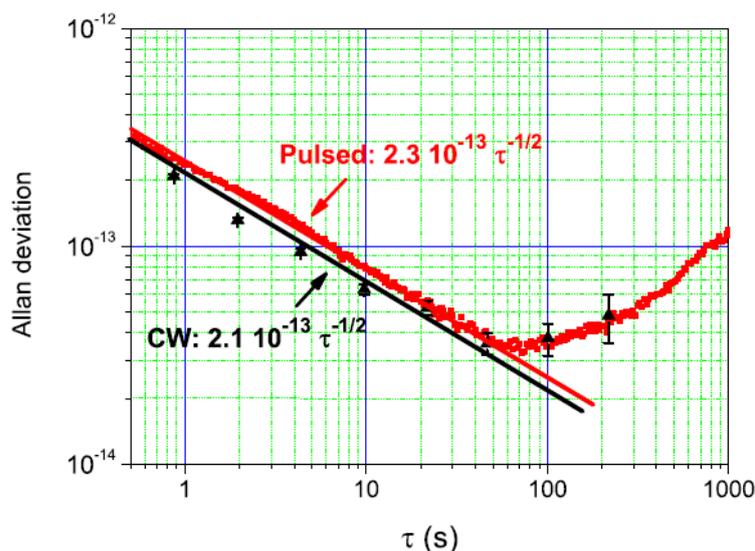
A largura de linha da franja central medida ficou em torno de 134 Hz. O contraste,

definido como a relação entre a amplitude de pico-pico da franja central (0,48 V) e o nível dc na meia altura da franja central (2,85 V) ficou em 17% (HAFIZ et al., 2017). A Figura 26 mostra a franja de ressonância obtida experimentalmente, com detalhe para franja central.

Desde meados do ano de 2002, a ideia de combinar o uso de espectroscopia CPT com métodos de fabricação desenvolvidos para sistemas microeletromecânicos (MEMS) vem sendo proposto por cientistas do NIST em conjunto com a empresa Symmetricom (LUTWAK et al., 2002). A Agência norte americana de Projetos de Pesquisa Avançada em Defesa (DARPA - Defense Advanced Research Projects Agency) iniciou um programa para desenvolver um relógio atômico de escala de chip textit(CSAC – Chip Scale Atomic Clock), a fim de fornecer tempo preciso para instrumentos portáteis de peso leve (LUTWAK et al., 2003). Em 2011, tornou-se disponível comercialmente como um produto de mercado (LUTWAK, 2011).

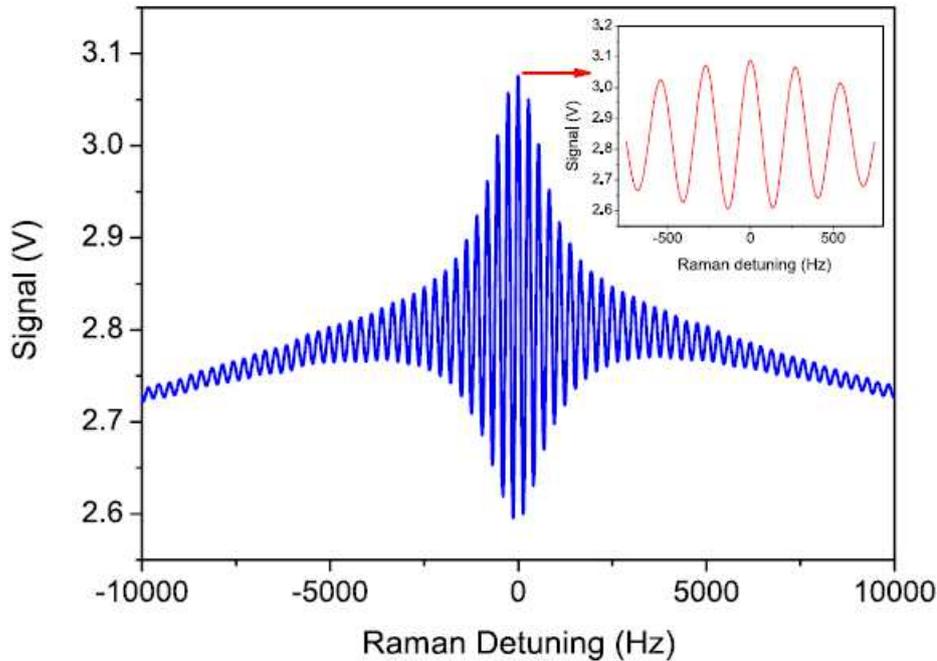
O CSAC é formado basicamente por uma célula de vapor de Césio que contem uma pequena quantidade de átomos, compensada em temperatura. A célula é aquecida até em torno de 85 °C para gerar uma alta densidade do vapor atômico. Então, a luz de um laser VCSEL (*Vertical Cavity Surface Emitting laser*) passa através da célula sendo medida por um fotodetector (LUTWAK et al., 2004). A Figura 27 apresenta uma vista em corte em que é possível ver o laser, a lamina de polarização, os aquecedores das célula, a célula, o fotodetector, a Figura 27traz o sistema montado e a caixa de proteção térmica.

Figura 25: Estabilidade obtida com CPT e POP associados



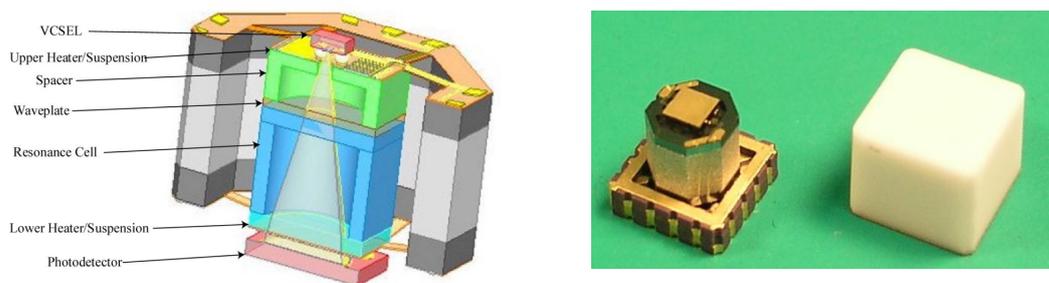
Fonte: Hafiz et al. (2017)

Figura 26: Franja obtida com CPT e POP associados



Fonte: [Hafiz et al. \(2017\)](#)

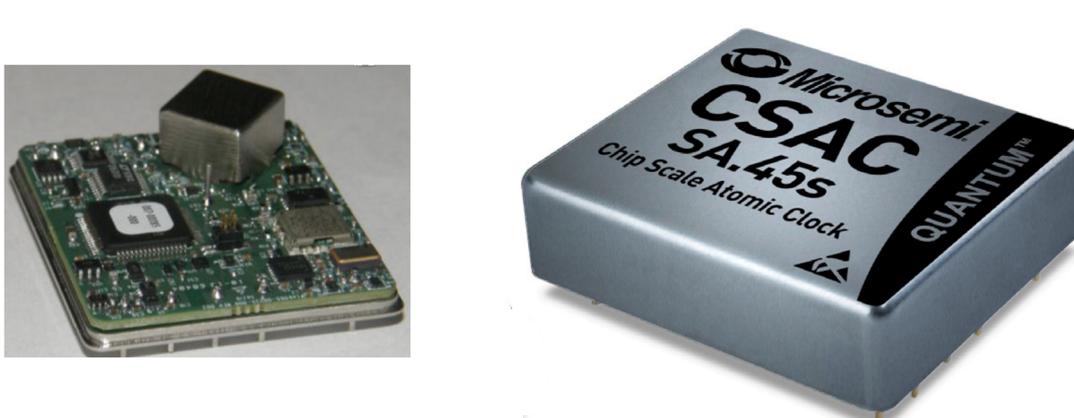
Figura 27: Montagem física do CSAC: vista em corte e estrutura



Fonte: [Lutwak \(2011\)](#)

A montagem é mantida em um polímero de alta resistência térmica e selada dentro de uma caixa de proteção cerâmica à vácuo, para eliminar trocas de calor no gás. Um oscilador a cristal de baixa potência com compensação de temperatura de 10 MHz serve de base para um sintetizador de microondas gerar o sinal de ressonância dos átomos de cério. O controle do sistema é realizado por meio de um controlador DSP (*Digital Signal Processor*) que sintetiza o sinal de 10 MHz e faz toda a interface do sistema ([LUTWAK et al., 2007](#)). A [Figura 28](#) apresenta o produto final obtido com o CSAC e a vista de sua PCB com a montagem do sistema em sua parte superior.

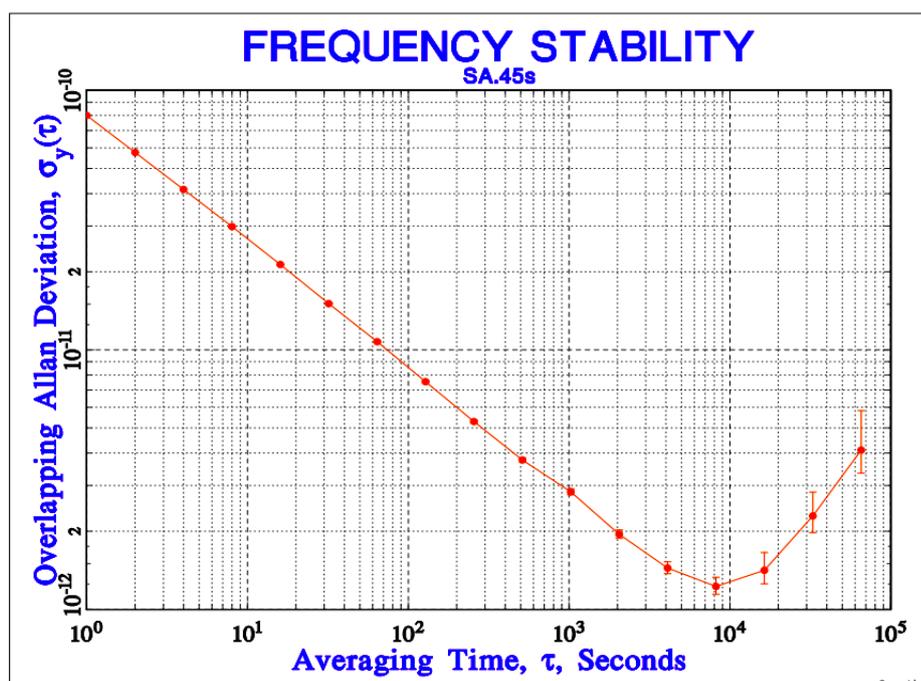
Figura 28: CSAC: placa de circuito impresso e sistema selado



Fonte: Lutwak (2011)

O sintetizador de microondas, bem como a sintonia do oscilador local e outros parâmetros chave estão sob o controle de um processador de sinal digital de baixa potência (DSP). Além de implementar o controle de frequência, a saída principal de 10 MHz e 1 PPS, o DSP mantém controles independentes para otimizar a temperatura de operação, a corrente de polarização do laser e o nível de potência do microondas. Uma interface de comunicação serial no DSP permite o controle externo do estado de operação, bem como monitoramento de parâmetros internos e alarmes (LUTWAK et al., 2005).

Figura 29: Curva de estabilidade CSAC



Fonte: Lutwak (2011)

As dimensões gerais do CSAC são 35,306 x 40,64 x 11,43 mm, pesando 35 g. Ele é alimentado a 3,3 VDC e normalmente consome <38 mA (125 mW). Sua estabilidade média para 1 segundo obtida foi de $\sigma_y = 8 \times 10^{-11}$ (LUTWAK, 2011). Para tempos maiores que 10000 segundos sua estabilidade é degradada devido a desvios sistemáticos na pressão do gás atômico e desvios de intensidade e frequência do laser. Apesar do baixo consumo e pequeno tamanho, o CSAC não é considerado um padrão de frequência preciso justamente por causa desse desvio de frequência, sua estabilidade em longos períodos fica limitada em 3×10^{-11} /mês após um período de seis meses. A Figura 29 apresenta a curva de estabilidade de desvio de Allan obtida com o CSAC.

Este nível de deriva faz CSAC inadequados para muitas aplicações, por exemplo, para uso como relógios de referência primária para sincronização de telecomunicações, que exigem precisão no nível de 1×10^{-11} em médios períodos. No CSAC, uma largura de linha de transição estreita é conseguida através de longos períodos de interação luz-átomo proporcionados por um gás compressor de alta pressão. Períodos de interação longos também podem ser realizados por meio de átomos arrefecidos a laser, que apesar de eliminar desvios devido a pressão na célula, reintroduzem desvios causados por efeito Doppler (ESNAULT et al., 2013).

2.5 Trabalhos e pesquisas desenvolvidos pelo CEPOF

Buscando reduzir o distanciamento tecnológico em metrologia científica de tempo e frequência e cooperar com os centros metrológicos nacionais, devido à importância que o estudo do método de medir o tempo possui nas áreas de navegação, telecomunicações, sincronização e demais áreas metrológicas, iniciou-se, por volta da primeira metade da década de 90, em São Carlos, um programa deste tipo para estreitar a diferença entre o Brasil e os países desenvolvidos, como os Estados Unidos, França e Alemanha.

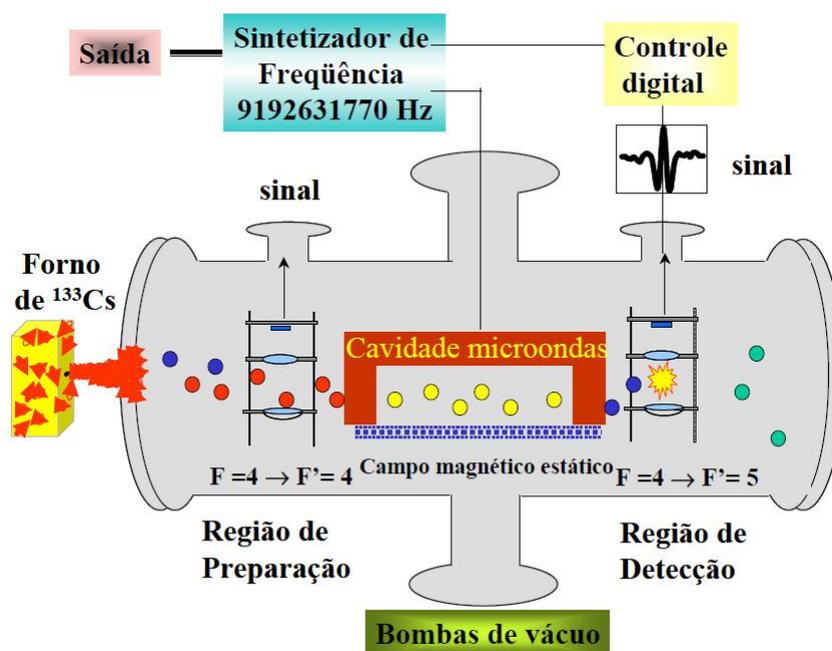
Este programa foi iniciado pelo Grupo de Ótica, hoje Centro de Pesquisas em Ótica e Fotônica (CePOF), pertencente ao Instituto de Física de São Carlos (IFSC), da Universidade de São Paulo (USP), que, atualmente, veem desenvolvendo, em conjunto com a Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), e firmou parceria com o Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO) para realizar contribuições para o BIPM (*Bureau International de Poids et Mesures*). O grupo de pesquisa possui relógio atômico tipo chafariz, relógio compacto com átomos frios em expansão, relógio de feixe térmico, relógios comerciais e equipamentos, como sistemas de GPS e contadores, para avaliação dos sinais experimentais.

O primeiro padrão de frequência desenvolvido foi um relógio de feixe efusivo, em que um feixe térmico de Césio é bombeado opticamente e sua probabilidade de transição também é detectada por meio de luz laser, obtendo seus primeiros resultados em 1998. Detalhes sobre sua construção e avaliações iniciais podem ser encontradas em (SILVA,

1998) e (SILVA, 2002). A avaliação detalhada, com o sistema otimizado, sobre sua precisão e exatidão são estudados com profundidade por (BEBEACHIBULI, 2003) e (TELES et al., 2002), assim como, o estudo dos efeitos físicos relacionados aos desvios.

O feixe atômico é gerado por um forno efusivo. Nele, os átomos emergem em dois estados quânticos, $F = 3$ e $F = 4$, seu estado fundamental. Ao saírem do forno, os átomos presentes no feixe são preparados opticamente por um feixe de laser, o bombeio óptico é realizado utilizando a ressonância com a transição $F = 4$ para $F' = 4$, que após alguns ciclos de interação acabam por decair quase todos para o estado $F = 3$ devido a transição cíclica, o feixe é ortogonal ao feixe atômico. Em suma, tem-se uma onda estacionária perpendicular aos átomos. O feixe laser é retro refletido formando uma onda estacionária a fim de evitar que os átomos sejam empurrados.

Figura 30: Ilustração esquemática do relógio de feixe efusivo com bombeamento óptico desenvolvido no CEPOF



Fonte: Bebeachibuli (2003)

Em seguida, o feixe de átomos passa por uma cavidade de interrogação que chamamos de cavidade de Ramsey. Este tipo de cavidade tem o formato de um U invertido, um tipo de cavidade diferente das usadas em chafarizes ou até mesmo no relógio compacto, tal que os átomos interagem duas vezes com a radiação oscilatória nas regiões separadas espacialmente. A cavidade é alimentada por um gerador de 9192631770 Hz. A Figura 30 apresenta uma ilustração esquemática do aparato experimental do relógio de feixe em que é possível notar o formato da cavidade.

A frequência injetada é modulada em torno do valor central da ressonância. Ao

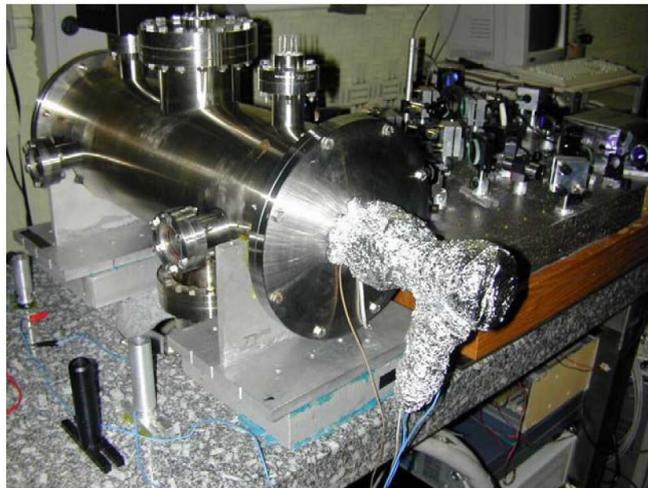
longo da cavidade, uma bobina gera o campo magnético estático, paralelo ao feixe atômico, necessário para definir o eixo de quantização dos átomos. O campo eletromagnético no interior da cavidade é perpendicular à direção de propagação atômica e paralela ao campo magnético estático.

Os átomos, então, entram na cavidade no estado $F = 3$ e podem sair dela, após as duas interações no estado $F = 4$. Cada uma das zonas de interação possuem 1 cm de comprimento sendo separadas por uma região livre de microondas de 10 cm de comprimento.

Após a passagem dos átomos pela cavidade de microondas, eles são detectados opticamente usando um segundo feixe de laser ressonante com a transição $F = 4$ para $F' = 5$. Um conjunto de lentes focaliza a fluorescência emitida pelos átomos sobre um fotodetector e envia o sinal da fluorescência para o computador.

O sinal obtido é função da frequência do sinal do gerador de microonda conhecido como franja de Ramsey. As franjas de Ramsey representam a probabilidade de transição entre os estados $F = 3$ e $F = 4$ com seus respectivos subníveis.

Figura 31: Relógio atômico de feixe montado nas dependências da USP São Carlos



Fonte: [Bebeachibuli \(2003\)](#)

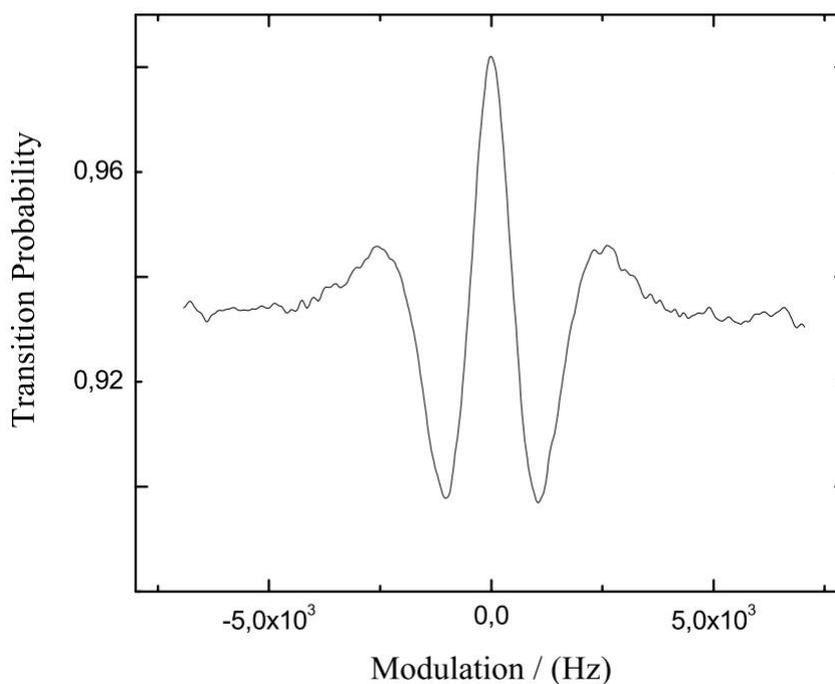
A probabilidade de transição é medida à esquerda e à direita na meia largura e meia altura da franja central. A diferença entre as duas medidas constitui um sinal de erro que é reinjetado no gerador de modo a manter a frequência no máximo da ressonância atômica. A cada nova interação o gerador é corrigido por um algoritmo de modo que o erro tende a ser minimizado.

A radiação de microondas que alimenta a cavidade é gerada por um sintetizador. O sistema de controle é implementado em ambiente LabView. Além disso, um sistema auxiliar, composto de um sistema GPS e um relógio atômico comercial e um contador permitem avaliar constantemente a performance dos experimentos. A [Figura 31](#) apresenta o corpo

físico do relógio a feixe térmico de césio. Suas dimensões são de 90 cm de comprimento e 20 cm de diâmetro pois trata-se de um cilindro, fora os periféricos necessário para sua operação como lasers e seus controladores, geradores de sinais e etc.

A técnica de interrogação de Ramsey é a base de um relógio atômico e a sua assinatura característica é um padrão de interferência, no caso de relógios a feixe térmico uma franja de Ramsey aparece sobreposta ao pedestal de Rabi. Esta interferência é um poderoso recurso de avaliação de desempenho, pois por meio dela é possível obter parâmetros, tal qual deslocamentos como o efeito Doppler de segunda ordem, o “*Cavity Pulling*”, o “*Rabi Pulling*” entre outros efeitos sistemáticos e que afetam diretamente a exatidão dos relógios (BEBEACHIBULI et al., 2005). A Figura 32 apresenta a franja de Ramsey obtida experimentalmente com o padrão de feixe, em que se observa uma boa simetria e relação sinal / ruído.

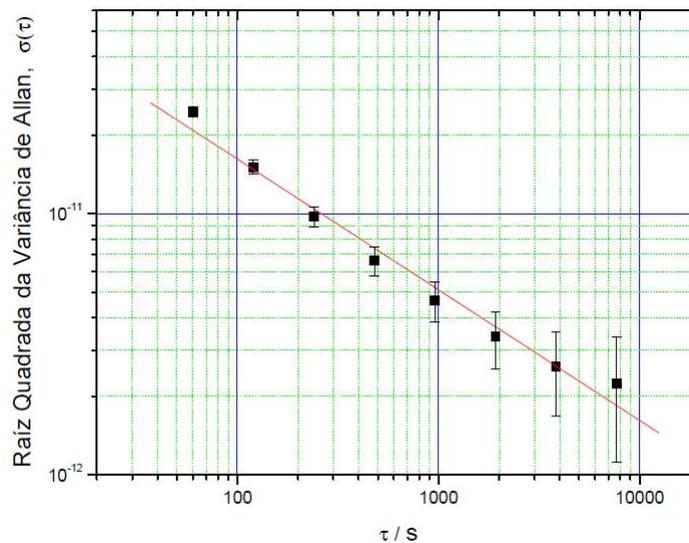
Figura 32: Franja de Ramsey obtida com o relógio de feixe



Fonte: Bebeachibuli et al. (2005)

A estabilidade ou precisão é um indicador do quão bem a franja de Ramsey é medida por um relógio. Como efeito, medidas de curto período apresentaram $\sigma_y = 1,8 \times 10^{-10} \tau^{-1/2}$. Através de uma integração de 10000 s foi obtido a estabilidade padrão de $\sigma_y = 2 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$. A caracterização realizada por Bebeachibuli (2003) com o relógio indica que a precisão com que a frequência de transição medida foi de $1,44 \times 10^{-12}$. A Figura 33 apresenta a curva típica obtida para estabilidade, através da última avaliação feita, após algumas mudanças e melhorias no sistema experimental.

Figura 33: Curva de estabilidade do relógio de feixe



Fonte: [Bebeachibuli \(2003\)](#)

Conforme já foi mencionado, o grupo possui vínculo formal por meio do setor de convênios da Universidade com o órgão de metrologia nacional INMETRO, visando o desenvolvimento de trabalhos experimentais de tempo e frequência em suas instalações, nesse sentido, o relógio de feixe efusivo foi transferido em 2013 de São Carlos para Xerém, no Rio de Janeiro, e encontra-se em fase de adaptação e reconfiguração ([AMARAL et al., 2016](#)).

Adiantando-se à formalidade, o grupo matém contato com pesquisadores do INMETRO e do Observatorio Nacional do Rio de Janeiro (mantenedor da hora legal brasileira) para experimentos de comparação remota e realização de projetos em conjunto visando a já em andamento contribuição brasileira de comparação de sinais para o BIPM ([JUNQUEIRA et al., 2012](#)).

Há alguns anos, o grupo de pesquisa iniciou a construção de um chafariz atômico de átomos de césio, tendo em vista sua aplicação como padrão primário de frequência para experimentos de física e o pioneirismo desta tecnologia desenvolvida no Brasil. Além disso, espera-se contribuir, conjuntamente com outros Chafarizes Atômicos experimentais espalhados pelo mundo, para a precisão da coordenada de Tempo Atômico Internacional (TAI). Apresentou-se, também, como um excelente laboratório para medições de grande precisão. Aliás, o contínuo desenvolvimento do limite de exatidão e estabilidade dos padrões atômicos de frequência visa principalmente à realização de experimentos no âmbito da física básica, já que excede em ordens de grandeza boa parte das necessidades tecnológicas atuais ([MAGALHÃES, 2004](#)).

O chafariz Atômico Brasileiro funciona, atualmente, da seguinte forma: primeira-

mente os átomos são aprisionados na câmara vácuo com uso de uma armadilha magneto-óptica (MOT), uma fase intermediária de melaço óptico permite atingir temperaturas abaixo do limite Doppler de resfriamento. Os átomos são, então, lançados no vôo balístico com outra técnica, denominada de melaço em movimento, e interrogados com dois pulsos separados na dupla passagem pela cavidade de microondas (LETT et al., 1988).

A detecção por tempo de vôo é feita por feixes horizontais. O feixe superior é travado na frequência relativa à transição dos estados $F = 4$ para $F' = 5$ e o feixe inferior têm luz nessa transição e na transição de rebombeio $F = 3$ para $F' = 4$. Desta forma, o feixe superior detecta a população no estado $F = 4$ e o inferior detectam todos os átomos, ou seja, $F = 3$ e $F = 4$. Obtemos então, a probabilidade de transição normalizada pelo número total de átomos dada pela equação 2.1.

$$P_{Ramsey} = \frac{N_{F=4}}{N_{F=3} + N_{F=4}} \quad (2.1)$$

Em que, $N_{F=3}$ e $N_{F=4}$ no cálculo acima, referem-se ao número de átomos no respectivo estado.

O aparato experimental consiste de um sistema de vácuo, uma mesa óptica, a cadeia de microondas e o sistema de controle.

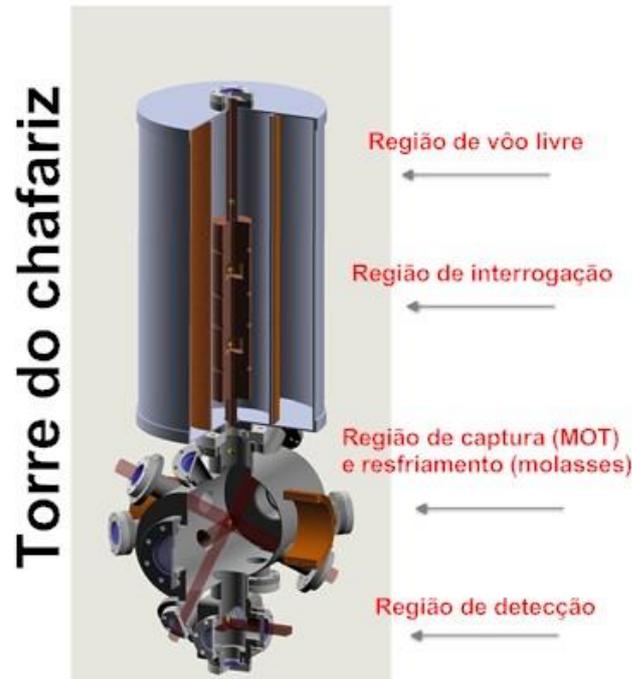
O sistema de vácuo é formado por uma câmara de aprisionamento, uma câmara de detecção, uma torre de interrogação, que contém duas cavidades de microondas. Uma dessas cavidades deve ser utilizada para a preparação dos átomos, e a outra para a interrogação de Ramsey. Ainda não está em uso a cavidade de preparação, porém é meta relativa a outro projeto em desenvolvimento. A Figura 34 apresenta a torre do chafariz atômico brasileiro em que é possível notar os diferentes seguimentos do experimento que a nuvem atômica atravessa durante as fases de seu ciclo de interrogação.

A mesa óptica consiste dos laser de aprisionamento, de detecção, e o de rebombeio. Além dos diversos componentes ópticos como: moduladores acústico-ópticos, lentes, e lâminas de onda, utilizados para preparar e controlar todos os feixes necessários à operação do experimento. Nela, os feixes são travados nas frequências atômicas, deslocadas em frequência por um certo valor, dependendo da função que irão exercer, e, depois, são transportados para o sistema de vácuo por fibras ópticas monomodo e mantenedoras de polarização. Apesar das perdas de acoplamento do sistema de fibras ($\geq 30\%$), elas funcionam como excelentes filtros espaciais, deixando o modo transversal dos feixes praticamente gaussianos.

A síntese de frequência de microondas é feita por uma cadeia baseada em um cristal de quartzo de baixo ruído (BVA). Este sistema foi construído pelo grupo de pesquisa, em colaboração com o grupo francês LNE-SYRTE (SANTOS; BAGNATO, 2002).

Para o controle do sistema, utilizamos um computador de bancada munido com

Figura 34: Torre do sistema de vácuo onde os átomos são lançados no chafariz



Fonte: [Pechoneri \(2013\)](#)

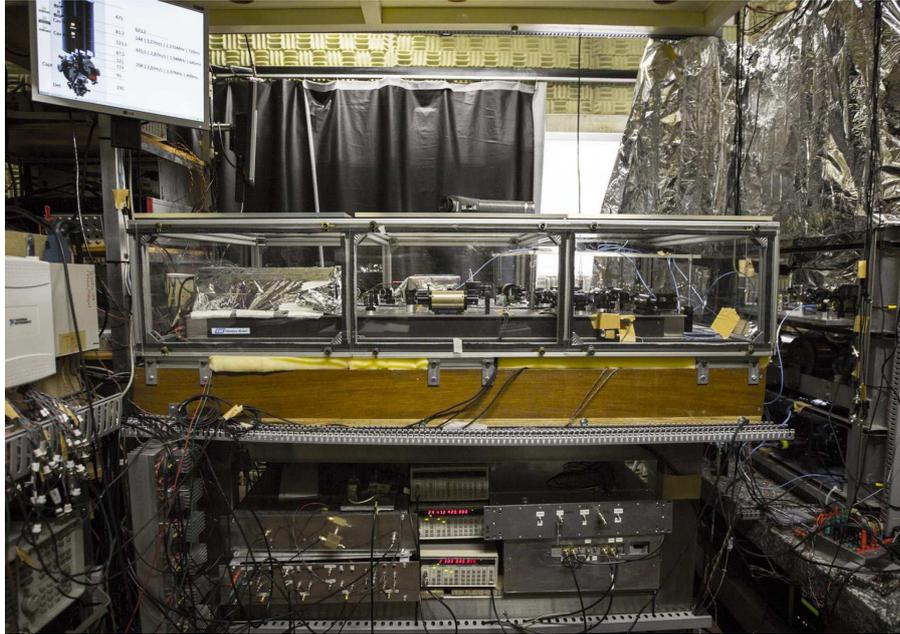
placa de aquisição de dados da National Instruments. O ambiente de desenvolvimento de aplicativo de controle usado é o LabView, por meio do computador são controladas e monitoradas diversas funções do experimento, como intensidade dos feixes de aprisionamento, sinal de fluorescência do sistema de detecção, nível de sinal de microondas enviado às cavidades, por exemplo ([PECHONERI, 2013](#)).

Atualmente, o sistema está sendo melhorado de modo a maximizar a relação sinal ruído que limita as medidas de estabilidade na ordem de 10^{-12} , ao invés de 10^{-13} como era esperado para integrações da ordem de 1 segundo ([RODRIGUEZ et al., 2016](#)). A [Figura 35](#) mostra como o laboratório do chafariz encontra-se atualmente configurado.

As principais etapas do ciclo de funcionamento do relógio chafariz detalhadas são:

1-Fase de aprisionamento e resfriamento (MOT): durante essa fase, os lasers de aprisionamento e rebombeio estão em máxima potência, sintonizados de acordo com o modo de aprisionamento utilizado, o laser de aprisionamento é travado na frequência de transição de $F = 4$ para $F' = 5$ e o de rebombeio de $F = 3$ para $F' = 4$, o laser de rebombeio é utilizado para recuperar os átomos de venham a decair para o nível $F = 3$ colocando-os de volta ao ciclo em um estado $F = 4$, também é acionado o campo eletromagnético proveniente das bobinas de MOT configurando a armadilha magneto-óptica. Essa fase para o chafariz dura em torno de 1 s. Ao final, a nuvem atômica apresenta em torno de $140\mu K$ para o MOT chegando $10\mu K$ com o melaço ótico.

Figura 35: Chafariz de átomos frios: sistema óptico de rádio frequência e controle



Fonte: próprio autor

2- Fase de melaço ótico (MOLASSES): ao final da fase de aprisionamento, adiciona-se uma fase de melaço para resfriar ainda mais a nuvem de átomos, desligando as bobinas de MOT e deslocando a frequência dos lasers linearmente para 2Γ abaixo da transição atômica, o termo Γ refere-se a largura de linha natural da transição atômica do átomo de Césio que é dada pelo inverso do tempo de vida no estado excitado, para o Césio o tempo de vida no estado excitado é $\tau = 39,473ns$.

Então, o termo normalizado para Hertz fica $\frac{\Gamma}{2\pi} = 5,215\text{ MHz}$, como temperatura dos átomos é proporcional à $T = \frac{I_{laser}}{\Delta\nu}$, em que I_{laser} é a potência de luz e $\Delta\nu$ o valor do desvio de frequência, atenua-se ligeiramente a intensidade dos feixes para manter os átomos frios. Essa fase dura em torno de 300 ms para o chafariz.

3- Fase de lançamento da nuvem atômica: esta fase é realizada apenas no chafariz. Os átomos são lançados para um vôo balístico através da cavidade, por meio de uma técnica conhecida como melaço em movimento, realizada deslocando simetricamente a frequência dos feixes superiores para um valor abaixo da frequência de ressonância e os feixes inferiores pouco acima, ou seja, são sintonizados em $2\Gamma \pm \Delta\nu$, essa fase dura em torno de $400\mu s$. A velocidade inicial dos átomos pode ser calculada por $V = 2\lambda\Delta\nu$, em que λ representa o comprimento de onda do Césio de $852nm$.

4- Fase de resfriamento sub Doppler no chafariz: esta fase adicional de resfriamento é inserida no processo do chafariz devido ao fato da nuvem aquecer um pouco no processo de lançamento vertical, por isso, no lançamento, é introduzida está fase que dura em torno de 2 ms. A frequência dos lasers é deslocada em torno de 8Γ abaixo da ressonância e a

potência é linearmente atenuada, com o chaveamento da RF aplicada aos moduladores e interrompendo por completo a luz dentro da câmara com o auxílio de obturadores mecânicos, após alguns milissegundos o feixe de rebombeio é interrompido também com outro obturador.

5- Fase de preparação dos átomos no relógio compacto: ao final da fase de resfriamento desliga-se o feixe de rebombeio 5 ms antes de desligar o feixe de resfriamento, isso é feito para preparar os átomos da nuvem no estado $F = 3$, os feixes são bloqueados por meio de uma atenuação de 40 dB nos moduladores e também com o obturador mecânico.

6- Fase de interrogação: no chafariz após o lançamento a nuvem de átomos segue em um vôo vertical através da cavidade de microondas atinge o ápice e cai, devido à gravidade, até a região de detecção passando novamente pela cavidade. Dessa forma, realizando a iteração de dupla zona de Ramsey, pois, acima da cavidade não há sinal de microondas. O sinal de microondas permanece constantemente ligado durante todo o ciclo de operação do chafariz, o controle aqui fica apenas aguardando, em torno de 500 ms, o final do vôo para disparar a próxima fase, tanto a potência, quanto a modulação do sinal de interrogação, são pré definidas no programa de controle.

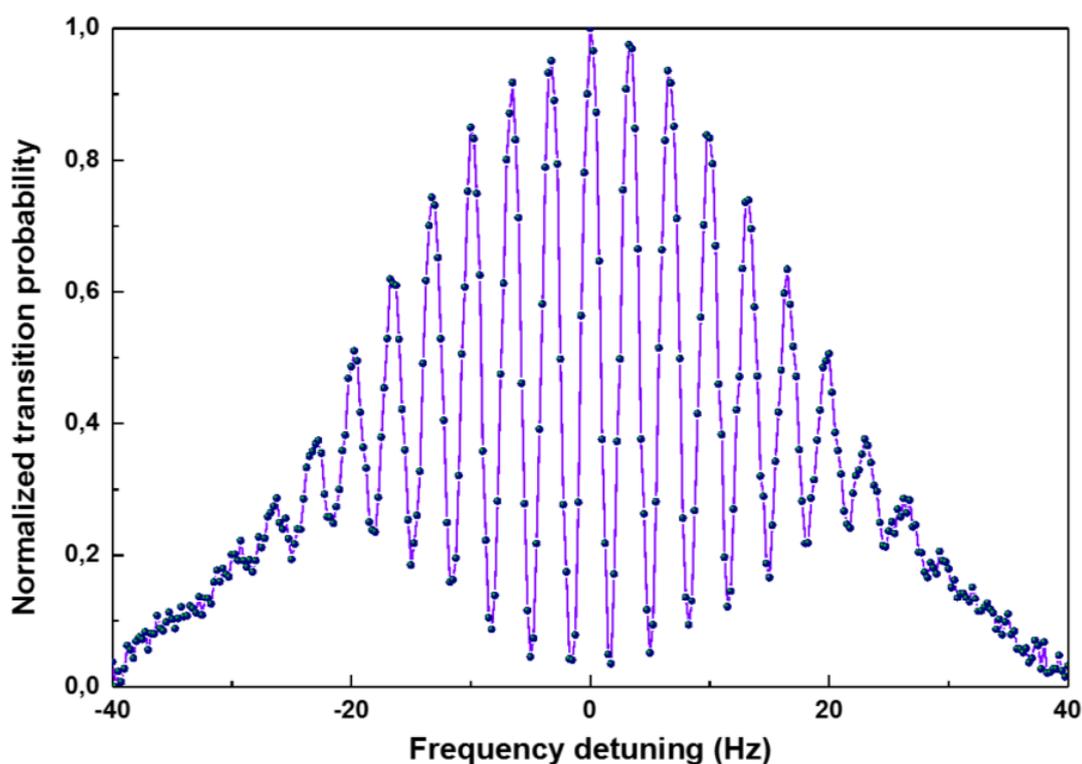
Se o sinal de microondas estiver na frequência de ressonância e com potência ideal os átomos irão de $F = 3$, $m_f = 0$ para $F = 4$, $m_f = 0$, no entanto nem toda amostra atômica encontra-se no sub nível Zeeman $m_f = 0$ e portanto não participam do processo de interrogação o que pode gerar uma degradação no sinal de resposta.

7- Fase de detecção: no chafariz após o vôo a nuvem continua caindo até a região de detecção, o sistema de controle dispara a aquisição de dados que adquire um dado número de amostras a uma taxa constante, ao cruzar o feixe de detecção, o sinal de fluorescência emitido pelos átomos é detectado com auxílio de um sistema óptico utilizando fotodetectores, o sinal é tratado e utilizado pelo software de controle para calcular a população em cada estado atômico, e com base nesse dado, determinar a eficiência da transição. Além disso, o sistema controla o tempo entre a aquisição de dados e o início do próximo ciclo.

8- Correção da cadeia de síntese de microondas: Com base nos dados adquiridos do sinal de fluorescência, o software realiza o devido tratamento matemático de análise do sinal, o ciclo é repetido varias vezes, varrendo com um valor fixo de passo de frequência definido dentro de um intervalo em que a frequência de interrogação se desloca em torno do valor de ressonância que é o sinal produzido pela síntese de microondas. Dessa forma, obtendo o sinal característico dos padrões de frequência conhecido como franjas de Ramsey, uma vez que o sinal esteja no pico de ressonância podemos travar o oscilador principal e escravizá-lo em um laço de frequência.

O sinal de erro gerado pelo programa é utilizado para calcular o quanto o sinal

Figura 36: Franja de Ramsey normalizada obtida no chafariz



Fonte: Rodriguez et al. (2016)

de microondas gerado está fora da ressonância e então é enviado o sinal de correção, por meio de comunicação digital a um sintetizador digital externo (*DDS- Direct Digital Synthesis*), que injeta na cadeia de microondas o sinal de modulação central que corrige sua frequência. Esses valores de erro, gerados a cada ciclo, também são armazenados para fornecer a medida de estabilidade relativa entre o sinal de interrogação dos átomos e sinal de referência externo que modula e trava a cadeia de microondas.

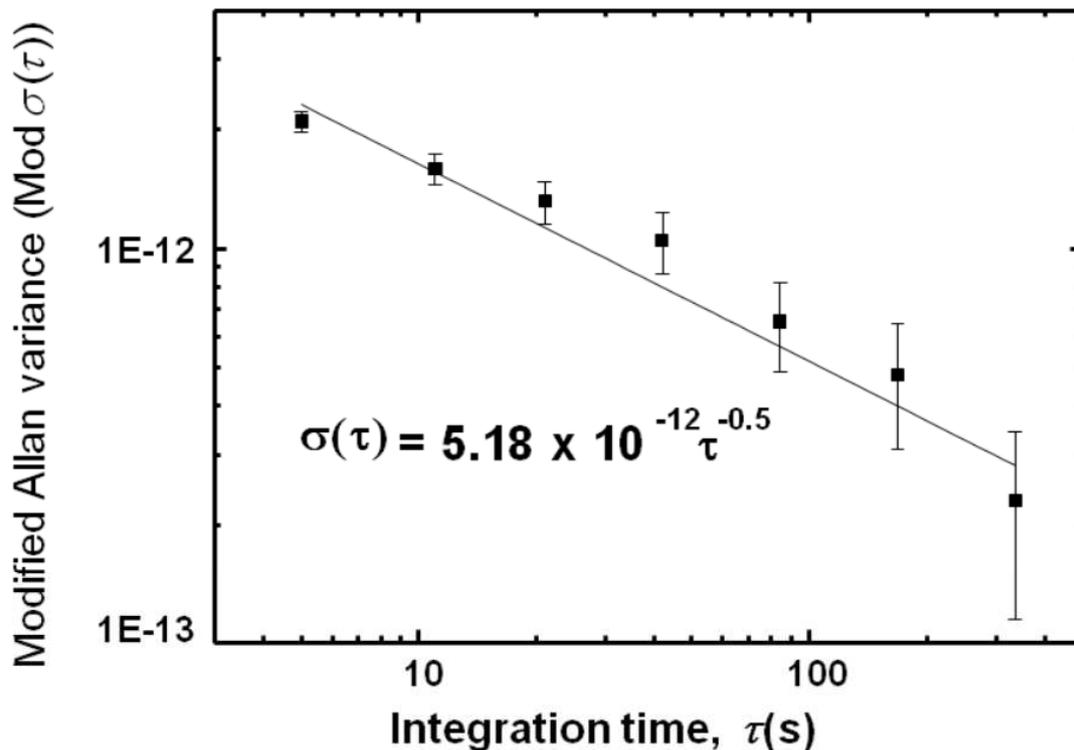
Todos os valores de tempo e desvios de frequência, assim como, quais dispositivos estão ligados ou não a cada momento do ciclo é redefinido pelo operador do relógio e dependem fortemente das condições ambientais do experimento, do comportamento das fontes de laser, dos acoplamentos de frequência que compõem as partes de alta e de baixa frequência da cadeia de microondas. Portanto, são variáveis controladas pelo programa de controle.

Algumas pequenas melhorias foram feitas no chafariz no estágio atual, focadas no sistema de controle, montagem ótica e sistema de detecção. Após, as mudanças foram obtidas franjas de Ramsey conforme apresentada pela Figura 36, com uma largura central à meia altura de 1,4 Hz e tempo de ciclo de 2 s e relação sinal ruído de 200.

A altura que os átomos passaram acima da cavidade de interrogação para essa

franja foi de 5.1 cm. A varredura em torno da ressonância de 9 GHz foi feita com 0,25 Hz. Outras franjas e melhorias estão sendo feitas no sistema na busca pela melhoria da estabilidade do sistema (RODRIGUEZ et al., 2016).

Figura 37: Curva de estabilidade



Fonte: Bebeachibuli (2007)

Atualmente o tempo de ciclo desse sistema sistema ainda é um pouco longo (por volta de 2 s , mas deveria ser da ordem de 1 s), podendo vir a ser um limite para a estabilidade, porém outros trabalhos estão sendo realizados focando nas melhorias necessárias para melhorar o desempenho de estabilidade do chafariz. A estabilidade do sistema foi medida, pode se observar conforme Figura 37, foi de $\sigma_y = 5,18 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ (BEBEACHIBULI, 2007).

Além dos experimentos de feixe térmico e chafariz atômicos de frequência, o grupo concentrou esforços no estudo e desenvolvimento de um padrão de frequência atômico compacto de átomos frios, cujo "know-how" atingido guiou as diretrizes para o desenvolvimento de um padrão de césio transportável utilizando a tecnologia de átomos frios. Esse relógio será estudado com detalhes no decorer do texto.

No relógio compacto, em síntese, os átomos são preparados e iniciam uma expansão livre no vácuo, são interrogados com a aplicação de dois pulsos do sinal de interrogação a 9192631770 Hz separados temporalmente, os pulsos são injetados durante 1 ms separados

por um intervalo de 8 ms, a fase toda dura 10 ms. Lembrando que, durante o processo de interrogação os feixes permanecem bloqueados para evitar desvios de frequência causados por luz espúria dentro da câmara. No relógio compacto o feixe utilizado para o aprisionamento é desbloqueado por 40 ms, assim, os átomos que fizeram a transição são bombeados opticamente para um estado $F' = 5$ e quando decaem espontaneamente o sistema detecta a fluorescência da emissão.

3 PADRÃO DE FREQUÊNCIA COMPACTO DE ÁTOMOS FRIOS

Este capítulo apresenta o padrão de frequência compacto de átomos frios desenvolvido pelo programa brasileiro de metrologia de tempo e frequência. Abordam-se seu princípio de funcionamento, eletrônica de instrumentação, configuração ótica, sistema mecânico, resultados obtidos em sua avaliação de performance e se discorre sobre a evolução alcançada na busca por padrões compactos de funcionamento simplificado e alto desempenho.

3.1 Visão geral sobre o padrão de frequência compacto

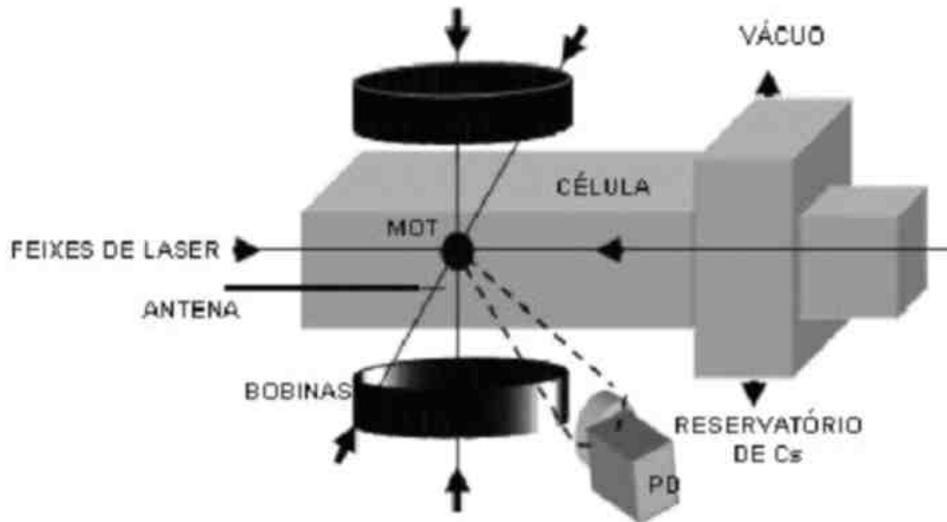
O desenvolvimento de padrões de frequência compactos, que possuam alternativas de método de operação simplificado, é uma investigação de particular interesse para manter em equilíbrio a relação entre tamanho total do aparato em volume e complexidade versus limitações de desempenho. Minimizar a quantidade de componentes para maximizar a compactação e tornar mais módico possível o sistema também são características desejáveis, uma vez que é almejado um dispositivo que venha se tornar um produto de mercado.

A ideia cerne de qualquer padrão atômico de frequência consiste em obter um dispositivo que seja capaz de extrair de uma amostra de átomos um sinal de referência de frequência baseado em suas transições de estado. Os relógios se distinguem em complexidade, tamanho, custo, técnica utilizada para interrogação da amostra, robustez, mobilidade, desempenho, entre outras características. A diversidade de possibilidades de implementação de um experimento de padrão de frequência permite o uso de diferentes espécies de átomos e técnicas de extração do sinal de referência.

Visando, sobretudo, a aplicação de um padrão de frequência o mais operacional possível, em meados dos anos 2000, foi iniciado a idealização e testes com uma nuvem de átomos frios em expansão utilizando uma célula de vidro em vácuo contendo vapor de Césio¹³³ (MULLER, 2005).

Nesta configuração inicial, uma nuvem contendo em torno de 10^8 átomos é aprisionada por meio de uma armadilha magneto óptica que, logo após o aprisionamento, entra em uma expansão livre. Durante a expansão, dentro da célula, o sinal de microondas na ressonância do Césio é aplicado por meio de uma antena acoplada à fonte geradora do sinal ressonante. Após interagirem com o campo, a eficiência da transição do segundo é detectada por fluorescência, a [Figura 38](#) apresenta o esquema da configuração do experimento (MÜLLER et al., 2008).

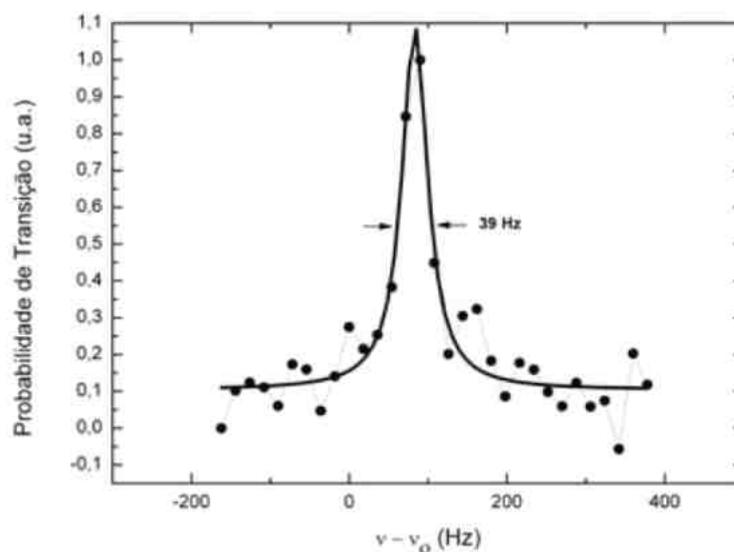
Figura 38: Esquema de funcionamento de um padrão de frequência baseado em uma nuvem de átomos frios em expansão em célula de vidro



Fonte: Müller et al. (2010)

Com este aparato, é possível obter uma ressonância da transição relógio com uma largura de linha de 39 Hz para um pulso de interrogação de 12 ms. A Figura 39 apresenta a largura de linha obtida na ressonância, utilizando o método de interrogação de Rabi, pois devido ao fato do uso da antena para aplicar os pulsos as franjas obtidas pelo método de Ramsey apresentaram baixo contraste.

Figura 39: Ressonância atômica da transição relógio obtida no padrão de átomos frios em expansão utilizando célula de vidro com método Rabi de interrogação

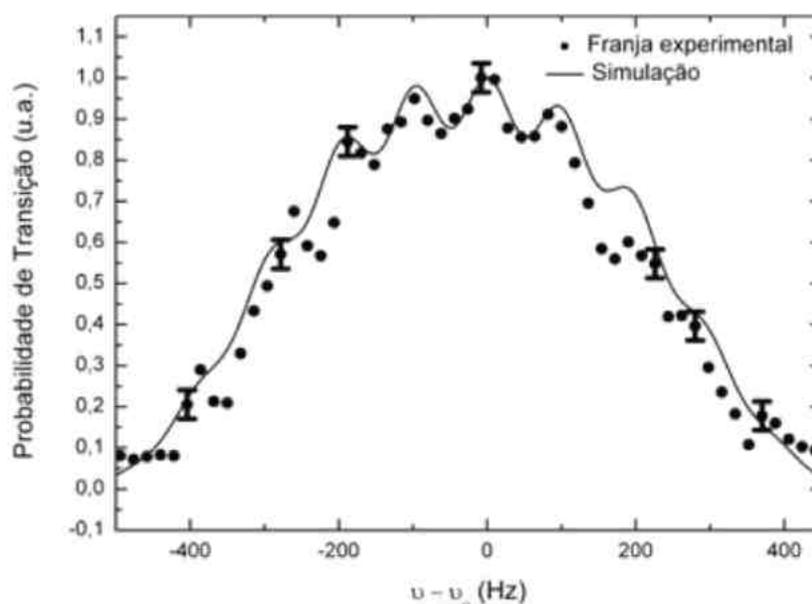


Fonte: Müller et al. (2010)

A [Figura 40](#) mostra o modelo simulado e dados de uma franja experimental obtida pelo método de Ramsey. A simulação levou em conta um modelo teórico cujo padrão de emissão de microondas da antena e a expansão da nuvem atômica foram considerados. Levando a conclusão que a falta de contraste observada nas franjas estavam relacionadas a distribuição não uniforme de amplitude entre os dois pulsos de interrogação que caracterizam o método de Ramsey ([AHMED et al., 2008](#)). Motivando a construção de uma cavidade de microondas esculpida dentro da câmara de vácuo, em que os átomos são aprisionados em seu centro, de maneira a minimizar efeitos de variações de fase e amplitude entre os pulsos de interrogação. Contudo, foi possível obter uma estabilidade ou precisão de $9,4 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ mostrada na [Figura 41](#) ([MÜLLER et al., 2010](#)).

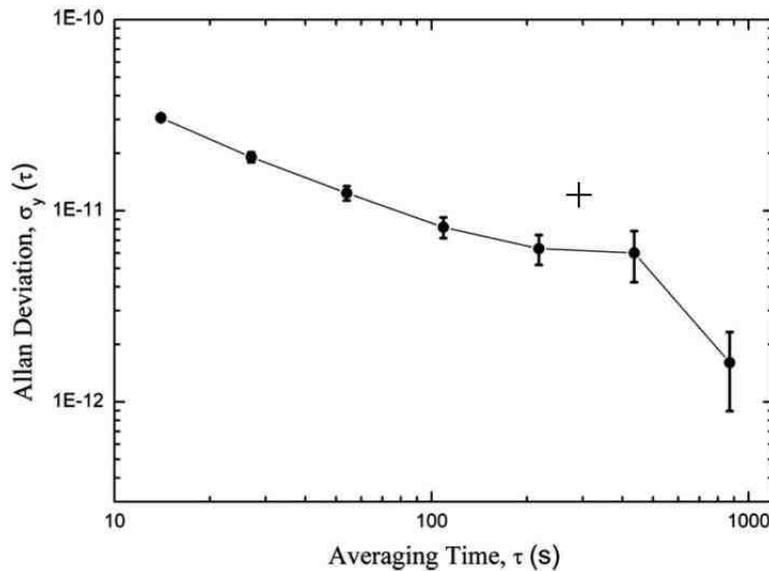
No padrão compacto, todas as etapas de seu ciclo de funcionamento são realizadas dentro da cavidade ressonante, esculpida dentro da câmara de vácuo, construída para estar sintonizada na frequência de ressonância do Césio. Com essa configuração de sistema, a nuvem atômica não necessita viajar a outras regiões dentro da câmara para efetuar o método de espectroscopia atômica de Ramsey, permitindo suceder o método em uma configuração puramente temporal, logo possibilitando uma redução no tamanho da câmara, quando comparado a padrões do tipo chafariz e feixe ([AHMED et al., 2008](#)).

Figura 40: Franja obtida com o uso de método de Ramsey mostrando a simulação e a ressonância atômica experimental da transição relógio



Fonte: [Müller et al. \(2010\)](#)

Figura 41: Desvio padrão de Allan para definição da precisão do padrão de átomos frios em expansão livre quando travado em um relógio comercial HP5071A



Fonte: Müller et al. (2008)

A distribuição de velocidades na amostra atômica é uma limitação nos padrões de frequência, tendo em vista que variações de velocidades levam a deslocamentos de frequência devidos a efeito Doppler (BEBEACHIBULI, 2003). Com o desenvolvimento de técnicas de resfriamento atômico, padrões de frequência utilizando átomos frios se tornaram realidade, um exemplo são os chafarizes de Césio que constituem hoje os relógios de melhor desempenho (BAUCH, 2003).

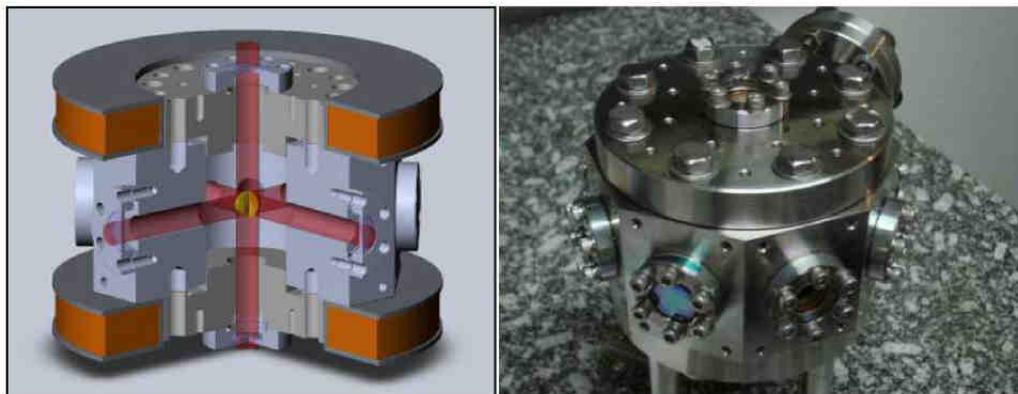
Logo, um padrão compacto com uso de átomos frios é altamente relevante para avanço na direção da obtenção de padrões de frequência com menores dimensões do aparato experimental e melhores características de performance.

O padrão compacto de átomos frios utiliza a vantagem da baixa distribuição de velocidades na amostra atômica, em que todas as etapas do processo de resfriamento são realizadas dentro da cavidade de forma temporal, para alcançar um estreitamento na largura de linha do sinal obtido, dessa forma, obtendo uma configuração simplificada de relógio com melhores condições de sinal.

A Figura 42 apresenta a configuração da câmara de vácuo onde a cavidade de microondas está esculpida, o sistema montado tem aproximadamente 10 cm de diâmetro. Pode-se observar a configuração da armadilha magneto óptica, com três feixes laser compostos por laser de armadilhamento (mestre) e rebombeio e as bobinas de campo. No interior da cavidade, os átomos são preparados em um estado, posteriormente experimentam o campo de microondas e, no final do processo, o laser é ligado novamente para detectar a

transição entre os estados realizada pela nuvem atômica em expansão.

Figura 42: Câmara de vácuo vista em corte e montagem real



Fonte: adaptada de Muller (2010)

Para o desenvolvimento da cavidade cilíndrica de microondas, inicialmente, foram realizadas simulações numéricas levando em conta uma distribuição de Boltzmann e a interação dos átomos presentes na nuvem dentro da cavidade com o campo de microondas ressonante com a frequência de 9 GHz da transição entre os estados do Césio para analisar a expansão.

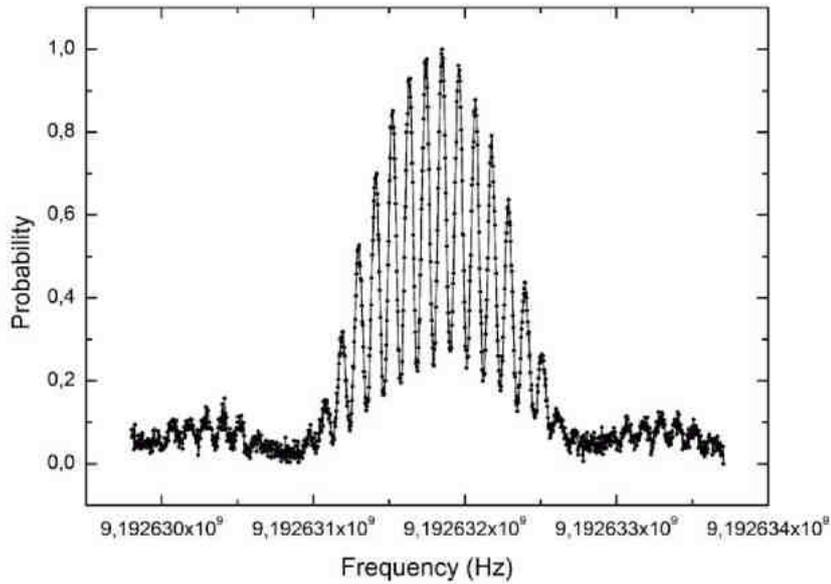
Com o resultado desta simulação, observou-se uma perda no contraste das franjas de Ramsey atribuída ao fato da nuvem se encontrar em livre expansão dentro da cavidade no momento de interação com os pulsos de microondas.

A nuvem atômica não possui uma distribuição uniforme de densidade, consequentemente, quantidades diferentes de átomos interagem com o campo durante a expansão. Experimentando mudanças de amplitude, a cada localização diferente a qual os átomos assumem, ao longo da cavidade durante a expansão, enquanto o método de interrogação é implementado.

A Figura 43 expõe os resultados experimentais obtidos com a varredura do sinal de ressonância, os dados experimentais estão ajustados sobre a curva teórica e apresenta uma boa concordância com o modelo teórico calculado nas simulações. Em que a franja central obtida apresentou largura de (47 ± 5) Hz, utilizando método de Ramsey com pulsos de microondas de 1ms de duração espaçados temporalmente por 8 ms e fazendo uma média entre cinco medidas para cada ponto experimental.

Detalhes da franja de ressonância central com sua largura à meia altura são mostrados na Figura 44, esta franja foi obtida com a cadeia de microondas travada em fase com o sinal de 10 MHz de saída vindo de um MASER de Hidrogênio (CH1-75A). Uma vez travados as correções de frequência são introduzidas e registradas por computador,

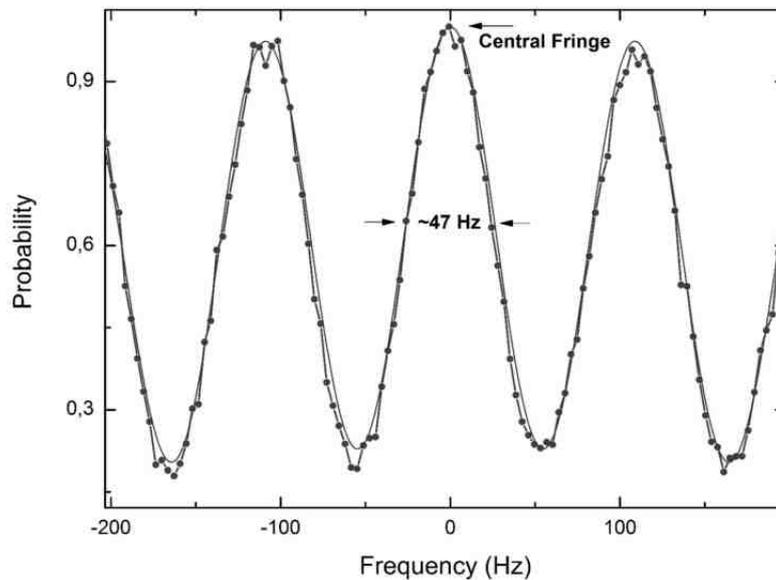
Figura 43: Ressonância observada para transição relógio utilizando pulsos Ramsey de 1 ms separados por 8 ms.



Fonte: Muller et al. (2011a)

que por meio de algoritmo dedicado, mantém o sinal de interrogação sempre no pico da ressonância.

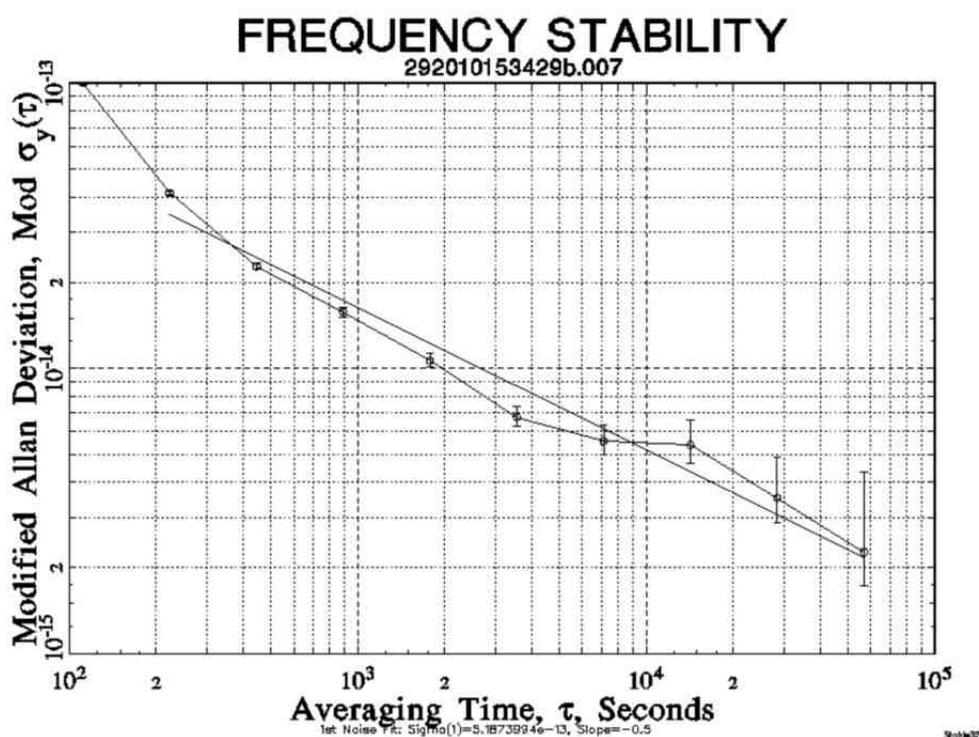
Figura 44: Pontos da varredura experimental ajustados sobre a franja simulada no pico da ressonância com 47 Hz de largura à meia altura



Fonte: Muller et al. (2011b)

Estabilidade de $\sigma_y(\tau) = 5 \pm 0.5 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ após um tempo de iteração de 100 segundos apresentada pela [Figura 45](#) foi atingida. Demonstrando que o uso de átomos frios em uma configuração compacta de experimento pode alcançar patamares de desempenho melhores que relógios de feixe comerciais que apresentam estabilidade de curto período na ordem de 10^{-11} a 10^{-12} , tipicamente ([BEBEACHIBULI, 2003](#)).

Figura 45: Desvio padrão de Allan do sistema compacto quando a franja central está travada ao sinal do MASER



Fonte: [Muller et al. \(2011b\)](#)

Os resultados obtidos com os experimentos mostram o quão promissor é o emprego do uso de átomos frios em padrões de frequência com complexidade e tamanho reduzidos. O conhecimento teórico e experimental adquirido com esse desenvolvimento é agora empregado visando um padrão de frequência atômico transportável que mantenha os mesmos níveis de precisão e exatidão obtidos com configuração compacta do aparato experimental conforme descrito neste trabalho.

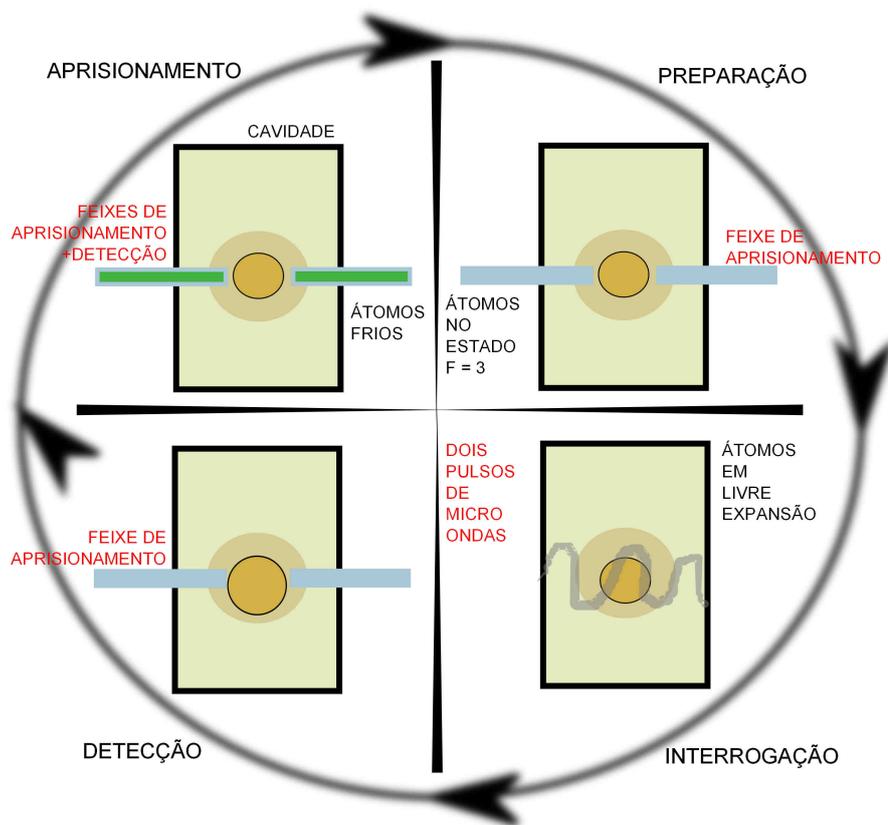
3.2 Princípio de funcionamento e operação cíclica

Um padrão de frequência de átomos frios funciona obedecendo a etapas de um ciclo que implementa métodos de interrogar e obter o sinal da transição que define o segundo. O relógio compacto possui quatro fases em sua operação sendo elas: aprisionamento e resfriamento, preparação, interrogação e detecção, utilizando como método de interrogação atômica a espectroscopia magnética nuclear de Ramsey dos campos separados descrita

em [RAMSEY \(1950\)](#) e [Vanier e Audoin \(1989\)](#). Todas as fases do experimento acontecem dentro da cavidade esculpida dentro da câmara de vácuo.

Além disso, todas essas etapas são realizadas de forma síncrona, pois cada uma delas tem certo intervalo de tempo para ocorrer. A [Figura 46](#) apresenta as fases do ciclo atômico utilizado para interrogação dos átomos de Césio no relógio atômico compacto.

Figura 46: Sequência do ciclo atômico utilizado no relógio atômico compacto



Fonte:próprio autor

Para as fases de aprisionamento e resfriamento, os átomos são capturados e resfriados em uma armadilha magneto-óptica. Após a captura, o feixe de rebombeio é desligado colocando a amostra atômica no estado desejado, a frequência dos feixes de laser de aprisionamento é controlada, assim como sua potência, para atingir temperaturas de dezenas de microkelvins em uma configuração de melado óptico. Maiores detalhes sobre esses processos podem ser consultados em [Cohen-Tannoudji e Phillips \(1990\)](#) e [Phillips \(1998a\)](#) e [Phillips et al. \(1991\)](#) e [Raab et al. \(1987\)](#).

Esta parte do processo é controlada por meio de sinais analógicos de tensão que

realizam os desvios de frequência, utilizando moduladores acusto-ópticos (*AOM- acousto-optic modulator*), ao final desta etapa os feixes são totalmente atenuados dentro da câmara com uso dos moduladores e com auxílio de obturadores mecânicos que são acionados por sinais digitais.

Na fase de captura, em que os átomos são aprisionados, temos também a presença do campo magnético utilizado na armadilha magneto-óptica, gerado por duas bobinas que são acionadas por um sinal digital e se localizam na parte inferior e superior da câmara de vácuo, de modo a gerar um campo magnético no eixo z. Em seguida, os feixes de laser utilizados na armadilha e as bobinas são desligados e os átomos preparados no estado $F=3$ iniciam a livre expansão.

A nuvem formada pelos átomos frios é exposta a um campo eletromagnético proveniente da síntese de microondas com a frequência de 9192631770 Hz, aplicado em dois pulsos separados temporalmente, que alimenta a cavidade ressonante e realiza a interrogação da transição relógio.

Então, ao final, os átomos que interagiram com o campo têm sua probabilidade de transição detectada, sincronizadamente por meio de um sinal de fluorescência de resposta coletado por fotodetectores conectados a entradas analógicas. O que permite a avaliação em tempo real do sistema como um todo analisando a diferença entre a frequência do sinal de interrogação e a transição do Césio que caracteriza o segundo ([MAGALHÃES, 2004](#)).

Todos os valores de tempo e desvios de frequência, assim como, quais dispositivos estão ligados ou não a cada momento do ciclo é redefinido pelo operador do relógio e dependem fortemente das condições ambientais do experimento, do comportamento das fontes de laser, dos acoplamentos de frequência que compõem as partes de alta e de baixa frequência da cadeia de microondas.

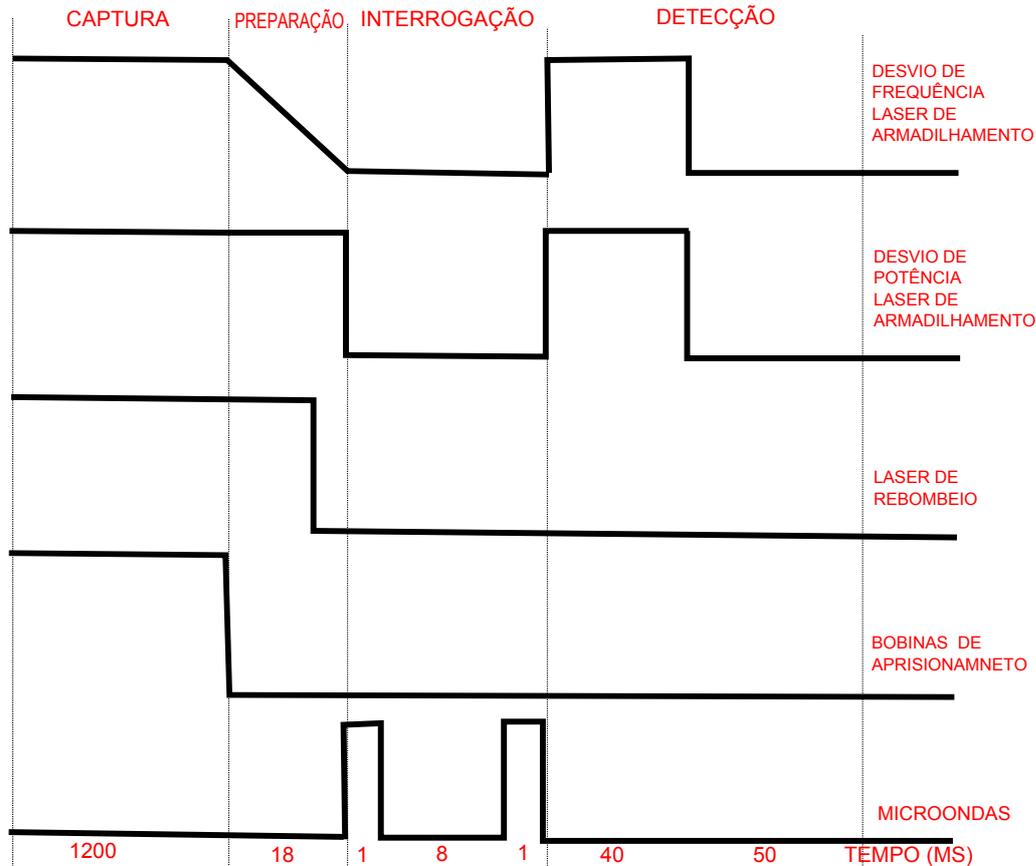
A [Figura 47](#) traz os principais sinais envolvidos no processo de operação cíclica, em que pode-se visualizar o chaveamento da bobina de MOT, desvio de frequência, interrupção da intensidade dos feixes, aplicação dos pulsos de sinal de interrogação e aquisição de sinal de fluorescência.

Nota-se, também, que o sinal de interrogação é aplicado utilizando de uma chave de RF que injeta os pulsos separados temporalmente para executar o método de interrogação de Ramsey em sua configuração temporal. A execução da sequência temporal de funcionamento cíclico para os padrões atômicos é de extrema importância para garantir o sincronismo do experimento.

As principais etapas do ciclo de funcionamento do padrão de frequência atômico compacto são:

1-Fase de aprisionamento e resfriamento (MOT): durante essa fase o laser de aprisionamento que é injetado num amplificador óptico do tipo MOPA (*Master Oscillator*

Figura 47: Fases do ciclo de operação do relógio compacto e seus principais sinais



Fonte: próprio autor

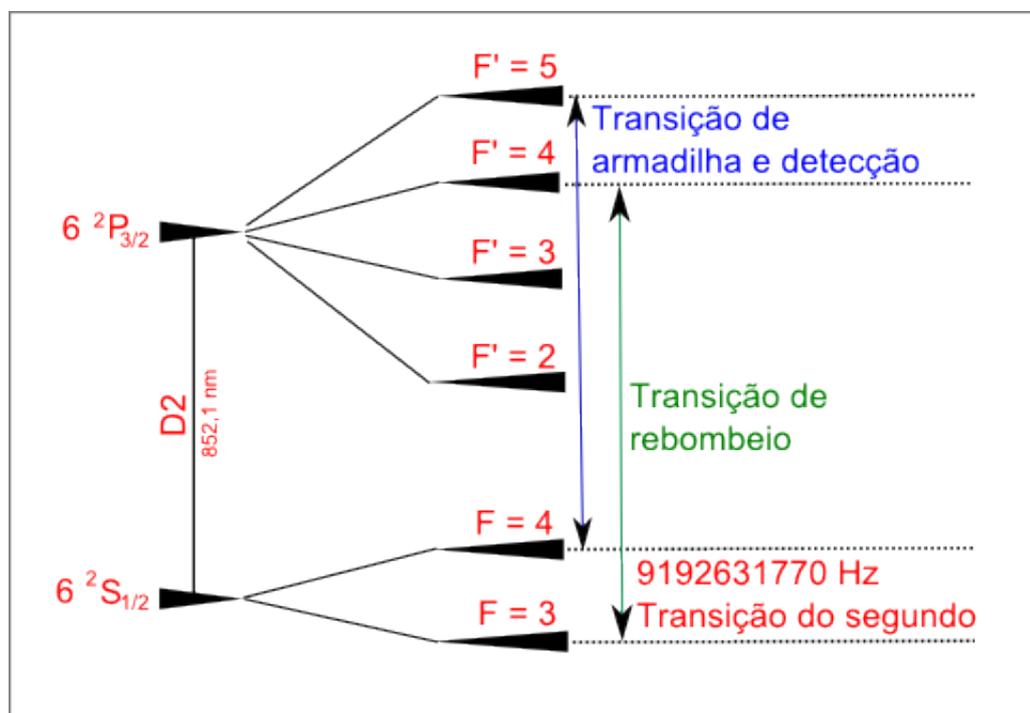
Power Amplifier) e rebombeio, que não precisa de amplificação, estão em máxima potência, sintonizados de acordo com o modo de aprisionamento utilizado, o laser de aprisionamento é travado na frequência de transição de $F = 4$ para $F' = 5$ e o de rebombeio de $F = 3$ para $F' = 4$, o laser de rebombeio é utilizado para recuperar os átomos de venham a decair para o nível $F = 3$ colocando-os de volta ao ciclo em um estado $F = 4$.

Ambos os lasers são travados por um sistema de célula de absorção saturada, usada como método de referência de frequência, observando-se o perfil Doppler da linha D_2 do átomo de Césio, também é acionado o campo eletromagnético proveniente das bobinas de MOT configurando a armadilha magneto – óptica, em que os feixes da armadilha se encontram dentro da câmara de vácuo em um ponto onde coincidem com o zero do gradiente de campo magnético das bobinas de MOT.

Essa fase dura em torno de 1,2 s e, ao final, a nuvem atômica encontra-se em torno de $140\mu\text{K}$ para o MOT chegando $10\mu\text{K}$ com o molasses. A Figura 48 traz o diagrama de níveis de energia do Césio 133 e ajuda a elucidar a explanação sobre as frequências utilizadas no processo de operação do relógio.

2- Fase de melaço ótico (MOLASSES): ao final da fase de aprisionamento adiciona-

Figura 48: Diagrama de níveis de energia do Césio mostrando os níveis hiperfinos e as transições de resfriamento e detecção, rebombeio e a transição relógio utilizadas no processo de interrogação



Fonte: próprio autor

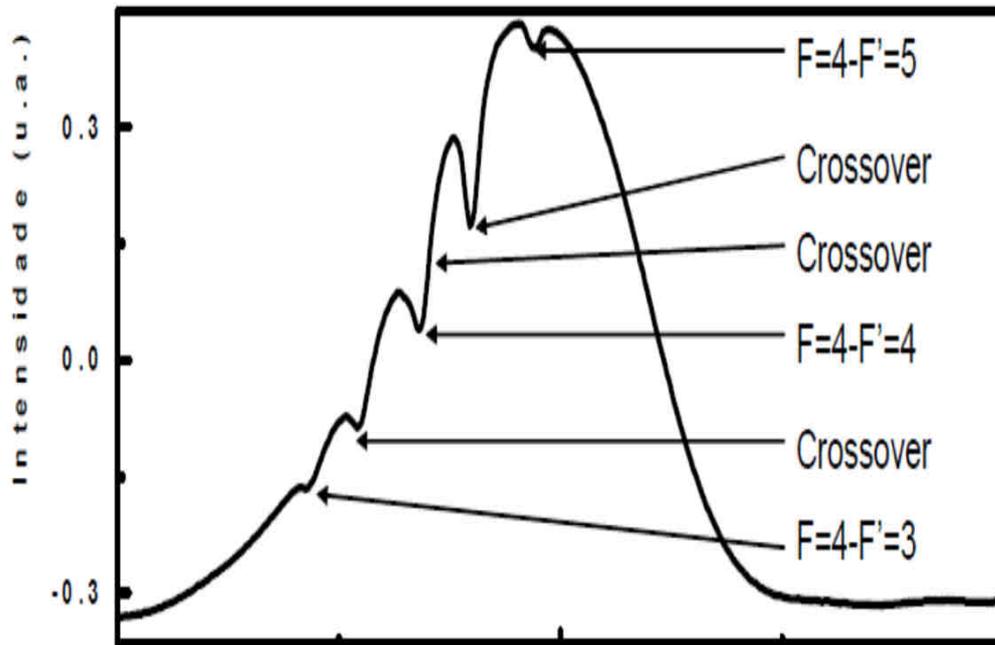
se uma fase de melço para resfriar ainda mais a nuvem de átomos, desligando as bobinas de MOT e deslocando a frequência dos lasers linearmente de Γ para 2Γ abaixo da transição atômica, o termo Γ refere-se a largura de linha natural da transição atômica do átomo de Césio que é dada pelo inverso do tempo de vida no estado excitado, para o Césio, o tempo de vida no estado excitado é $\tau = 39,473ns$.

Então, o termo Γ normalizado para Hertz fica $\frac{\Gamma}{2\pi} = 5,215$ MHz, como temperatura dos átomos é proporcional à $T = \frac{I_{laser}}{\Delta\nu}$, em que I_{laser} é a potência de luz e $\Delta\nu$ o valor do desvio de frequência, atenua-se ligeiramente a intensidade dos feixes para manter os átomos frios.

Essa fase dura em torno de 13 ms, este desvio é realizado utilizando um modulador acústico óptico de 125 MHz configurado como dupla passagem. Portanto, a frequência do laser de aprisionamento fica deslocada 246 MHz acima da frequência do *crossover* (uma intersecção entre duas transições) entre as transições $F = 4$ para $F' = 5$ e $F = 4$ para $F' = 4$.

Servindo como referência para absorção saturada do laser de aprisionamento, que possui um deslocamento de 125,5 MHz acima da frequência atômica de $F = 4$ para $F' = 5$. A Figura 49 mostra o perfil de absorção saturada para o átomo de Césio em que podemos ver as frequências utilizadas nos processos e os *crossovers* entre cada uma delas.

Figura 49: Perfil Doppler de uma absorção saturada do átomo de Césio



Fonte: [Alves \(2012\)](#)

Os átomos no relógio compacto são bombeados opticamente para um estado específico antes de iniciar a interrogação com a frequência relógio, ao final da fase de resfriamento desliga-se o feixe de rebombeio 5 ms antes de desligar o feixe de resfriamento, isso é feito para preparar os átomos da nuvem no estado $F = 3$. Após, os feixes são bloqueados por meio de uma atenuação de 40 dB nos moduladores e também com o obturador mecânico.

3- Fase de interrogação: os átomos que foram preparados iniciam uma expansão livre no vácuo, os átomos são interrogados com a aplicação de dois pulsos do sinal de interrogação na faixa de microondas, separados temporalmente, os pulsos são injetados durante 1 ms separados por um intervalo de 8 ms, a fase toda dura 10 ms.

Lembrando que durante o processo de interrogação, os feixes encontram-se bloqueados para evitar desvios de frequência causados por luz espúria dentro da câmara, esse sinal de microondas sintonizado na transição relógio é proveniente de uma síntese baseada em três osciladores de alta pureza espectral e alta precisão com valores nominais de 5 MHz, 100 MHz e 10,7 MHz, corrigidos por um sintetizador direto que se comunica com o sistema de controle por meio de comunicação RS 488 (GPIB), fechando a malha.

A frequência do sinal relógio é obtida filtrando-se o décimo oitavo harmônico de

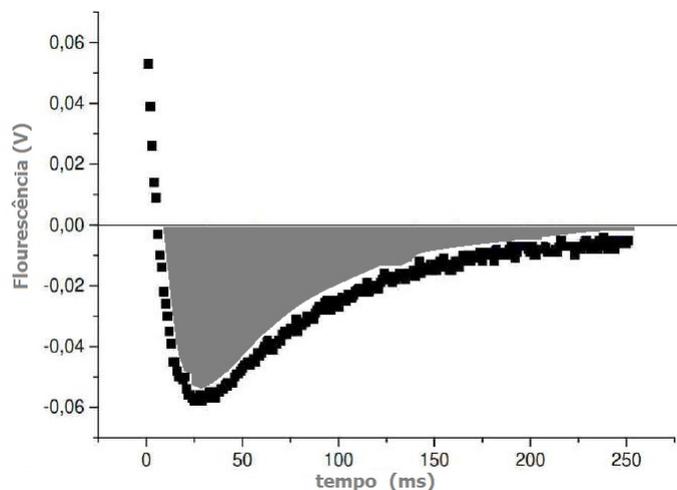
um sinal de 500 MHz obtido por meio da manipulação do sinal de referência entregue por esses osciladores. Este sistema nos fornece o sinal de referência atômica de saída do padrão passivo.

4- Fase de detecção: ao final da interrogação os átomos interagem com o feixe de detecção que faz com que os átomos emitam sua fluorescência. O sinal de fluorescência dos átomos é captado por fotodetectores associados a um conjunto óptico que permite focar a luz emitida pela nuvem no ponto central dos sensores, a transição usada para o feixe de detecção é $F = 4$ para $F' = 5$, a mesma frequência de aprisionamento.

O feixe utilizado para o aprisionamento é desbloqueado por 40 ms, assim, os átomos que fizeram a transição são bombeados opticamente para um estado $F' = 5$ e quando decaem espontaneamente para o estado $F = 3$, o sinal entregue pelo fotodetector é lido através de uma entrada analógica da placa de aquisição, com uma taxa fixa, e o software de controle calcula a eficiência da transição por meio da integral do sinal obtido.

Portanto, tem-se um sinal de fluorescência, como apresentado pela [Figura 50](#). Em que a integral da área sob o gráfico é proporcional ao número de átomos que experimentaram a transição, pois, antes da interrogação a amostra atômica foi preparada no estado $F = 3$.

Figura 50: Sinal de fluorescência típico, em que a integral da área é proporcional ao número de átomos



Fonte: próprio autor

A correção da cadeia de síntese de microondas ocorre com base nos dados adquiridos do sinal de fluorescência. Primeiramente, realiza-se o ciclo obtendo o sinal de fluorescência, com devido tratamento matemático de análise do sinal da resposta atômica. Calcula-se a probabilidade de transição para cada $\Delta\nu$ ajustado na síntese de microondas em torno da ressonância do Césio.

O ciclo é repetido varias vezes, varrendo com um valor fixo de passo de frequência, um intervalo definido próximo a frequência de ressonância. Sinal esse produzido pela síntese

de microondas. Dessa forma, obtendo o sinal característico dos padrões de frequência conhecido como franjas de Ramsey, uma vez que o sinal esteja no pico de ressonância pode-se travar o oscilador principal e escravizá-lo em um laço de frequência.

A cada ciclo completo é gerado um ponto da franja, assim, buscando-se encontrar o melhor sinal, que ocorre quando a potência de microondas está com um valor adequado e os osciladores principais que geram a transição relógio estão de fato em ressonância com a amostra atômica.

O sinal de erro gerado pelo programa é utilizado para calcular o quanto o sinal de microondas gerado está fora da ressonância obtendo um sinal para a correção, que por meio de comunicação digital é enviado a um sintetizador digital externo (*DDS- Direct Digital Synthesis*) que injeta na cadeia de microondas o sinal de modulação central que corrige sua frequência. Esses valores de erro, gerados a cada ciclo, também são armazenados para fornecer a medida de precisão relativa entre o sinal de interrogação dos átomos e um sinal de referência externo que modula e trava a cadeia de microondas.

Uma vez que o oscilador está ressonante com a transição de 9192631770 Hz, a escravização dos osciladores da cadeia de microondas torna-se factível, habilitando a operação com o experimento travado em um laço de frequência que mantém o sinal sempre ressonante completando seu trabalho e funcionando como um padrão de frequência.

Maiores detalhes sobre as sequências de operação e detalhes do funcionamento de cada padrão podem ser consultados em [Alves \(2012\)](#) e [Bebeachibuli \(2007\)](#) e [Alves et al. \(2009\)](#) e [Magalhães \(2004\)](#) e [Muller \(2010\)](#) e [Müller et al. \(2008\)](#) e [Junior \(2013\)](#) e [Otoboni \(2013\)](#) e [Pechoneri \(2013\)](#). Assim como, resultados experimentais obtidos durante os períodos em que os trabalhos foram escritos.

3.3 Configuração opto-mecânica

Em padrões de átomos frios, é necessário manipular os átomos enquanto se realiza as fases do processo ciclico de funcionamento. O objetivo da manipulação óptica dos átomos é obter uma nuvem de átomos com temperaturas em torno das dezenas de microkelvins ou abaixo disso.

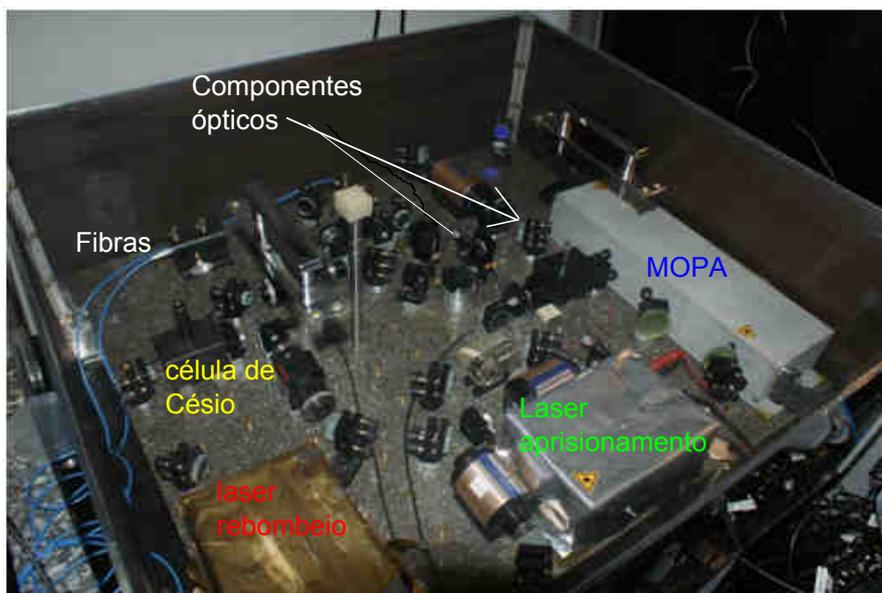
Patamares mais baixos de temperatura, tanto quanto possível, é indispensável no relógio compacto. Pois, minimiza a expansão da nuvem durante as fases de interrogação e detecção. Conseqüentemente, diminuindo a largura de linha a meia altura da franja central ([MULLER, 2010](#)).

Todo o conjunto opto-mecânico é montado disposto sobre uma mesa de granito com isolamento mecânica passiva e proteção térmica, proporcionando à montagem proteção contra vibrações e variações bruscas de temperatura. Os feixes de laser são mantidos a 35 mm de altura com relação à superfície da mesa com intuito de melhorar a estabilidade e

simplicidade dos componentes opto-mecânicos.

Os feixes lasers são tratados opticamente, travados na referência da linha atômica desejada, passam por moduladores acústico-ópticos e finalmente são acoplados em fibra óptica que os levam até a câmara de vácuo em que manipulam a amostra de césio. A foto da [Figura 51](#) mostra a disposição dos elementos opto-mecânicos sobre a mesa.

Figura 51: Visualização geral da mesa óptica e seus principais componentes



Fonte: próprio autor

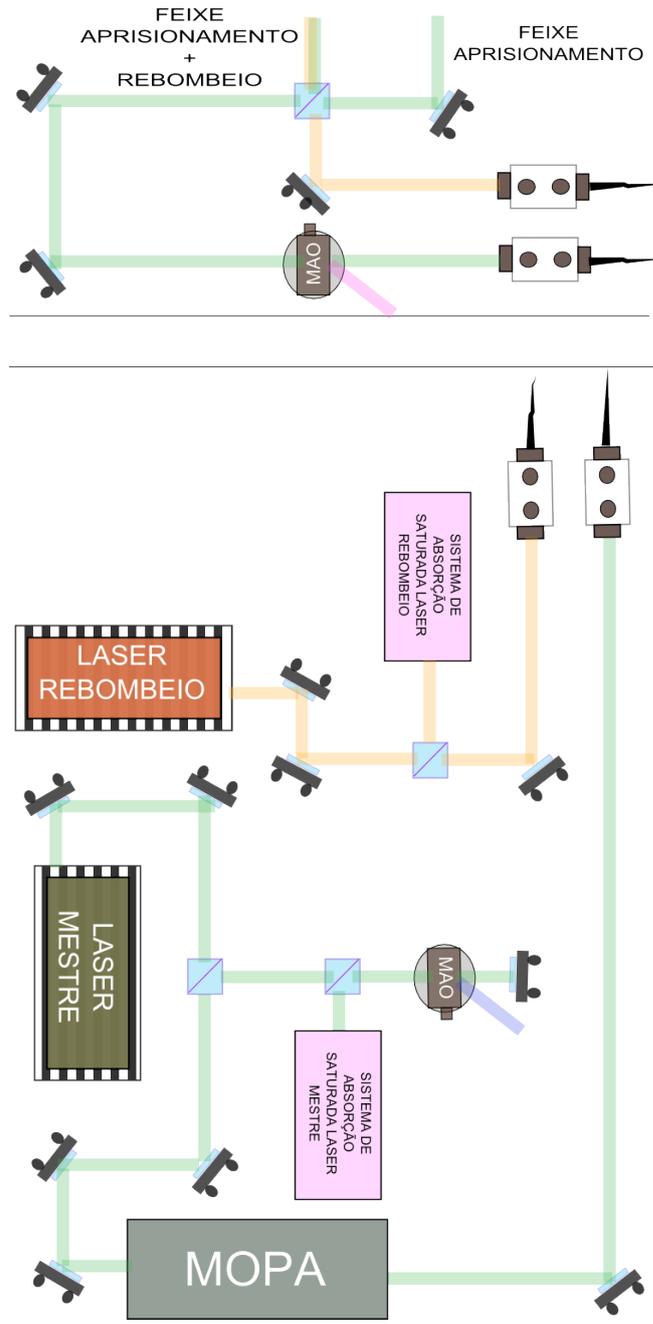
No aprisionamento e resfriamento dos átomos é utilizado um laser de diodo, modelo SDL5422HI em 852 nm cavidade externa estendida, denominado laser mestre. Este laser tem a função de realizar a armadilha magneto-óptica e reduzir a temperatura da amostra realizando um resfriamento sub-Doppler. Este laser é injetado em um amplificador ótico do tipo MOPA e travado por um sistema de referência de célula de absorção saturada. O travamento deste laser é feito na transição $F = 4$ para $F' = 5$.

O laser mestre, nessa frequência, alimenta o MOPA com 20 mW na entrada. Uma vez excitado, o diodo do MOPA gera até 300 mW no mesmo comprimento de onda de excitação. O feixe de saída do MOPA é distribuído na mesa óptica por meio de cubos polarizadores e lâminas de meia onda. Fibras ópticas do tipo monomodo e mantenedoras de polarização levam a luz laser da mesa óptica até a mesa da câmara de vácuo.

No esquema da montagem óptica da [Figura 52](#), é possível notar o sistema de absorção saturada do laser mestre e do rebombeio, o MOPA, os moduladores acusto-ópticos e os acopladores para as fibras ópticas, que conectam a mesa óptica a mesa da câmara de vácuo.

A transição atômica utilizada para fazer o travamento do laser é cíclica. Os átomos

Figura 52: Diagrama esquemático da mesa óptica



Fonte: próprio autor

no estado $F = 4$ são excitados para o estado $F' = 5$ e ao voltarem para o estado fundamental devem decair para o estado $F = 4$ novamente, respeitando as regras de seleção. Porém, uma parcela de átomos por ventura acaba decaindo para o estado fundamental $F = 3$.

Por conseguinte, a transição do laser mestre não consegue interagir com essa parcela de átomos, por menor que seja a parcela da amostra que se encontra no estado $F = 3$. Após um determinado tempo toda a amostra atômica acabaria neste estado e não haveria átomos na armadilha magneto-óptica. De modo que recolocar os átomos no processo

torna-se necessário.

Para a preparação dos átomos, é utilizado outro laser de diodo do mesmo modelo, denominado laser de rebombeio. Sua função é recolocar os átomos que decaem para o estado $F = 3$, durante os ciclos de aprisionamento e resfriamento, de volta ao processo. Devido ao fato de ser travado na transição $F = 3$ para $F' = 4$.

Quando o laser é travado na transição $F = 3$ para $F' = 4$, depois que os átomos são excitados eles podem decair tanto para o estado $F = 3$ quanto $F = 4$. Se decaírem para o $F = 3$ o processo de rebombeio se repete com a mesma possibilidade, ou seja, após algumas interações do processo toda a parcela de átomos em $F = 3$ acaba por decair em $F = 4$. Desse modo, realizando a transferência da amostra atômica para $F = 4$.

O céσιο 133 é um isótopo estável, logo, os níveis $F = 3$ e $F = 4$ do seu estado fundamental (energia mínima) tem um tempo de vida muito longo com energia definida, por isso considerado seus estados estáveis (YOUNG; FREEDMAN, 2009)].

No sistema de manipulação óptica dos átomos existe a necessidade de deslocar a frequência do laser em relação à frequência de travamento para os estágios do ciclo de operação, como o aprisionamento magneto-óptico e o resfriamento sub-Doppler (ALVES, 2012).

À vista disso, na absorção saturada, que trava a frequência do laser com relação a uma das transições ou *crossovers* do seu sinal de perfil Doppler, e na saída do feixe que vai para o experimento são empregados moduladores acústico-ópticos.

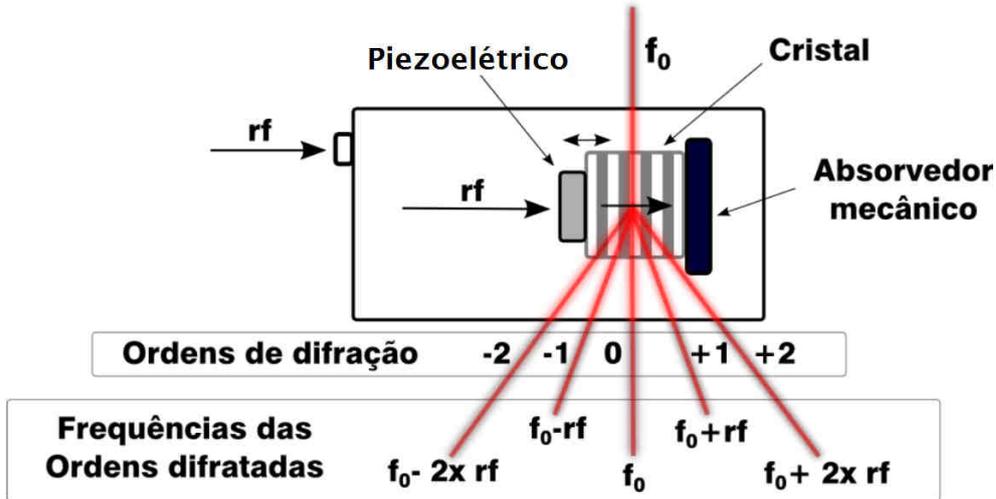
Os moduladores acústico-ópticos podem controlar intensidade, frequência, direção angular de feixes laser, a luz do laser é separada em bandas moduladas através de fônons que se propagam em um cristal. Com isso criam-se feixes com frequência que são decrementadas ou incrementadas pela frequência que alimenta o modulador (KORPEL, 1996).

Um sinal de rádiofrequência alimenta o modulador que transfere este sinal para uma cerâmica piezolétrica. Esta cerâmica vibra e cria uma onda acústica em um cristal adjacente. Esta onda acústica por fim é neutralizada por um absorvedor mecânico no lado oposto do cristal. Quando o feixe passa pelo dispositivo interage com os fônons criados, o que cria alguns feixes difratados.

Dependendo da ordem de difração, o feixe de saída terá a sua frequência modulada pelo sinal de rádiofrequência injetada no modulador. Por exemplo, a frequência do feixe relativo à ordem de difração -1, será a frequência de entrada menos a frequência de rádiofrequência, conforme pode ser observado na figura [Figura 53](#).

Os moduladores conseguem operar apenas dentro de uma faixa limitada do espectro. Cada dispositivo consegue operar com uma faixa definida de frequências de RF para a modulação dos feixes. A faixa de frequência dos moduladores utilizada no experimento é

Figura 53: Esquema de um modulador acusto-óptico



Fonte: [Alves \(2012\)](#)

da ordem de 60 MHz a 200 MHz. Entretanto, a frequência de deslocamento para realização do MOT é de uma largura de linha da transição atômica em torno dos 5 MHz como mencionado anteriormente ($\Gamma/2\pi$).

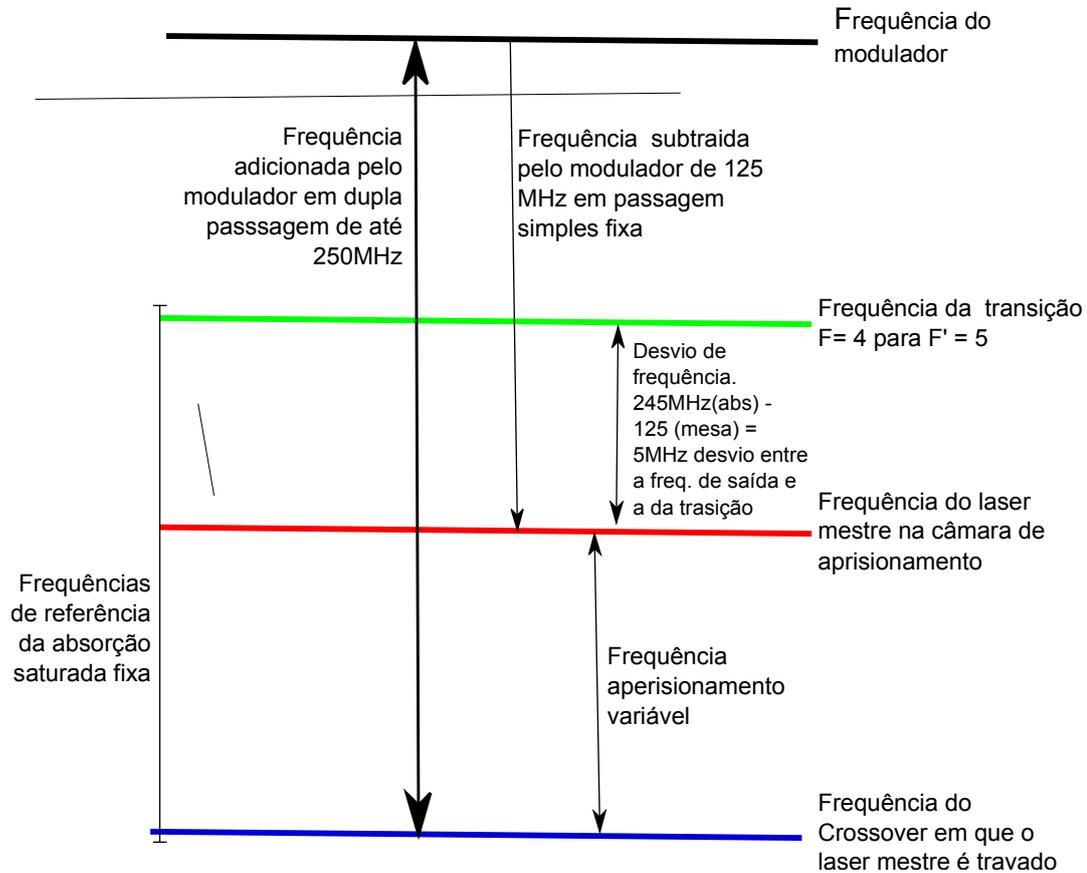
Para isso, é utilizado um artifício na manipulação das frequências, os moduladores proporcionam o deslocamento da frequência dos feixes utilizando um arranjo, em que no sistema de referência da absorção saturada do laser mestre, um dos moduladores de 125 MHz em configuração de dupla passagem desloca a frequência do laser até 250 MHz acima da frequência de *crossovers* entre as transições $F = 4$ para $F' = 5$ e $F = 4$ para $F' = 4$, ou seja, a frequência do laser na saída do modulador pode receber um acréscimo de até 250 MHz somados a frequência na qual o laser está travado na referência.

A transição do *crossovers* está deslocada de 125,5 MHz abaixo da transição atômica $F = 4$ para $F' = 5$, o esquema de níveis apresentado na [Figura 54](#) auxilia no entendimento dos desvios de frequência, apresentando os desvios realizados em cada modulador em relação a transição de travamento. Após sair da fibra óptica, já na mesa da câmara de vácuo, o feixe passa por outro modulador configurado para passagem simples.

Esse modulador opera em 125 MHz alinhado para difratar a ordem -1 do feixe modulado. Dessa maneira, obtendo um deslocamento fixo de 125 MHz. Esse deslocamento de frequência feito por esse modulador, localizado na mesa óptica na saída do feixe, permite que a frequência do laser mestre esteja na ordem de uma largura de linha natural da transição (5 MHz). Permitindo, durante as fases do ciclo de resfriamento variar a frequência de saída do laser de acordo com o deslocamento necessário para atingir as temperaturas desejadas.

Em suma, é utilizado um modulador em dupla passagem no sistema de absorção

Figura 54: Esquema com as frequências de sintonia do feixe de resfriamento e aprisionamento obtidas com os moduladores de 125MHz inseridos na montagem óptica



Fonte: próprio autor

saturada do laser mestre, que amplificado no MOPA, proporcionando os desvios de frequência que podem variar até 250 MHz. Dessa maneira, conseguindo-se as variações de largura de linha natural necessárias ao resfriamento, ao custo de um desvio angular no feixe que por meio de lentes é focalizado e corrigido sendo acoplado na fibra. Na saída da fibra, já na mesa onde fica a câmara, o feixe passa por outro modulador com 125 MHz fixos em passagem simples que subtrai a frequência do feixe, portanto a diferença entre a frequência obtida no modulador da absorção e o modulador da saída da fibra proporciona o desvio da frequência do feixe de resfriamento de um Γ até 12Γ em relação a transição atômica $F=4$ para $F'=5$.

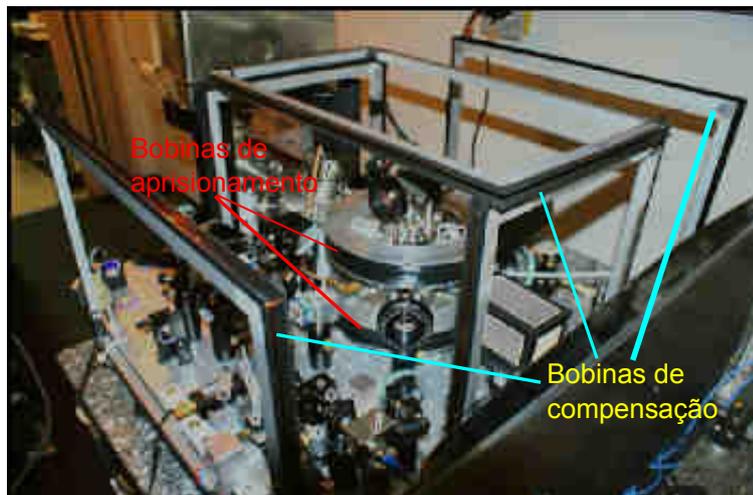
Todo esse artifício de deslocar a frequência com os moduladores tem suas finalidades. A primeira delas, no caso do laser mestre é a fase do resfriamento sub-Doppler, quando a frequência do laser varia de $-\Gamma/2\pi$ a $-12\Gamma/2\pi$. Ainda neste caso é uma grande vantagem ter um modulador alinhado em dupla passagem na absorção saturada, devido à ordem que retorna ao modulador é difratada novamente, dobrando a frequência de modulação e corrigindo o desvio angular do feixe.

Se fosse utilizado um sistema de passagem simples, ao variar a frequência de modulação do laser, o feixe iria sofrer variações de ângulo na saída do modulador perdendo o acoplamento com a fibra óptica. O resultado seria uma indesejada modulação de intensidade na saída da fibra. Os moduladores são utilizados juntamente com obturadores eletromecânicos para obter uma total obstrução dos feixes durante a fase de interrogação.

Por fim, o feixe que sai do modulador é expandido e colimado de modo a gerar um feixe com 9 mm de diâmetro, tamanho da abertura das janelas da câmara de vácuo. Sendo dividido em três, por meio de cubos polarizadores em associação a lâminas de meia onda, que serão retrorefletidos para a obtenção da armadilha magneto-óptica. Lâminas de quarto de onda são usadas nas entradas dos feixes para gerar a polarização circular dos feixes.

Os feixes de laser são introduzidos na câmara de vácuo e alinhados para que a intersecção entre eles coincida com o zero do gradiente de campo magnético das bobinas de aprisionamento. Além disso, correções na posição do campo podem ser conseguidas devido a um dreno de corrente constituído por uma resistência variável em paralelo a uma das bobinas.

Figura 55: Visualização geral das bobinas de aprisionamento e compensação



Fonte: próprio autor

Para a armadilha magneto-óptica existe necessidade de um campo magnético não homogêneo para a sua obtenção. Esse campo é produzido por duas bobinas montadas em configuração anti-Helmholtz, onde, na região central, o campo é nulo e cresce à medida que nos afastamos do centro. As bobinas para este sistema foram construídas de modo a gerar um gradiente de campo magnético no eixo z . Criando um campo que coincide com o centro dos feixes na armadilha, a [Figura 55](#) apresenta a montagem das bobinas.

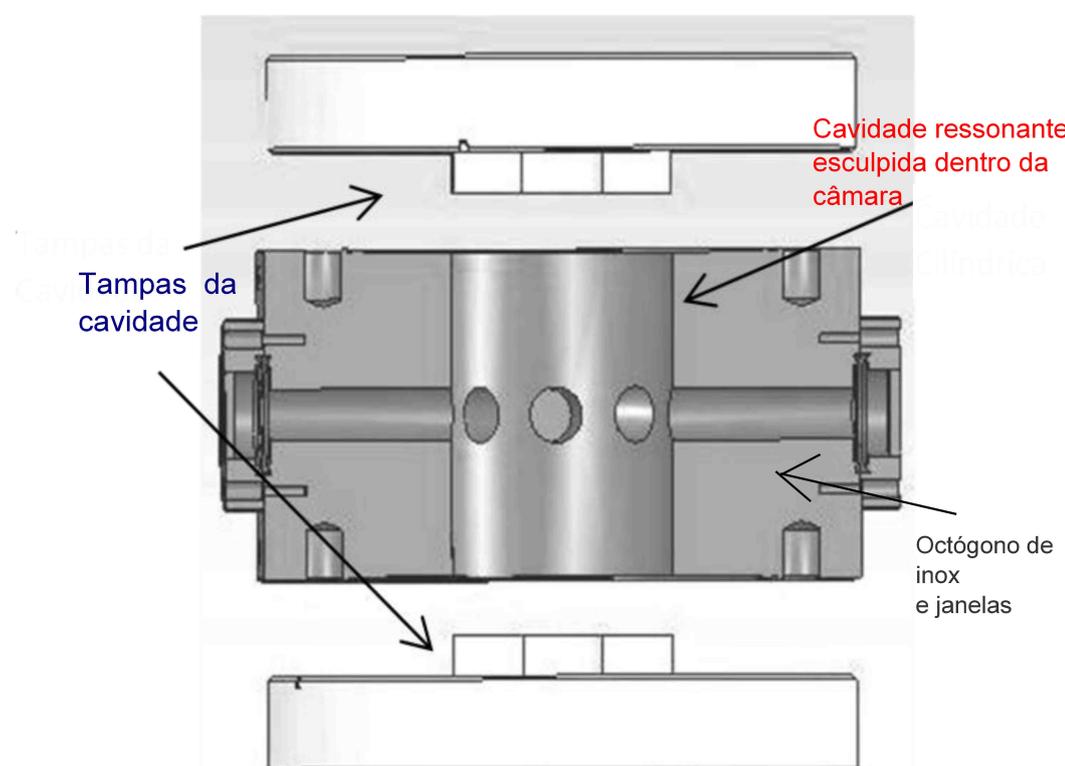
Com o intuito de minimizar os campos espúrios na região da câmara, foram instaladas seis bobinas de compensação de campo magnético, duas em cada eixo cartesiano.

As bobinas são enrolados em estruturas retangulares de alumínio e podem compensar campos de até 1 G na região central (MULLER, 2010). As bobinas de compensação do eixo z também são utilizadas para gerar campo o estático que deve ser fraco e uniforme, conhecido como C-field, utilizado para levantar e degenerescência dos subníveis Zeeman dos níveis hiperfinos.

A câmara de aprisionamento do sistema foi confeccionada em aço inox, possui a forma de um octógono regular com dimensões de 100 mm de altura e 114 mm de distância entre faces opostas. Cada face do octógono e tampas possuem uma janela de 10 mm de diâmetro interno, totalizando dez janelas. Dessas janelas, seis são utilizadas no aprisionamento, uma na detecção, uma na alimentação da cavidade, uma na imagem do MOT e a última na conexão de vácuo com o restante do sistema. A parte restante do sistema de vácuo possui um reservatório de Césio e uma bomba iônica.

A cavidade de interrogação que recebe os pulsos de micro-ondas e interroga os átomos, foi esculpida dentro da câmara de vácuo de aço inox. Possui formato cilíndrico e suas dimensões visam acoplar o modo fundamental TE₀₁₁ do sinal de micro-ondas (MULLER et al., 2011b). A Figura 56 apresenta uma ilustração em que é possível ver a câmara com as janelas e a cavidade ressonante.

Figura 56: Câmara de vácuo em inox em octógono



Fonte: próprio autor

3.4 Sistema de instrumentação

O relógio atômico compacto necessita de um sistema que controle a execução da sequência das fases do processo de interrogação dos átomos. Para esta função, utiliza um sistema composto por placa de aquisição de dados e programa que configura, executa e monitora a operação do relógio. O programa de controle do experimento foi desenvolvido com a plataforma de *software* Labview em sua versão 8.6. Sua programação é feita por meio de blocos que desempenham funções tanto de software, como cálculos matemáticos, quanto gestão dos recursos do hardware utilizando, quando é o caso.

O programa de controle emprega diversas entradas e saídas analógicas e digitais presentes na placa para que se possa operar todo o ciclo de funcionamento do relógio, ou seja, capturar os átomos dentro da câmara de vácuo, resfriá-los, interrogá-los com o campo de microondas e, ao final, medir o sinal de transição relógio provado pelos átomos e atuar sobre a cadeia de síntese de rádio frequência, que provê o sinal de interrogação e as divisões de frequência do oscilador ativo, para obter como sinal de referência na saída frequências de 10MHz, 5MHz e 1 PPS.

Figura 57: Placa de aquisição PCI 6259 National Instruments

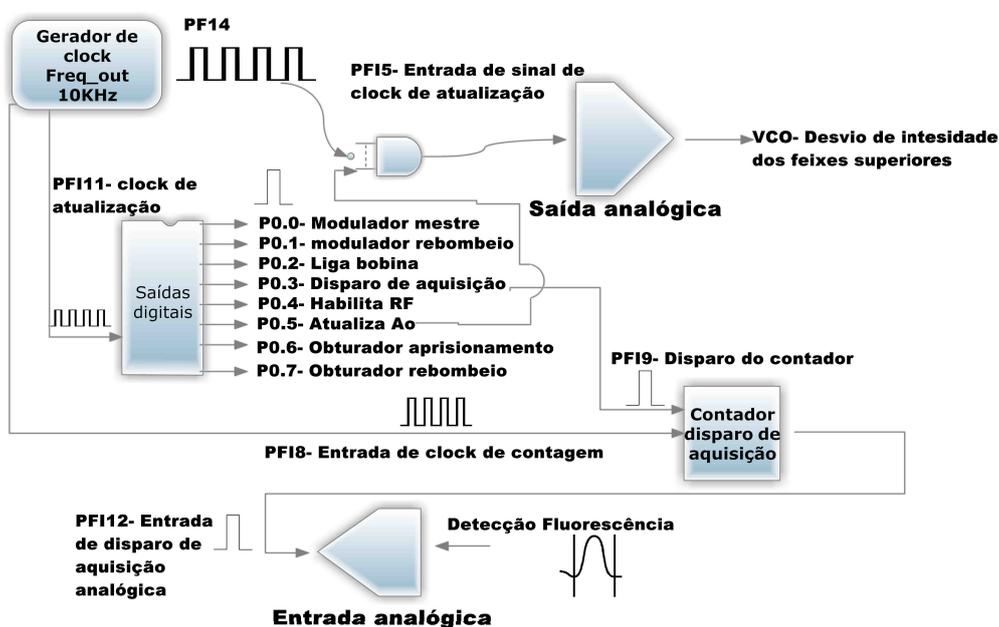


Fonte: próprio autor

O experimento utiliza a placa de aquisição de dados PCI 6259, suas principais características estão resumidas na tabela 2. A placa possui barramento PCI para interface com computador de bancada (INSTRUMENTS, 2016). Notavelmente uma placa poderosa no quesito de recursos de aquisição e geração de sinais. A Figura 57 apresenta uma visão geral desta placa e suas conexões de *hardware*.

Tabela 2: Recursos de *hardware* da placa de aquisição PCI 6259

Recurso	Quantidade	Resolução	Taxa de atualização
Entradas analógicas	32	16 bits	1,25 MS/s
Entradas ou saídas digitais	32	5V @25mA	
Saídas analógicas	4	16 bits	2,86 MS/s
Contadores	2	32 bits	

Figura 58: Esquema de *hardware* utilizado no relógio atômico compacto

Fonte: próprio autor

A Figura 58 ilustra o sistema de *hardware* utilizado no relógio compacto. Esse esquema pode ser usado como referência para o sistema de controle de outros tipos de padrão de microondas, pois todos eles utilizam sistema de laser e microondas para serem operados e o sistema de controle do padrão faz uso de chaves de RF, obturadores mecânicos e moduladores acústico-ópticos, entre outros, para operar o sistema como todo.

Pode-se dividir o esquema de hardware em duas partes principais: geração de sinais de controle e aquisição de sinais de resposta. Com este propósito, o sistema de hardware está baseado em interfaces de comunicação, entradas e saídas analógicas e digitais usados

para gerar e adquirir sinais do padrão de frequência. No experimento, além dos sinais digitais e analógicos, necessita de aquisição síncrona do sinal analógico proveniente dos fotodetector, e todos eles são sincronizados por um mesmo sinal de clock.

Dessa forma, podemos denominar o bloco 1 do sistema como gerador de clock, o bloco 2 como gerador de formas de onda digital, bloco 3 como gerador de formas de onda analógica e bloco 4 como sistema de aquisição de dados.

A geração de *clock* faz uso do de uma saída de frequência (FREQ OUT), cujo sinal deriva de um oscilador interno da placa de 80 MHz que é devidamente tratado no circuito da placa, pois esse gerador é base de tempo interna e fornece um sinal de referência de clock satisfatório para a aplicação. Além disso, sua saída pode ser programada via software, assim como, seu *duty cycle*.

Após os átomos iniciarem uma livre expansão para a interação com o campo de microondas, o controle passa a contar o tempo necessário para que os átomos interajam com o campo de microondas. Há necessidade de disparar a aquisição analógica do sinal de resposta no momento certo e gerar um vetor de dados que represente apenas o sinal de fluorescência, no contrário, ficaria sendo adquiridos pontos que nada importam, e também utilizariam desnecessariamente *buffers* e memória da placa.

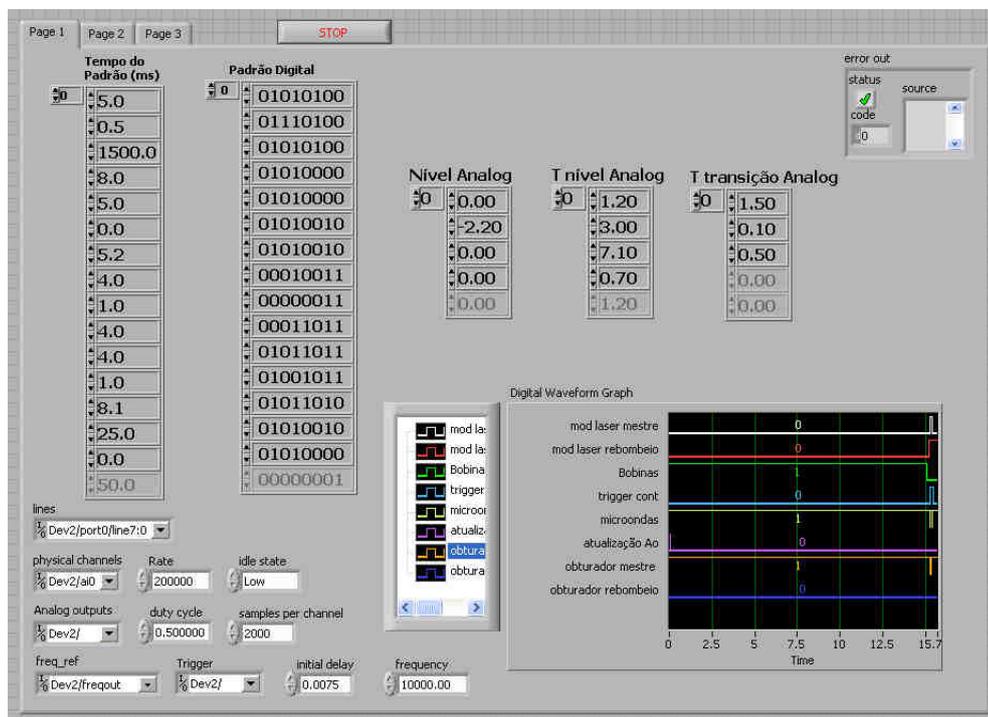
Devido ao processo cíclico, é possível configurar o valor de atraso entre o início da expansão e o disparo da aquisição de dados. O contador é disparado por um dos pinos da saída digital que, à partir disso, inicia a contagem do tempo para o início da aquisição.

A forma de onda analógica, necessária para realizar o desvio de frequência do modulador de 125 MHz, que faz o resfriamento da nuvem atômica, é gerada por uma sub-rotina do programa principal, que, a partir do valor a ser colocado na saída, o tempo que a saída deve permanecer em cada valor de tensão e o tempo de transição entre um valor e outro, monta a forma de onda analógica a ser escrita na saída da placa atualizando o valor de saída a cada ciclo de *clock* formando um vetor de dados que detém os valores de tensão por tempo de onda analógica, os parâmetros são configurados pelo operador no painel frontal do programa. A [Figura 59](#) do painel frontal mostra a interface de configuração.

O vetor gerado contendo a forma de onda da tensão de saída é inserido no bloco de escrita, configurando para trabalhar com saída analógica com múltiplos pontos de amostragem, que estão contidos em um vetor de dados de uma dimensão. A saída analógica é configurada para trabalhar com saída de sinal referente ao terra da placa RSE (Reference Single Ended), com escala de tensão de +10 V até -10 V, com 16 bits de passo de quantização, ou seja, resolução de 350 μ V de acordo e taxa de atualização de 10kS/s em quantidade finitas de amostras.

O sinal esta limitado a uma quantidade de amostras dada pelo vetor de pontos e obedece a uma taxa de atualização determinada que possa ser configurada pelo usuário no

Figura 59: Painel Frontal programa de controle



Fonte: próprio autor

painel frontal do programa mostrado na figura.

A sequência digital é gerada utilizando o port 0 da placa de aquisição que possui 8 E/S configuradas como saídas digitais, em que o pino 0 habilita a atualização das saídas analógicas acionando a entrada de uma porta lógica do tipo AND, conforme pode ser visto no esquema da [Figura 58](#), isto é feito para minimizar o uso do buffer da saídas analógica da placa, ou seja, atualiza-se o valor da saída analógica quando realmente é necessário atuar no modulador.

A saída 0 é usada para atenuação de intensidade do modular do laser de mestre.

A saída 1 é usada para atenuação de intensidade do modular do laser de rebombeio.

A saída 2 liga ou desliga as bobinas para as fases de MOT e MOLASSES realizadas no início do ciclo, pois, durante a fase de captura ela permanecem ligadas, depois, na fase de resfriamento, elas devem ser desligadas gerando o melado óptico.

A saída 3 dispara a contagem de tempo para o início da aquisição de dados, ou seja, essa saída digital está conectada no disparo do contador 0 da placa, que quando disparado conta o tempo de atraso entre o início da expansão dos átomos dentro da cavidade e o momento aproximadamente em que a nuvem atômica estará pronta para a detecção disparando a aquisição da entrada analógica.

A saída 4 tem por função ligar ou desligar uma chave de RF compatível com

o nível de sinal TTL que por sua vez atenua o sinal de RF aplicado nos moduladores acusto-ópticos.

A saída 5 é usada para habilitar a atualização das saídas analógicas e está conectada a entrada da porta lógica AND externa que repassa o sinal de clock para atualização das saídas no momento de serem feitos os desvios do modulador.

A saída 6 aciona o obturador mecânico para o feixe do laser de aprisionamento.

A saída 7 aciona o obturador mecânico para o feixe de rebombeio.

Conforme já mencionado, a porta da placa utilizada nesta função é o porto 0 que possui 8 E/S, configurado para trabalhar com um canal por linha com taxa de atualização de 10 kS/s e amostras finitas de clock, os dados gerados pela sub-rotina tiveram que ser convertidas para forma de onda digital dada a configuração do bloco de escrita da placa, para forma de onda digital de um canal com múltiplas amostras.

O sinal de resposta é adquirido por uma entrada analógica essa entrada esta configurada para trabalhar com uma faixa de tensão de leitura de +10 V até - 10 V, no modo RSE (referenciadas ao terra), taxa de amostragem finita e disparo de aquisição por borda, em que o bloco de leitura está configurado para adquirir um vetor de dados referentes ao fotodetector. A quantidade de pontos e a taxa de amostragem podem ser configuradas pelo usuário no painel frontal.

Para interface com dispositivos externos como, por exemplo, os sintetizadores de frequência Stanford DS 345 o computador de controle possui uma placa PCI – GPIB apresentada na [Figura 60](#).

Esta placa por meio de comunicação IEEE 488/ GPIB, permite interface direta com Labview e comunica-se com diversos instrumentos, por meio de cabos com acoplamentos formando uma rede especificada pelo padrão IEEE 488, em que cada dispositivo possui seu endereço sendo controlado por software. Pode-se tanto enviar valores de configuração dos equipamentos quanto receber dados ([CARR, 2002](#)).

Portanto, o programa de controle gerencia vários outros sistemas que permitem que o relógio realize seu ciclo. Uma parte do programa está dedicada à geração e aquisição de sinais, também é realizado o tratamento matemático do sinal de fluorescência adquirido para que se possa calcular em tempo real a ressonância atômica.

Efetuada a varredura do sinal de interrogação proveniente da cadeia de microondas, pode-se obter a franja de Ramsey que fornece os dados necessários para que o programa possa operar no modo de travamento e escravizar a cadeia de microondas em torno da frequência de ressonância.

Foi tomado o devido cuidado em forçar as etapas de execução do programa, por meio das ligações realizadas nos blocos que formam o código fonte. O programa entra em

Figura 60: Placa de comunicação PCI-GPIB



Fonte: próprio autor

loop, dentro do laço é executado a configuração de sinal de clock, o funcionamento do temporizador, saídas analógicas e digitais, e ao final da etapa de controle de hardware do programa é feita a coleta do sinal de fluorescência.

Os pontos adquiridos são processados no laço fazendo alguns ajustes matemáticos nos dados, e integrando numericamente os pontos de sinal de resposta, estima-se a parcela de átomos que fizeram a transição gerando o valor numérico da probabilidade de transição, esse valor é um ponto na varredura da cadeia e conseqüentemente um ponto no sinal da franja obtido experimentalmente.

Um novo ciclo se inicia para que sejam adquiridos novos sinais de fluorescência. A cada ciclo, novos sinais são coletados e o sinal de interrogação pode ser varrido em frequência. No final observa-se o sinal obtido, podendo ser selecionado no programa o modo de travamento, feito em outro laço dentro do programa principal.

O programa permite também salvar os dados em um arquivo para processamento posterior. Além disso, o usuário pode escolher o número de médias das medidas para geração do ponto na franja e o valor do ganho do algoritmo de travamento.

3.5 Síntese de micro-ondas

A síntese de micro-ondas consiste de uma cadeia de osciladores de cristal de quartzo travados em fase, com alta pureza espectral e importantes características com relação à estabilidade e ruído de fase (SANTARELLI et al., 1998).

O sinal é gerado, por meio da síntese desses osciladores alimenta a cavidade dos

átomos com 9192631770 Hz, sinal este utilizado para interrogar a amostra periodicamente. Com o sinal de resposta da interrogação analisado é possível corrigir o desvio da frequência de saída da cadeia de micro-ondas em relação a transição atômica dos níveis hiperfinos do Césio que define o segundo. A [Figura 61](#) apresenta o esquema de laço de frequência fechado utilizado na cadeia.

A cadeia utilizada neste sistema gera o sinal de 9,2 GHz a partir de três osciladores (5 MHz, 100 MHz e 10.7 MHz) travados em fase entre si e controlados por tensão.

O sinal do oscilador de 5 MHz é multiplicado por 2, gerando um sinal de 10 MHz, ao mesmo tempo em que outro sinal de 10 MHz é gerado pela divisão do sinal de 100 MHz por 10. Um misturador gera um sinal de erro a partir desses dois sinais.

O sinal de erro é enviado ao oscilador de quartzo de 100 MHz para a correção do seu sinal. Após a correção, o oscilador de 100 MHz é multiplicado por 5, gerando um sinal de 500 MHz.

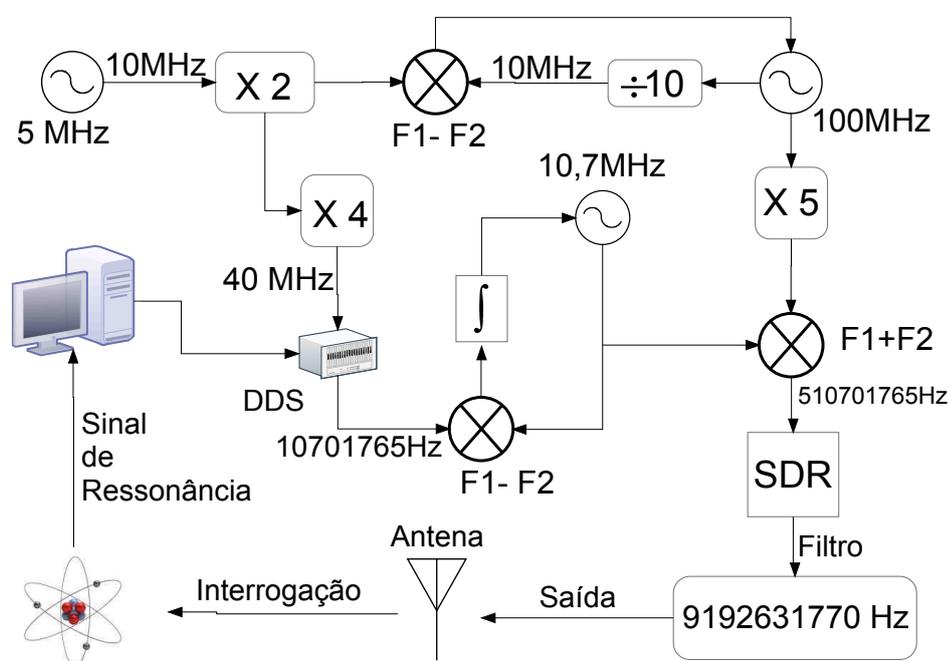
Um gerador de função sintetizado Stanford modelo DS345 é travado em fase com o sinal de 10.7 MHz. A frequência de saída da DDS (síntese direta digital) é 10701765 Hz e corresponde à do oscilador de quartzo de 10.7 MHz. O sinal de 10701765 Hz é somado ao de 500 MHz produzindo um sinal 510701765 Hz.

Esse sinal de 510701765 Hz é filtrado e amplificado antes de ser conduzido a um Diodo recursor de passo (*Step-Recovery-Diode – SRD*), que produz um pente de bandas de frequência. Em seguida, um filtro seleciona o 18º harmônico que corresponde a 9192631770 Hz ([MULLER, 2010](#)).

Uma vez que o gerador de função é usado na produção do sinal de 9,192631770 GHz, é necessário que ele esteja sincronizado com um dos osciladores da cadeia. Este sincronismo é realizado através de um sinal de 40 MHz, produzido através da multiplicação do sinal do oscilador de 5 MHz por 8.

Logo, o sinal de 5 MHz que sincroniza o oscilador de 100 MHz e o gerador de função, é sincronizado por meio de um sinal de erro obtido no software de controle que é calculado utilizando a eficiência do sinal de micro-ondas na transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do Césio. Trabalhando em malha fechada, esse sistema caracteriza o funcionamento do padrão de frequência atômico.

Figura 61: Esquema da cadeia de síntese de micro-ondas para a interrogação dos átomos



Fonte: próprio autor

4 PADRÃO DE FREQUÊNCIA TRANSPORTÁVEL: INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA

Neste capítulo é apresentada a arquitetura de controle e instrumentação para o padrão de frequência compacto transportável e os desenvolvimentos realizados a fim de se obter subsistemas que configuram mobilidade ao sistema, assim como, os principais resultados obtidos até o momento e contribuição para o experimento.

4.1 Arquitetura de instrumentação e controle para o padrão de frequência transportável

Um relógio atômico é composto por vários componentes, dentre eles, vários são equipamentos completos como, por exemplo: lasers, síntese de rádio frequência, sistema de instrumentação. Além disso, existem lentes, osciladores controlados por tensão, obturadores mecânicos de feixe entre outros; tornando o volume do subsistemas do aparato experimental difícil de ser movido para fora do ambiente do laboratório. Portanto, para proporcionar mobilidade a um padrão de frequência baseado em átomos frios é necessário, primeiro, reduzir o volume de seus componentes e equipamentos.

Contudo, compactar todos os equipamentos e componentes envolvidos na montagem e configuração de um relógio atômico é uma tarefa bastante específica que demanda de projeto e execução de técnicas de engenharia e *software* que sejam capazes de maximizar a independência de operação e robustez do sistema, que no sentido prático tornarão o relógio menos suscetível a falhas e condições adversas do ambiente de medição, ou mesmo, transporte do equipamento.

Nessa direção, pode-se utilizar diversas abordagens para o desenvolvimento de um sistema de instrumentação eficaz para o relógio atômico, como placas de aquisição e geração de sinais associados a um micromputador, sistemas distribuídos e independentes providos de algum sinal de sincronização, sistemas baseados em instrumentos externos vinculados por rede, são algumas das abordagens analisadas no estudo da literatura técnica da área (ROY et al., 2015).

Tendo em vista a redução dos subsistemas, foi iniciado o projeto de seus componentes principais como: sistemas de laser que procura compactar ao máximo o volume do sistema de controle e optomecânico e aumentar sua robustez, também os testes de sistema de vácuo de tamanho reduzido e síntese de frequência baseada em sistema embarcado.

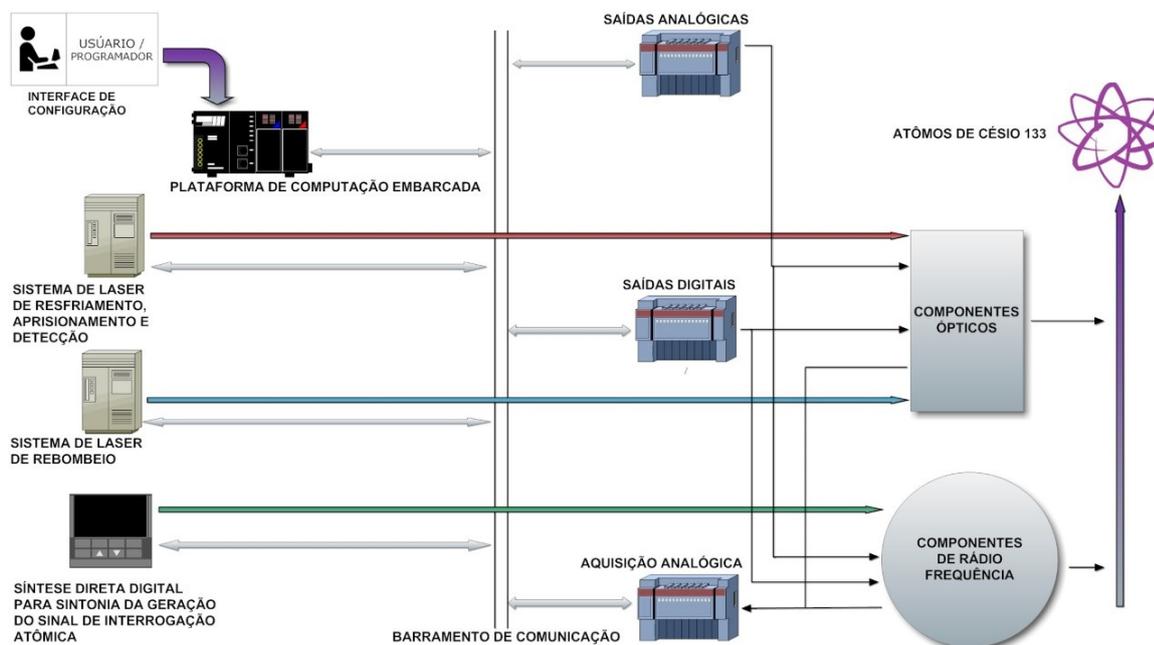
No sistema de controle e instrumentação para o novo relógio, optou-se por uma arquitetura de controle e monitoramento distribuída, devido a necessidade de que o sistema opere com subsistemas que possuam funcionamento individual e sejam apenas configurados e monitorados por uma interface de supervisão.

A arquitetura definida para o experimento consiste, basicamente, de sistemas de *hardware* com processamento embutido que se comunicam por meio de rede local e são sincronizados por um sinal travado em fase. A abordagem de sistemas distribuídos e independentes se revelou muito atrativa, pois proporciona uma estrutura de instrumentação em que cada componente pode ser analisado individualmente facilitando a implementação de sistemas de autodiagnóstico, facilidade de configuração e diminuindo o volume geral do sistema.

A autonomia dos subsistemas alivia o consumo dos recursos da unidade responsável pelo tratamento do sinal de resposta e a correção do sinal de frequência de saída. Visando maximizar o uso dos recursos de *hardware* durante a operação do relógio. Além disso, uma arquitetura deste tipo permite que o padrão de frequência trabalhe independente de sistemas operacionais que necessitam de atualização e manutenção e que consomem recursos de memória e *hardware* (FRANCHI, 2011).

A Figura 62 apresenta uma ilustração geral da configuração adotada, em que seus componentes operam independentemente uns dos outros. Porém, interligados por um sistema supervisor que faz o monitoramento geral dos dados de resposta e configura o funcionamento do padrão de frequência.

Figura 62: Configuração geral do sistema de instrumentação distribuído adotado para o padrão de frequência transportável



Fonte: Pechoneri (2013)

Conforme já mencionado, o relógio atômico é formado por subsistemas de grande complexidade e que exigem diferentes formas de tratamento de suas tarefas. Devido a

este fato, neste projeto, a arquitetura de controle é definida de maneira a maximizar a autonomia dos subsistemas envolvidos. Assim, a unidade supervisão ficará responsável por interface com usuário, ajuste de parâmetros e gestão de tarefas de sistemas microprocessados responsáveis pelo controle local de cada componente presente no relógio, registro e análise dos dados obtidos.

Os requisitos funcionais mínimos para que um padrão de frequência de átomos frios possa funcionar do ponto de vista de geração e aquisição de sinais são: sistema gerador de sinal de *clock*, sistema gerador de sequências de padrões de saídas digitais, sistema gerador de formas de onda analógicas, sistema de aquisição de dados analógicos, rede de comunicação local e uma unidade computação embarcada.

O sistema gerador de *clock* tem por função gerar um sinal confiável de atualização para a geração e aquisição de sinais no experimento. Os subsistemas devem compartilhar o mesmo sinal de taxa de amostragem, evitando diferenças temporais entre as fases do ciclo de operação, de forma que este sinal de referência permita que o sistema de controle realize o sincronismo do relógio como um todo.

O sistema gerador de padrões de sequências digitais utiliza sinal de *clock* como base de tempo para escrever em suas saídas digitais os valores binários em determinados instantes que geram os padrões digitais que controlam o acionamento dos equipamentos usados para as fases de MOT, MOLASSES, interrogação e detecção. O valor de saída e o tempo de cada padrão são configurados utilizando rede de comunicação com a unidade de computação embarcada.

O sistema gerador de formas de onda analógicas é utilizado para desviar a frequência e a intensidade dos osciladores controlados por tensão utilizados na montagem do relógio, para cada fase do ciclo de forma individual e independente. Os valores da tensão de saída, para cada instante, que forma o perfil da onda analógica, são configurados pela rede de comunicação e seu sincronismo é mantido pelo gerador de *clock*.

A aquisição de dados analógicos faz a leitura de tensão do sinal de resposta de probabilidade de transição e envia para a unidade de processamento os dados obtidos em sincronismo com o restante do processo de funcionamento do relógio.

A comunicação entre a unidade que configura o modo de funcionamento do relógio e os sistemas que executam as tarefas envolvidas no controle das fases do ciclo de operação é realizada em uma rede local que deve se comunicar com o dispositivo que possui o parâmetro requisitado para escrita ou leitura de dados de forma independente, ou seja, que não afete a operação dos outros sistemas.

O sistema de monitoramento de dados e configuração de modos de operação permite uma interface entre o operador e o sistema, os valores de saídas e tempos entre outros parâmetros que configuram cada fase do processo do ciclo atômico são configurados por

meio deste dispositivo.

Tendo em vista que o relógio atômico possui aplicações exclusivamente como referência de sinal de frequência, uma vez calibrado utilizando outros padrões de frequência e configurada suas fases de operação deve trabalhar em laço de frequência travado, autonomamente, servindo como padrão de sinal frequência. Até que uma nova configuração seja requerida.

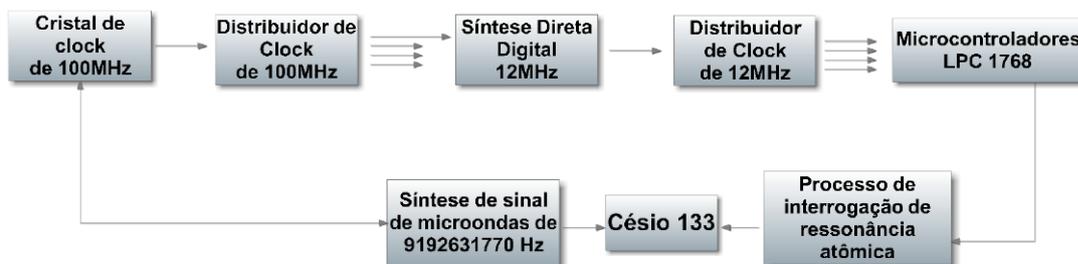
4.2 Sistema de referência de sinal de sincronismo e atualização em laço fechado

Um sistema de *clock* de amostragem para aquisição de geração e sinais de controle do padrão de frequência transportável que esteja travado em fase com a síntese de microondas responsável por fornecer o sinal de interrogação aos átomos é uma abordagem que permite sincronizar em fase todos os sinais críticos no processo de interrogação atômica a uma referência de alta qualidade. Numa configuração deste tipo, o sinal de taxa de atualização do sistema de instrumentação do padrão atômico é corrigido ou travado em uma linha de ressonância atômica, ou seja, o *clock* fica determinado pelo sinal de excitação da amostra atômica.

A principal vantagem nesta abordagem consiste em reduzir as diferenças temporais entre cada fase do ciclo do relógio, proporcionando o aumento do sincronismo dos padrões de saída do sistema de instrumentação. Assim como, no sincronismo da aquisição dos dados de eficiência da transição relógio, medido em forma de tensão elétrica em volts, que permite determinar a medida do segundo realizada pelo sistema.

Portanto, para o sistema de *clock* de referência optamos por um oscilador de 100 MHz, que será parte da cadeia de osciladores do sistema de síntese de microondas, cujo sinal de ressonância da transição relógio do césio de 9192631770 Hz é preparado utilizando métodos e circuitos de composição de sinal de radio frequência.

Figura 63: Abordagem de distribuição de sinal de referência de *clock* baseado em um oscilador componente da síntese de microondas



Fonte: próprio autor

Logo, o *clock* de referência para os microcontroladores que fazem o controle distribuído das etapas do processo do ciclo de funcionamento do padrão atômico ficarão

sincronizados em laço fechado de fase com o sinal de ressonância dos átomos. A [Figura 63](#) apresenta um diagrama de blocos de como o sistema de *clock* é composto.

Para ser obtido na saída do circuito gerador de *clock* um sinal estável e de boa qualidade, a fonte do sinal de frequência de entrada precisa ser confiável. Para isso foi utilizado como fonte de sinal de entrada um oscilador à cristal de quartzo OCXO (Oscilador à cristal com aquecimento controlado) de 100 MHz Wenzel modelo 501-16843.

Sua saída consiste de um sinal de tensão senoidal com nível de saída de +13 dBm em 50 Ω de impedância, em torno de 1,4 V_{pp}, estabilidade térmica de 2×10^{-7} em referência a 25°C, *aging* de 1×10^{-16} por ano depois de 30 dias de operação contínua ([Wenzel Associates Inc, 2006](#)).

O sinal de 100 MHz então é dividido em um *Power splitter* (divisor de potência) de 1 para 10 saídas utilizando um PSC-10-1 em que sua saída é amplificada por meio de amplificadores de sinal MAV 11. Fornecendo assim, 10 saídas de 100 MHz com + 10 dBm de nível de potência.

Uma dessas saídas é derivada para a entrada de sinal de referência de uma síntese direta digital (DDS) embarcada que fornece em sua saída um sinal de 12MHz que também é dividido e amplificado e alimenta o *clock* de amostragem dos microcontroladores LCP1768.

Optou-se pela frequência de 12 MHz de *clock* para os LPC1768 devido as bibliotecas do conjunto de funções disponibilizadas pela organização Mbed em seu compilador estarem preparadas para essa frequência de *clock*. Com o sistema seu laço de frequência fechado PLL (*Phase Locked Loop*) internamente multiplicando essa frequência e o processador trabalhando com uma frequência de 96 MHz. De forma que o sinal de *clock* e consequentemente amostragem do processo de controle do ciclo atômico fica travado ao sinal de ressonância.

Este sistema foi construído testado e avaliado, utilizamos o sistema como fonte de *clock* para os microcontroladores dos outros módulos, fonte de referência para um DS385 e para o projeto de DDS embarcada. A [Figura 64](#) mostra a configuração do sistema montado em sua caixa metálica preparada para inserção em rack de instrumentos.

Antes dos testes, realizamos a medida do ruído de fase adicionado pelo divisor e amplificador ao sinal de 100 MHz entregue pelo oscilador, que permitiu encontrar a melhor configuração para o layout do circuito impresso e maximar o nível de tensão na saída com o menor nível de ruído possível.

A [Figura 65](#) apresenta a montagem e configuração utilizada para efetuar a medida do ruído de fase do sistema, em que foi necessário o teste de várias configurações devido ao comportamento do sistema em relação ao ambiente de medição e componentes utilizados como: cabos e conectores.

Figura 64: Sistema de distribuição de *clock* montado



Fonte: próprio autor

Figura 65: Avaliação de sinais do oscilador



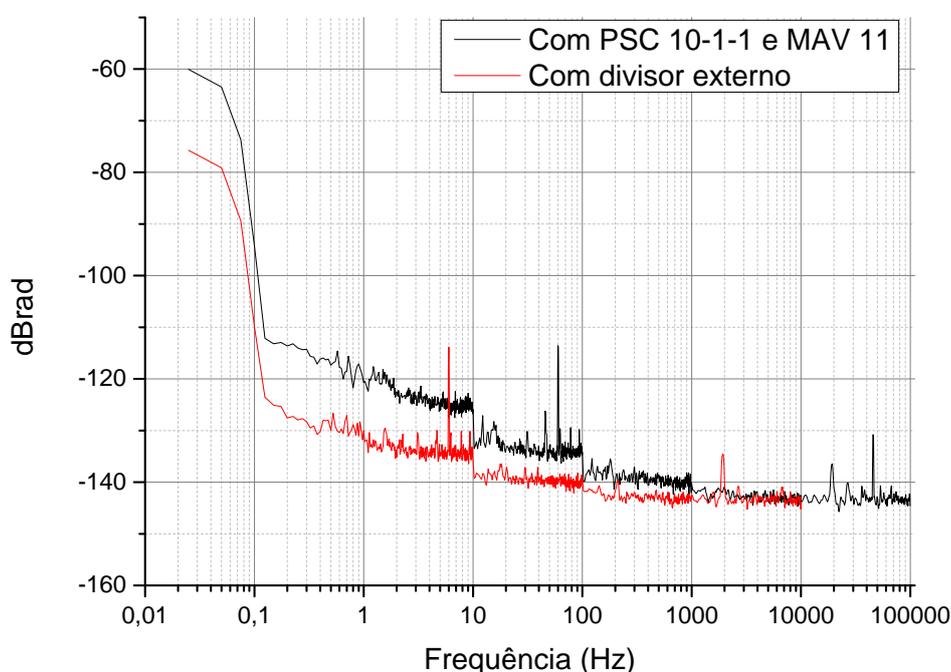
Fonte: próprio autor

Como medida de referência para os testes e ensaios realizados foi utilizado o sinal do oscilador de 100 MHz sendo dividido pro um sistema passivo que devido a suas características de construção divide também a potencia do sinal de saída, porém

minimizando para próximo de zero a adição de ruído ao sinal de saída do oscilador. Tendo como base está medida, fomos trabalhando na configuração do nosso sistema até atingir o mais próximo possível a curva de referência.

Otimizou-se as conexões elétricas, tipos de cabos, disposição de dispositivo na placa e fontes de alimentação externa. Até que foi conseguido 10 saídas com +13dBm de potência de sinal com 100 MHz e e curva de ruído o mais próxima possível da referência como mostra o gráfico da [Figura 66](#) em que a curva preta e vermelha mostram a medida atingida e a referência, respectivamente.

Figura 66: Medida de ruído de fase do sinal distribuído



Fonte: próprio autor

Por meio da [Figura 66](#), pode-se notar também o ruído inerente da rede de alimentação nos 60 Hz quando medido o circuito amplificado e, em comparação com o divisor passivo, o sistema está trabalhando no menor nível de ruído possível conseguido com a configuração atual. Planejamos a construção de outra placa de circuito que possa levar o curva do ruído ainda mais próxima da referência, curva vermelha do gráfico.

4.3 Plataforma computacional de gerenciamento e comunicação central

Garantir a operação do padrão atômico de frequência, ou seja, realizar as configurações, análise dos dados e reportar as falhas. Além de gerenciar o funcionamento dos

subsistemas envolvidos é uma tarefa de alto nível e de fundamental importância. Devido a seus requisitos, necessita de um sistema que possua conectividade, poder de processamento e disponibilidade de uso de sistema operacional.

Existem alguns requisitos que necessitam ser atendidos por este sistema na topologia do relógio atômico, sendo as principais delas facilitar a modularização do sistema e a compactação. Além disso, deve fazer a aquisição dos dados pré processados e o gerenciamento do funcionamento do ciclo atômico, tal como: configurar módulos de saídas e entradas de sinais, configurar sistemas de laser e sintetizador de frequência inteligentes, realizar algoritmo de varredura e travamento da frequência do segundo.

Atualmente, no mercado de desenvolvimento de sistemas embarcados, surgiram muitas opções de placas e sistemas computacionais modulares, compactos e a maioria deles de custo reduzido, tanto para fins educacionais, quanto comerciais ou industriais.

Dentre elas, encontramos opções no mercado nacional como: Raspberry Pi, Beagle-Bone Black, Toradex, Galileo, entre outras. Todas elas trabalham com sistemas operacionais desenvolvidos especificamente para sistemas embarcados e possuem foco de mercado diversificado, por exemplo, fins educacionais, prototipagem, produto final de padrão industrial, pesquisa.

Estas opções de *hardware* podem ser entendidas como mini computadores de médio e alto desempenho, muitas delas dotadas de aceleradores gráficos e várias interfaces com sistemas externos. Dentre estas opções, disponíveis no laboratório, possuímos a Raspiberry Pi, BeagleBone Black e Toradex com processadores T20 e VF61 com placas de base Iris e Viola respectivamente.

Todos esses sistemas citados trabalham com sistemas operacionais e possuem suporte à Linux. Assim como, para outros sistemas operacionais, por exemplo, Android e Windows com variações entre cada plataforma. Sistemas operacionais de código aberto ou *software* livre mostram-se como a melhor opção em termos de sistema operacional para nossa aplicação, pois o suporte é feito pela comunidade, as versões disponibilizadas não dependem da continuidade de suporte e atualização realizada por uma única corporação.

Devido a sua tarefa de supervisionar o funcionamento e ser interface entre usuário e sistema, os requisitos principais necessários ao *hardware* são: quantidade de memória, velocidade de processamento, disponibilidade de interface de comunicação com *host* e com dispositivos embarcados.

A maioria dos dispositivos encontrados no mercado apresentam alguma dessas características, sendo necessário observar o balanço entre os recursos para a tomada de decisão na escolha da plataforma de *hardware* e *software*. Além disso, faz-se necessário observar a experiência e habilidade que possuímos para desenvolver o sistema utilizando este tipo de plataforma, que também faz parte do desenvolvimento do trabalho. A [Figura 67](#)

apresenta um quadro comparativo dos recursos de *hardware* presentes em cada uma das placas disponíveis no laboratório.

Figura 67: Quadro comparativo dos recursos de *hardware* presentes nas placas de computação embarcada disponíveis no laboratório

Especificação	Raspberry Pi	BlackBone Black	Toradex	Toradex
Versão	2 B	Rev C	T20 + Iris	VF61+ Viola
Interfaces de comunicação	1 UART	5 UART	3 UART	3 UART
	1 Ethernet	1 Ethernet	1 Ethernet	1 Ethernet
	1 SPI	2 SPI	2 SPI	4 SPI
	1 I2C	2 I2C	1 I2C	4xI2C
		2 CAN		2 CAN
	4 USB	2 USB	2 USB	2 USB
Memórias	1 GB RAM	512 MB RAM	512MB	256MB
	Cartão SD	2GB Flash	1 GB	512MB
Clock	900 MHz	1 GHz	1 GHz	500 MHz
Processador	BCM 2836 Cortex A7 quad-core	Sitara Am3358 Cortex -A8	NVIDIA Tegra 2 dual-core Cortex-A9	Freescale Vybrid Cortex A5
GPIO	26	65	26	35
Temperatura de operação	-40 °C a 85 °C	-40 °C a 90 °C	-40° to 85° C	-40° to 85° C
Tamanho	85 x 56 x 17mm	86,33 x 53,34 x 4.76mm	100 x 72 x 8mm	67.6 x 36.7 x 6.2 mm
Custo no Brasil	299,9	439,9	1054	451

Fonte: próprio autor

No quesito custo, excluindo a T20 IRIS, todas estão em uma faixa de custo próxima. No quesito, interfaces de comunicação a BeagleBone Black e a VF61 Viola apresentam maior disponibilidade de recursos e também maiores velocidades de processamento. A Raspberry Pi mostra-se como a melhor opção de sistema no quesito memória.

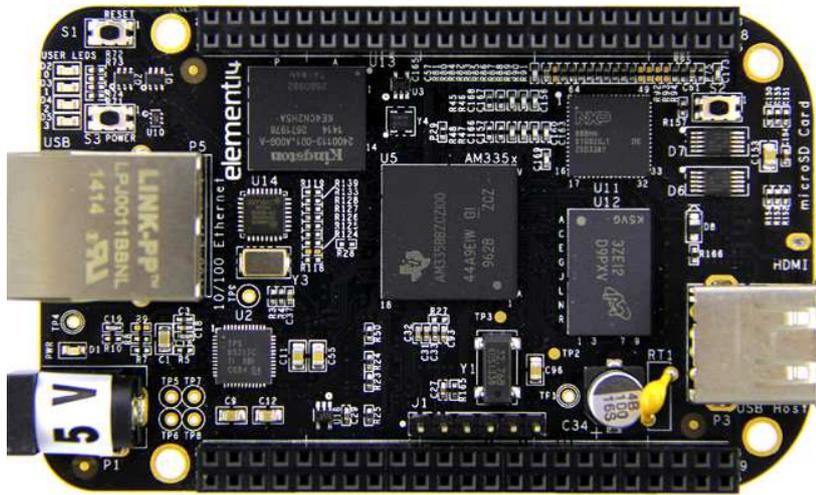
Como podemos notar, todos os sistemas são bastante atrativos quando analisados sobre a óptica da disponibilidade de recursos de *hardware*, porém possuem diferenças no foco das aplicações. A Raspberry Pi tende a abranger aplicações educacionais, BeagleBone Black foi projetada especialmente para fins de prototipagem de projetos e os sistemas Toradex focam no uso comercial e industrial, inclusive limitando o acesso do usuário final a certos níveis do sistema operacional (MOLLOY, 2015), (HENDERSON; PRAKASH, 2015), (TORADEx, 2015), (TORADEx, 2010), (TORADEx, 2015), (TORADEx, 2013).

Todos os sistemas apresentam características muito próximas, sendo a principal delas a possibilidade de uso de diversos sistemas operacionais e em muitos casos baseados em sistemas de *software* livre que permite maior autonomia no desenvolvimento do projeto.

Escolher um sistema para nossa aplicação foi uma tarefa que demandou análise de nossos requisitos de projeto e requisitos de mercado como: continuidade e suporte, disponibilidade de volume de fontes de informações técnicas sobre recursos de *hardware* e *software*. Devido a esses fatores optou-se por utilizar a BeagleBone Black.

BeagleBone Black, como mencionado, é um mini computador de baixo custo especialmente projetado para aplicações de eletrônica e computação embarcada, focado em aplicações de prototipagem e desenvolvimento de projetos (SANTOS; PERESTRELO, 2015). A Figura 68 apresenta o *hardware* da BeagleBone Black.

Figura 68: BeagleBone Black



Fonte: próprio autor

Desenvolvida pela Texas Instruments, seu baixo custo, associado à característica de *hardware* e *software* abertos e ao seu alto poder computacional fizeram com que o sistema se popularizasse, aumentando as comunidades de desenvolvedores amadores e profissionais que disponibilizam seus projetos na Internet para a troca de conhecimento, facilitando seu uso e permitindo que projetos mais complexos possam ser desenvolvidos (RICHARDSON, 2014).

A plataforma permite a instalação de diversos sistemas operacionais, sendo mais comum o Linux, em suas distribuições Debian, Angstrom e Ubuntu. Podem-se também utilizar Android e sistemas operacionais proprietários para fins específicos (HENDERSON; PRAKASH, 2015). A Tabela 3 mostra uma listagem dos principais recursos disponíveis na BeagleBone Black, sendo um recurso importante presente são os 2 controladores CAN que permitiram a implementação da rede de comunicação entre ela e os dispositivos de controle local.

Optamos pelo uso do sistema operacional recomendado pelo fabricante da placa, nesse caso, utilizamos a versão da imagem Linux Debian Jessie 8.6 (2016-11-06) disponibilizada no site beagleboard.org. A escolha da distribuição Linux utilizada deve-se ao fato de o *kernel* possuir suporte para os arquivos de *overlay* que permitem a correta configuração e uso dos controladores CAN embutidos e também ter todo suporte a linguagem Python versões 2.7 e 3.4 integrados.

Uma vez devidamente instalada na memória *flash* da placa, o sistema operacional, o sistema de arquivos deve conter o arquivo de *overlay* para CAN, caso eles não estejam

Tabela 3: Principais recursos de *hardware* disponíveis na BeagleBone Black

Processador	AM3358 ARM Cortex A8
Velocidade do Processador	1 GHz
Entradas analógicas	7
Entradas/saídas Digitais	65
Memória	512MB (RAM), 4GB (ROM) eMMC, microSD
USB	miniUSB, USB port
Vídeo	microHDMI, cape add-ons
Áudio	micro HDMI, cape add-ons
Interfaces Suportadas	UART/PWM/SPI/I2C/CAN Bus/Timers

presentes, será necessário compilar o arquivo para utilizar a comunicação CAN no BeagleBone Black, para configurar e habilitar o uso dos controladores da rede, conforme recomenda a documentação.

Os arquivos de *overlay* são responsáveis pelo controlador, esses arquivos servem como um *driver* para as funções multiplexadas do *hardware*, pois, os pinos de entrada e saída da placa são multipropósito, que internamente são multiplexados, esse é o caso da função CAN.

Para utilizar comunicação CAN no Linux, existe um pacote de suporte chamado CAN-Utills, esse pacote permite o uso dos recursos do controlador CAN por meio de diversas funções disponibilizadas no pacote e que podem ser utilizadas por terminal de comandos ou através de programas específicos feitos em linguagem de programação (KLEINE-BUDDE, 2012).

Optamos por utilizar a linguagem Python para desenvolver nossos programas na BeagleBone Black devido a disponibilidade de material de apoio e suporte ao uso do pacote CAN-utils na linguagem. O suporte a comunicação CAN em Python é realizado por meio do pacote python-can que na versão 3.0 ou superior é integrado no momento da instalação (THORNE, 2017). Essa abordagem de uso das ferramentas de *hardware* e *software* permite o desenvolvimento da aplicação de maneira padronizada facilitando a documentação e atualização dos programas e funções.

O acesso ao sistema pode ser feito por comunicação SSH através de programas como o Putty que simula um terminal, permitindo ao usuário realizar todo trabalho através dele, ou também do Cloud9, uma IDE (*Interface of Development Environment*) compatível com a Beaglebone Black. A conexão física com a rede CAN é realizada utilizando *transceivers* CAN, necessário para adequação dos níveis elétricos da camada física do protocolo.

A alimentação da BeagleBone Black pode ser feita através da porta USB ou também utilizando uma fonte externa. A alimentação USB tem a vantagem de também ser uma das formas de comunicação do desenvolvedor ou usuário com a plataforma.

Desenvolveu-se inicialmente algoritmos simples que enviam uma mensagem fixa, enquanto o programa de recebimento apenas recebia essa mensagem e apresentava a mensagem no monitor. Esses programas básicos permitiram a familiarização com os formatos de mensagem, estruturas e tipos de suas variáveis, permitindo o avanço na complexidade dos algoritmos. A Figura 69 apresenta a tela do terminal Linux mostrando a troca de mensagens entre os canais da BeagleBone Black.

Figura 69: Troca de mensagens entre os canais CAN (CAN 0 e CAN 1) da BeagleBone Black.

```

candump - "beagleb" x
root@beaglebone:/var/lib/cloud9# candump -x -c -tA any
(2016-11-19 22:26:39.574069) can0 RX - - 6F8 [8] BC F1 DC 04 FD 67 DC 7A
(2016-11-19 22:26:39.574042) can1 TX - - 6F8 [8] BC F1 DC 04 FD 67 DC 7A
(2016-11-19 22:26:39.774347) can0 RX - - 313 [8] AD 05 F0 45 25 FE 33 2A
(2016-11-19 22:26:39.774317) can1 TX - - 313 [8] AD 05 F0 45 25 FE 33 2A
(2016-11-19 22:26:39.974622) can0 RX - - 359 [8] F4 CA 2E 58 56 80 A6 1D
(2016-11-19 22:26:39.974592) can1 TX - - 359 [8] F4 CA 2E 58 56 80 A6 1D
(2016-11-19 22:26:40.174892) can0 RX - - 091 [8] 90 FD 07 22 F8 32 50 52
(2016-11-19 22:26:40.174858) can1 TX - - 091 [8] 90 FD 07 22 F8 32 50 52
(2016-11-19 22:26:40.375195) can0 RX - - 734 [8] 89 09 72 30 70 82 89 68
(2016-11-19 22:26:40.375138) can1 TX - - 734 [8] 89 09 72 30 70 82 89 68
(2016-11-19 22:26:40.575498) can0 RX - - 622 [8] 1C 8C 69 55 F6 97 4A 04
(2016-11-19 22:26:40.575469) can1 TX - - 622 [8] 1C 8C 69 55 F6 97 4A 04
(2016-11-19 22:26:40.775750) can0 RX - - 403 [8] 09 20 DC 7E 18 12 8C 02
(2016-11-19 22:26:40.775724) can1 TX - - 403 [8] 09 20 DC 7E 18 12 8C 02
(2016-11-19 22:26:40.976024) can0 RX - - 674 [8] CB 17 87 4A 60 05 19 32
(2016-11-19 22:26:40.975996) can1 TX - - 674 [8] CB 17 87 4A 60 05 19 32
(2016-11-19 22:26:41.176289) can0 RX - - 405 [7] 6A 6D F5 2C 18 5F AF
(2016-11-19 22:26:41.176257) can1 TX - - 405 [7] 6A 6D F5 2C 18 5F AF
(2016-11-19 22:26:41.376563) can0 RX - - 2A5 [7] 3E 5D E3 44 FE E5 92
(2016-11-19 22:26:41.376533) can1 TX - - 2A5 [7] 3E 5D E3 44 FE E5 92
(2016-11-19 22:26:41.576899) can0 RX - - 024 [2] 55 56
(2016-11-19 22:26:41.576863) can1 TX - - 024 [2] 55 56
(2016-11-19 22:26:41.777202) can0 RX - - 2ED [5] AE 23 1C 08 21
(2016-11-19 22:26:41.777173) can1 TX - - 2ED [5] AE 23 1C 08 21
(2016-11-19 22:26:41.977510) can0 RX - - 2A1 [7] 9E 54 10 27 C3 E8 95
(2016-11-19 22:26:41.977478) can1 TX - - 2A1 [7] 9E 54 10 27 C3 E8 95
(2016-11-19 22:26:42.177779) can0 RX - - 171 [8] 89 80 DA 5A 74 80 7C 61
(2016-11-19 22:26:42.177751) can1 TX - - 171 [8] 89 80 DA 5A 74 80 7C 61

```

Fonte: próprio autor

Podemos observar no terminal o comando `cangen`, que gera e envia mensagens aleatórias, enquanto no terminal esquerdo o comando `candump` (ambos do pacote `CAN-Uutils`) mostrando na tela todas as mensagens recebidas na rede, informando ainda qual controlador enviou ou recebeu as mensagens.

Esse resultado valida a instalação dos módulos CAN e o funcionamento dos controladores da BeagleBone Black, mostrando que os mesmos estão aptos a interagirem com a rede. Foi realizado um teste, em que durante um intervalo de envio de 50 ms entre cada mensagem, gerada periodicamente, durante o período de 48 horas não houve perda de desempenho, atraso significativo ou perda de pacotes nos envios e recebimentos das mensagens.

Para aplicação no sistema do relógio atômico considera-se esse resultado suficiente para aplicação. Além disso, a BeagleBone Black como computador embarcado possui todas as características que outros sistemas computacionais baseados em Linux, no que concerne ao desenvolvimento de aplicações de *software*, para implementar os algoritmos necessários para as funções do padrão de frequência que surjam ao longo do seu desenvolvimento.

Desenvolvemos para fins de prototipagem uma placa ‘cape’, como são chamadas as placas auxiliares que conectam-se aos terminais da BeagleBone Black, com uma função específica para retirar todos os fios e otimizar o espaço do circuito. Esta cape é uma placa de circuito impresso, que contém todos os dispositivos necessários para o uso do CAN bus: transceivers e conversores lógicos auxiliando no trabalho de testes e uso. O primeiro protótipo desta placa é mostrando [Figura 70](#).

Figura 70: BeagleBone Black montada em caixa padrão para *rack* com módulo CAN desenvolvido



Fonte: próprio autor

4.4 Rede local de comunicação e interface

A abordagem de controle utilizada no relógio é distribuída, dispondo de diversos subsistemas inteligentes que possuem unidades de processamento embutidas. Estas unidades

precisam ser interligadas por meio de uma rede de comunicação local. Esta rede de comunicação deve ser robusta, simples (do ponto de vista de montagem) e confiável.

Existem diversos padrões de redes industriais ou de uso doméstico, porém no projeto do relógio atômico transportável optamos por uma rede industrial: o padrão de rede CAN *bus* (*Controller Area network*). A escolha deste padrão de comunicação industrial se deve ao fato de que o protocolo proporciona uma redução do número de condutores utilizados em sua montagem física, suporte a tempo real na comunicação, possibilidade do uso de vários pontos de rede em comunicação multimestre (SOUSA, 2002).

A rede CAN surgiu originalmente como um protocolo proprietário, para uso em rede de sistemas embutidos automotivos, criada pela empresa Bosch em 1985. Posteriormente, em 1993 tornou-se um padrão internacional definido pela norma ISO 11898 e amplamente utilizado pela indústria em geral (CORRIGAN, 2002).

A comunicação de dados por rede CAN é realizada por mensagens (*frames*) seriais descritos por duas camadas do modelo OSI *Open System Interconnection*. Sendo elas, a camada física que define os níveis de tensão, modelos de transmissão, conexões, velocidades e etc. E a camada de enlace de dados que define tipo de mensagens, detecção de erros, validação e controle de fluxo de mensagens (LUGLI; SANTOS, 2009).

O protocolo de rede CAN permite a comunicação multimestre, embora possa também ser desenvolvida no sistema mestre escravo. Sendo de topologia livre, identifica mensagens e não dispositivos (FREESCALE, 1998).

A norma ISO 11898 define sua camada física, que utiliza geralmente cabo de par trançado e seus níveis lógicos são transmitidos de maneira diferencial, chamados de nível recessivo e dominante, também define as taxas de transmissão de dados (LAWRENZ, 2013). A especificação CAN 2.0 A feita pela empresa Bosch define o tipo de mensagens de dados para o padrão (BOSCH, 1998).

Tais características fazem com que este protocolo de comunicação seja ideal para sistemas que necessitem de confiabilidade na transmissão das mensagens, uma vez que a rede possui maneiras de detectar e gerenciar os erros de comunicação que possam surgir durante a transmissão e recepção, garantindo assim que todas as mensagens sejam enviadas (BOSCH, 1991).

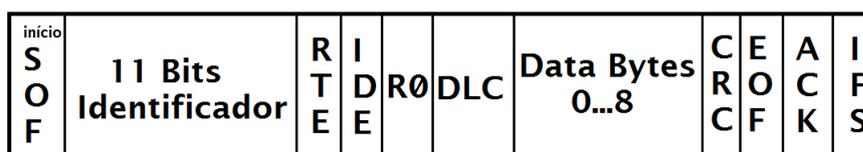
A característica multimestre permite que todas as unidades tenham acesso ao barramento e possam transmitir conteúdo segundo a arbitração do barramento, respeitando a priorização das mensagens, garantindo assim que duas mensagens não sejam transmitidas simultaneamente. Devido a sua estrutura, é uma rede de baixo custo de implementação e também não exige que os dispositivos presentes possuam conexões diretas com as demais, bastando apenas possuir um controlador CAN conectado ao barramento

Todos os controladores presentes em uma rede CAN devem ter um mesmo dicionário

de mensagens implementado, sendo ele responsável pela camada de aplicação da rede. Cada dispositivo presente na rede deve conter os identificadores de cada mensagem para que possa processá-los da maneira requerida. Um controlador na rede pode enviar uma mensagem e todos os outros dispositivos irão recebê-la. Porém, apenas àqueles cuja mensagem se destina irão processá-la. Por meio do identificador das mensagens, é realizada a ordem de prioridade de cada mensagem na rede, quanto menor o valor do identificador maior a prioridade da mensagem (ZUBERI; SHIN, 1996).

A especificação CAN 2.0 A define que as mensagens são compostas por: um campo de início da mensagem, arbitragem, controle, dados e checagem de erros (BOSCH, 1991). O identificador de mensagem pode conter até onze bits e até oito bytes para o campo de dados. A Figura 71 apresenta um esquema de como é configurada uma mensagem para o protocolo CAN utilizando esta especificação.

Figura 71: Configuração de mensagem especificação CAN 2.0 A



Fonte: próprio autor

- *SOF* - *Start of Frame* - Bit que marca o início da mensagem a ser transmitida;
- Identificador de 11 bits. O identificador estabelece a prioridade de transmissão da mensagem, quanto menor o valor, maior sua prioridade;
- *RTR* - *Remote Transmission Request* - É o bit que sinaliza quando uma informação é requisitada de outro nó da rede;
- *IDE* - *Identifier Extension* - Bit que sinaliza se a mensagem é transmitida com o identificador de 11 bits ou 29 bits (versão estendida);
- *R0* - Bit de reserva, atualmente sem uso;
- *DLC* - *Data Length Code* - Armazena o número de bytes de dados que está sendo transmitido;
- *Data* - Campo composto de até 8 bytes, que armazena o conteúdo da mensagem a ser enviada ou recebida, os 8 bytes são também referenciados como frames;
- *CRC* - *Cyclic Redundance Check* - Campo de verificação de redundância cíclica, contém os bits utilizados para implementação do código de detecção de erros. O código é calculado de acordo com um polinômio específico definido para o CAN, introduzindo uma redundância que permite ao receptor deduzir se houveram erros de transmissão;

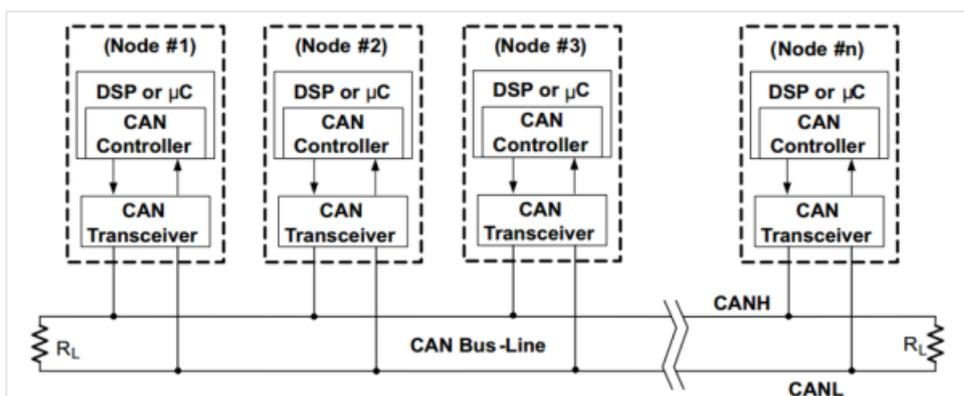
- *ACK - Acknowledge* - Campo de confirmação, contém 2 bits, um bit denominado ACK, recessivo, que é sobrescrito por bits dominantes transmitidos de um outro nó que recebe a mensagem com sucesso. O segundo bit é um delimitador;
- *EOF - End of frame* - Indica o fim da mensagem e também é utilizado para detecção de erros, possui 7 bits recessivos;
- *IFS - Interframe Space* - Utilizado pelo controlador CAN para mover um frame recebido corretamente para a posição correta no *buffer* de mensagem.

A checagem de erros é feita por meio de bits que são incrementados quando é detectado pelo protocolo algum tipo de erro e decrementado quando a mensagem é reenviada com sucesso, até certo limite de erros um dispositivo fica em modo de erro ativo (*error active*) e continua trocando mensagens na rede.

Quando ultrapassa um limite, entra em modo de alerta (*warning*) indicando elevada taxa de erros no dispositivo, caso um dispositivo na rede ultrapasse o limite de alerta entra em modo de erro passivo (*error passive*) e para automaticamente de se comunicar. A forma como CAN trata os erros presentes na rede, caso existam, torna muito confiável (PATURKAR; KARULE; DIKHOLKAR, 2014).

O barramento é composto por um par trançado de cabos, denominados CANH (CAN HIGH) e CANL (CAN LOW). Nas extremidades do barramento é necessário adicionar resistores de 120 Ohms para manter um nível constante de impedância e evitar a reflexão de sinal entre as vias. A Figura 72 apresenta um exemplo de barramento CAN com topologia física formada por um barramento com ramificações.

Figura 72: Exemplo de barramento CAN

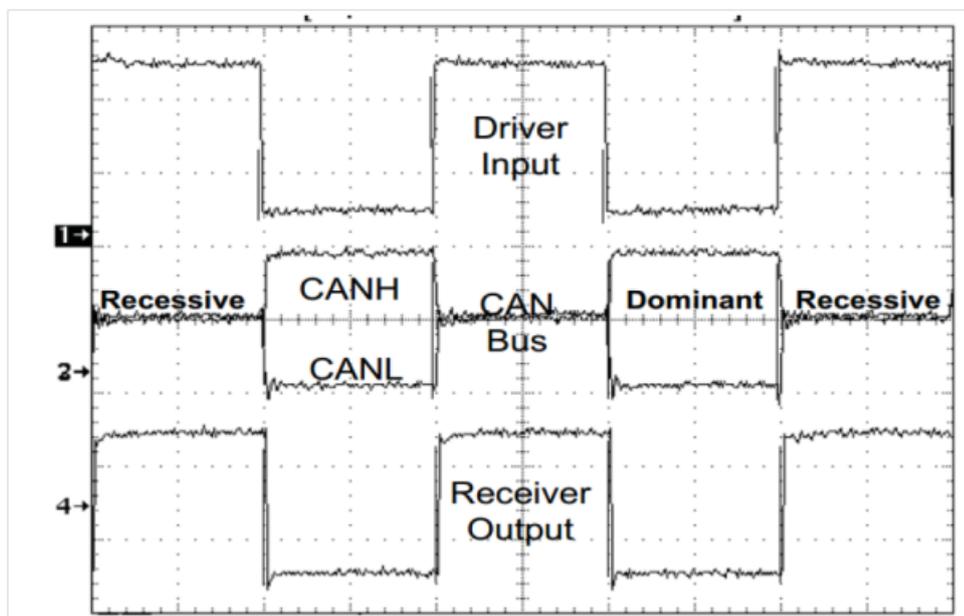


Fonte: (BOSCH, 1998)

A transmissão de mensagens é feita de forma diferencial no barramento, isso significa que os sinais de bits altos ou baixos são baseados na diferença de tensão entre as duas vias. Um bit dominante é caracterizado com um diferencial de em torno de 2 V, enquanto que para o bit recessivo não há diferença de tensão entre as duas linhas, como mostrado na

Figura 73.

Figura 73: Transmissão diferencial de mensagens no barramento CAN



Fonte: (CORRIGAN, 2002)

Apesar do barramento transmitir à taxas de até 1Mb/s, é necessário considerar algumas características e fenômenos envolvidos na transmissão de dados por uma rede. Quando uma rede é muito extensa, os atrasos na propagação de sinais começam a ter efeito significativo. Por isso, a taxa de transmissão em uma rede CAN é inversamente proporcional ao seu comprimento (DAVIS et al., 2011). A Tabela 4 apresenta uma relação do comprimento do barramento CAN e sua respectiva taxa de transmissão.

Tabela 4: Relação de comprimento do barramento e taxa de transmissão

Comprimento do Barramento	Taxa de transmissão
25 m	1 Mb/s
100 m	500 kb/s
250 m	250 kb/s
500 m	125 kb/s
5000 m	10 kb/s

Fonte: (CORRIGAN, 2002)

Todos os nós são compostos por três elementos: a unidade de processamento, um transceiver e um controlador CAN. Para os usuários iniciantes, é sempre levantada a questão da necessidade do uso do transceiver, ao invés de uma conexão direta do controlador ao barramento. Fato é que essas duas unidades possuem funções bem distintas.

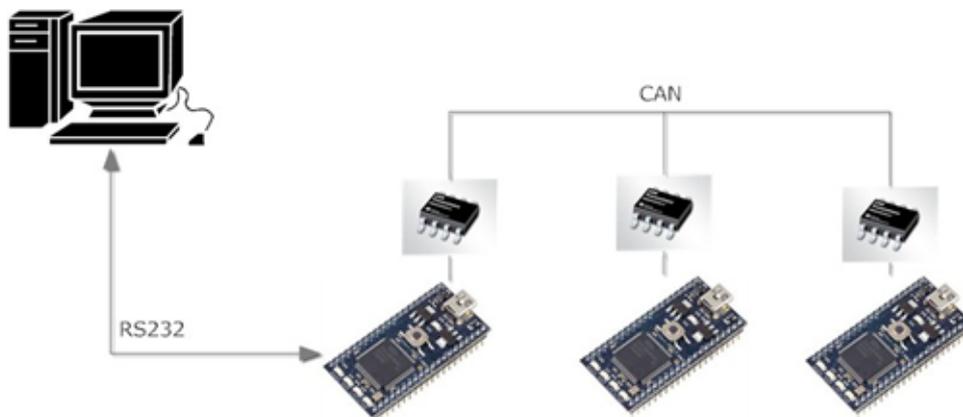
O controlador CAN é responsável por criar as mensagens, formata-las no padrão do protocolo de comunicação e também por realizar a interface com o microcontrolador.

Já o transceiver possui como função principal fazer a conversão de sinais elétricos que representam os bits no barramento CAN para os sinais que os representam no controlador CAN.

Em nosso caso, cada subsistema do padrão de frequência tem como dispositivo de controle embarcado um LPC1768, que possui controladores CAN nativos em seus recursos periféricos de *hardware*, possibilitando o uso de rede CAN em nosso sistema, apenas necessitando do uso de transeivers externos que fazem a conversão dos níveis de tensão (MBED, 2016).

Para validar o uso da rede CAN em nosso projeto fizemos um protótipo simplificado de rede com três kits Mbed, em uma matriz de contatos, comunicando-se com o computador *host* via comunicação serial. Na Figura 74, podemos ver o esquema utilizado para experimento de validação da rede CAN nos microcontroladores.

Figura 74: Experimento de validação para rede CAN nos microcontroladores LPC1768



Fonte: próprio autor

Foi implementado um dicionário de dados simplificado com apenas algumas mensagens. Em dois dos microcontroladores foram colocados botões e leds e por meio da rede acionamos os LEDs e fizemos a leitura do estado dos botões, além de recebermos algumas configurações programadas em cada um. Um dos kits fez interface com o *host*, gerenciando as informações e enviando para o controle de usuário. Com este experimento, foi possível validar o recurso do microcontrolador e validarmos a idéia do protocolo de aplicação proprietário que estamos desenvolvendo para uso apenas no padrão atômico de frequência.

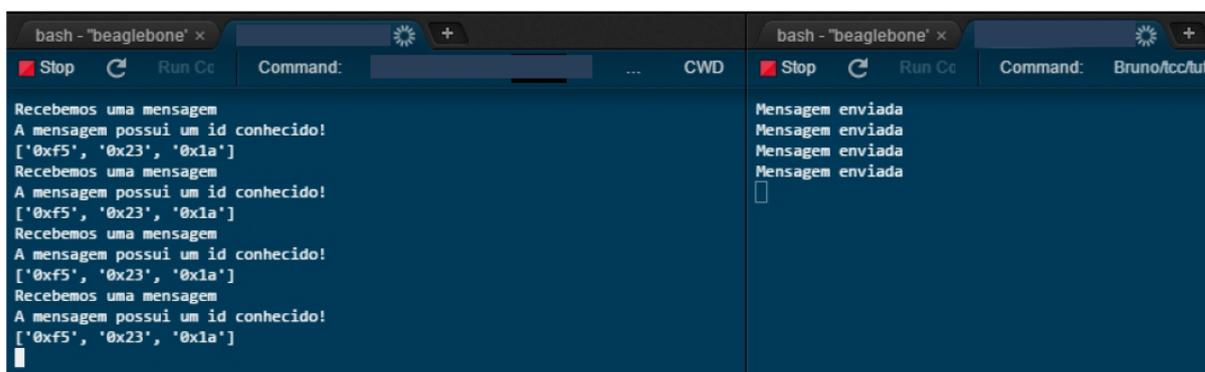
Agrupamos os programas em pares, pois cada par é composto de um programa que envia dados (TX) e outros que os receberá (RX). Assim o primeiro par contém os

programas (txsimples.py) e (rxsimples.py).

O primeiro programa envia periodicamente (a cada 1 segundo) uma mensagem com conteúdo e identificador fixos. Não há nenhum algoritmo complexo no código e o programa se limita apenas a esta tarefa. Inspirou-se no comando cansend, que no terminal envia uma mensagem para a rede.

O segundo programa foi inspirado no comando candump. Ele tem por função monitorar todas as mensagens recebidas pela rede. Quando uma nova mensagem é recebida, ele verifica se o identificador da mensagem possui o valor esperado e mostra o conteúdo da mensagem. A [Figura 75](#) ilustra o funcionamento simultâneo dos programas.

Figura 75: Programas de teste de envio e recebimento de mensagem CAN na BeagleBone Black



```
bash - "beaglebone" x
Command:
CWD
Recebemos uma mensagem
A mensagem possui um id conhecido!
['0xf5', '0x23', '0x1a']
Recebemos uma mensagem
A mensagem possui um id conhecido!
['0xf5', '0x23', '0x1a']
Recebemos uma mensagem
A mensagem possui um id conhecido!
['0xf5', '0x23', '0x1a']
Recebemos uma mensagem
A mensagem possui um id conhecido!
['0xf5', '0x23', '0x1a']
Recebemos uma mensagem
A mensagem possui um id conhecido!
['0xf5', '0x23', '0x1a']

bash - "beaglebone" x
Command: Bruno/acc/atu
CWD
Mensagem enviada
Mensagem enviada
Mensagem enviada
Mensagem enviada
```

Fonte: próprio autor

Os programas iniciais permitiram adquirir os conhecimentos básicos do uso do Python com os drivers CAN. O manuseio dos dados, sejam dos identificadores ou do conteúdo das mensagens e formas de envio e recebimento, ainda que simples, são fundamentais para avançar na complexidade da programação nos permitindo concretizar os objetivos.

A partir de então, desenvolveram-se novos programas, com funções adicionais, envolvendo leitura de arquivos, processamento de dados pré e pós envio na rede. Muitas otimizações de código foram necessárias, bem como ajustes conforme a necessidade da aplicação, resultando assim nas versões finais dos programas (rxdados.py) e (txdadosv2.py).

O programa txdadosv2 é o programa responsável pelo envio dos dados na rede. Mais que isso, ele lê o conteúdo de um arquivo de texto e o envia para o barramento. O arquivo de texto possui dados no formato definido previamente pelo projeto da aplicação. Nele, temos como primeiro elemento da linha inicial, o valor que será o identificador das mensagens, enquanto o restante do conteúdo se refere aos dados que deverão ser enviados.

A [Figura 76](#) apresenta o arquivo de texto que contém a configuração para o módulo de saídas digitais, primeira linha contém os valores de saída das portas digitais e a segunda refere-se aos tempos em elas manterão esse valor ativo na respectiva saída.

Figura 76: Arquivo de texto de configuração do módulo de saídas digitais

1	0x060	255	128	0	0b1110111	0x4C	0b11101101	86	0x7A
2		32354	5781	4	10005	25123	159875	9867	369

Fonte: próprio autor

O programa de envio segue uma lógica sequencial bastante simples. Ele lê os dados do arquivo, os processa e os envia na rede. Por conveniência de projeto, é necessário que os dados sejam enviados em pares (valor, tempo) com o identificador da mensagem pré-definido no mesmo arquivo. Como exemplo uma mensagem de identificador 60_{16} e conteúdo (255, 32354), 255 valor para saída de oito bits e 32354 tempo em milissegundos em que permanecerá com o valor ativo.

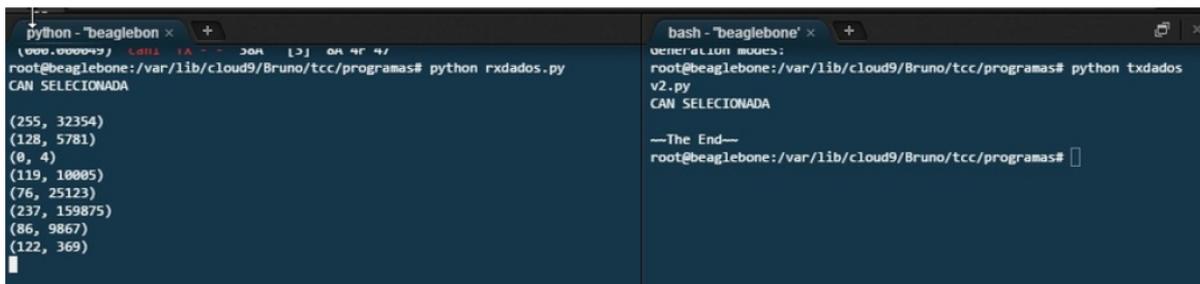
Um dos problemas encontrados para enviar o conteúdo das mensagens CAN foi formatar o valor a ser enviado, no caso os valores de tempo poderiam conter valores de milissegundos que seriam maiores que os oito bits de cada dado limite de protocolo CAN. Como já citado anteriormente, as mensagens são compostas por oito bytes de dados cada. Assim, cada posição fica limitada a valores de 0 a 255 (ou 0 a FF, em hexadecimal).

Normalmente, seria enviado o par (valor, tempo) na mesma mensagem, cada um ocupando um frame na mensagem. Como os valores de tempo são escritos em milissegundos, é razoável esperar que eles facilmente ultrapassem o valor de uma frame. Por isso, a solução encontrada foi separar os algarismos de valor de saída e tempo, armazenando cada dígito em uma posição. Portanto, em uma mensagem que contém 8 frames, o primeiro contendo o valor da porta lógica, e os demais os algarismos do valor de tempo em milissegundos. Tal estratégia permitiu que valores de tempo, antes limitados à um máximo de 255 ms pudessem ser enviados com até cem mil segundos.

Então, após o par ser processado e a mensagem formatada no modelo descrito, ela é enviada na rede. O processo continua até que todo o conteúdo do arquivo seja enviado. Como fruto dos diversos programas criados anteriormente, a versão final é capaz de trabalhar com valores decimais, hexadecimais e binários, desde que escritos da maneira correta a ser interpretada pela linguagem e pelo algoritmo de programa.

Na [Figura 76](#), vemos os números decimais representados pela maneira decimal, hexadecimais representados por ‘0x’ antes do valor e binários representados pelo prefixo ‘0b’. Tal ajuste permite uma maior liberdade do usuário ao gerar os arquivos de texto.

Figura 77: Funcionamento dos programas python de comunicação CAN



```
python - "beaglebon" x +
(000.0000000) 0001 1A 00 00A [0] 0A 4F 4F
root@beaglebone:/var/lib/cloud9/Bruno/tcc/programas# python rxdados.py
CAN SELECIONADA
(255, 32354)
(128, 5781)
(0, 4)
(119, 10005)
(76, 25123)
(237, 159875)
(86, 9867)
(122, 369)

bash - "beaglebone" x +
generation mmes:
root@beaglebone:/var/lib/cloud9/Bruno/tcc/programas# python txdados
v2.py
CAN SELECIONADA
--The End--
root@beaglebone:/var/lib/cloud9/Bruno/tcc/programas#
```

Fonte: próprio autor

O programa (`rxdados.py`) recebe as mensagens da rede e as processa. O programa foi criado para receber as mensagens no formato criado pelo programa anterior. Ele tem como output os pares (valor,tempo) recebidos.

Em suma, o programa receberá e processará cada par de uma vez. O valor das saídas lógicas não precisa de nenhum tipo de tratamento. Já o valor de tempo, por estar fragmentado, é necessário agrupar os algarismos da forma original. Para isso foi feita uma função responsável por esta junção. A partir daí, o par de informações é separado em duas variáveis no programa, prontas para serem utilizadas. A [Figura 77](#) exibe a execução simultânea dos programas finais do lado esquerdo vemos a execução do programa de recepção (`rxdados.py`) e do lado direito vemos o programa de envio de mensagens (`txdadosv2.py`).

Note que, aparentemente, os valores estão diferentes do arquivo texto apresentado. Porém, vale lembrar que alguns valores no arquivo estão em uma base numérica diferente, enquanto na [Figura 77](#) todos são representados na base decimal.

O programa responsável pelo recebimento de mensagens deverá ser usado como template para os programas de cada módulo do relógio atômico. Por ser um programa generalista, que apenas faz o processamento dos dados, ele precisa apenas ser personalizado conforme a função de cada módulo. Ou seja, deverão ser acrescentadas funções e ações a serem tomadas baseadas no conteúdo recebido.

Com o Mbed, os resultados também foram promissores. A primeira comunicação, realizada de forma básica e através dos terminais e comandos simples mostrou-se rápida e eficiente. Foram testados os envios e recebimentos em ambos os dispositivos que se comunicaram com sucesso.

Depois de verificado que a comunicação estava funcional, os próximos testes foram realizados para simular o propósito da aplicação, com a Beaglebone enviando as mensagens (através do programa em Python `txdadosv2.py`) e a Mbed recebendo e processando os dados, utilizando um programa em linguagem de programação C inspirado no algoritmo

criado em Python. A

A BeagleBone envia mensagens pela rede, que são recebidas pela Mbed e separadas em dois vetores, um contendo o valor das saídas digitais e outro contendo os valores de tempo. Os resultados são apresentados pela [Figura 78](#).

Figura 78: Comunicação realizada entre BeagleBone Black e Mbed via rede CAN para configuração de saídas digitais

```

192.168.7.2 - PuTTY
root@beaglebone:/var/lib/cloud9/liepo/programas# python txdadosv2.py
CAN SELECIONADA
--The End--
root@beaglebone:/var/lib/cloud9/liepo/programas# python txdadosv2.py
CAN SELECIONADA
--The End--
root@beaglebone:/var/lib/cloud9/liepo/programas# █

COM4 - PuTTY
CanRx--> id: 0x60 dlc: 4 data: 7a 3 6 9
for:10
for:100
Dado:3 acm:300 soma:300 pot:2for:10
Dado:6 acm:60 soma:360 pot:1Dado:9 acm:9 soma:369 pot:0soma final:369tempo:36
DESCREVENDO ARQUIVO
vetor std_value_arq[0]:255
vetor std_value_arq[1]:128
vetor std_value_arq[2]:10
vetor std_value_arq[3]:119
vetor std_value_arq[4]:76
vetor std_value_arq[5]:237
vetor std_value_arq[6]:186
vetor std_value_arq[7]:122
vetor std_time_arq[0]:500
vetor std_time_arq[1]:32354
vetor std_time_arq[2]:5781
vetor std_time_arq[3]:4
vetor std_time_arq[4]:10005
vetor std_time_arq[5]:25123
vetor std_time_arq[6]:159875
vetor std_time_arq[7]:9867
ARQUIVO COMPLETO
  
```

Fonte: próprio autor

Com o sucesso evidenciado pela comunicação entre as duas plataformas, através da rede CAN utilizando os programas desenvolvidos e encontrando e resolvendo os detalhes de *hardware*, validamos o uso satisfatório da rede de comunicação CAN bus para obter a comunicação entre os módulos que compõem o relógio atômico transportável.

4.5 Sistema de processamento e controle local

Devido ao fato de se ter optado por uma abordagem de sistema distribuído visando maximizar a independência dos subsistemas que compõem o padrão de frequência compacto transportável de átomos frios, decorre à necessidade de processamento e controle local de cada componente envolvido no processo de interogação dos átomos de Césio.

Atualmente, com a diminuição no custo de componentes eletrônicos, existem diversas opções no mercado de processadores, microcontroladores e placas de desenvolvimento para sistemas embutidos que disponibilizam diversos recursos.

Logo, uma tarefa importante para o desenvolvimento do projeto em sua fase inicial é a escolha de um sistema de processamento e controle embarcado que atenda os requisitos de projeto visando: custo benefício, arquitetura, disponibilidade de recursos de *hardware* e *software*, velocidade de processamento e confiabilidade.

Nesse sentido, o mercado oferece várias opções de arquiteturas 8 bits, 16 bits, 32 bits, de diversos fabricantes com recursos e características bastante distintas. No quesito

velocidade, a diferença entre uma arquitetura ARM (Advanced RISC Machine) de 32 bits e as outras de 16 e 8 bits encontra-se entre dezenas de MHz (MIYADAIRA, 2012).

A relação de custo é bastante atrativa: segundo uma pesquisa no site brasileiro de uma distribuidora de componentes eletrônicos realizada em 09/2015, um chip do PIC18F4550 de 8 bits custava 37,49 reais, um MSP430 de 16 bits custava 28,56 reais, e um LPC1768 de 32 bits custava 42,91 reais.

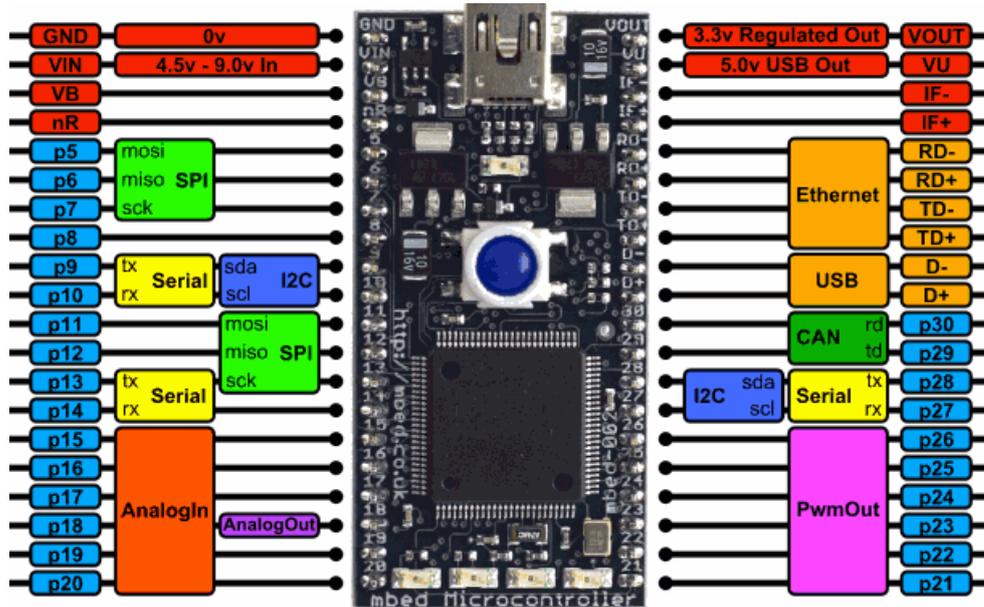
Uma das principais vantagens dos microcontroladores de arquitetura ARM, disponibilizados por diversos fabricantes que o utilizam sob licença de propriedade intelectual, é a facilidade de trabalhar cálculos com 32 bits, suporte a sistemas operacionais e ter tornado-se padrão industrial de mercado superando os recursos de seus concorrentes de outras arquiteturas (PEREIRA, 2007).

Para a unidade de controle e processamento local, é fundamental a aplicação deste tipo de tecnologia, devido a arquitetura escolhida para o sistema de instrumentação do relógio, em que há sistemas de laser, microondas, geração e aquisição de sinais trabalhando de maneira independente umas das outras e gerenciados por um computador de supervisão interligado por uma rede local. Cada elemento do sistema funciona como uma unidade inteligente que realiza sua função na operação do ciclo com independência do controle global, uma vez que suas funções são apenas monitoradas.

Por exemplo, a unidade de geração de padrões digitais utiliza os dados de configuração recebidos do *host* de supervisão, por meio da rede, uma única vez e os armazena em memória. Portanto, o microcontrolador, tem por função, controlar a operação de cada subsistema e fazer interface com o sistema de controle global. Dentre as várias opções, optou-se pelos microcontroladores LPC1768, fabricados pela NXP, que são voltados para aplicações embarcadas, com arquitetura ARM Cortex – M3, operação de CPU até 100 MHz, 512 kB de memória *flash*, 64 kB de memória de dados (RAM), 2 controladores de barramento CAN, 8 canais de entrada analógica de 12 bits e um canal de saída analógica de 10 bits (NXP, 2014).

Além disso, possuímos no laboratório o kit de desenvolvimento Mbed, que possui como núcleo um microcontrolador LPC1768, desenvolvido principalmente para projetos de prototipagem rápida voltados para aplicações que exploram o uso de interfaces de rede e Internet das coisas (MBED.ORG, 2015).

Esse kit mostra-se como uma boa alternativa para prototipagem e programação dos microcontroladores, pois oferece como plataforma de *software* uma SDK (software development kit) open source *online*. Dispensando a instalação de compiladores, possuindo bibliotecas em linguagem C para o core e periféricos disponíveis no LPC1768 e suporte ao compartilhamento de códigos fonte para comunidade de desenvolvedores e usuários da plataforma (PECHONERI et al., 2016).

Figura 79: Kit de *hardware* para desenvolvimento Mbed

Fonte: (TOULSON; WILMSHURST, 2017)

O *hardware* é compatível com matrizes de contato (protoboards) para facilitar protótipos de circuitos, disponibilizando 40 terminais. Entre eles estão 2 portas CAN, 6 entradas analógicas, 1 saída analógica e várias portas digitais de entrada e saída.

A Figura 79 traz o esquema de pinos do Mbed, possuindo uma memória tipo *flash* para sua programação. O computador *host* faz interface com o kit como um disco removível: o código é compilado no servidor através do programa escrito em linguagem C, baixado e carregado na memória presente no kit de *hardware* do microcontrolador. Quando o kit é reiniciado o código na memória externa é gravado na memória de programa (ROM) do LPC1768, facilitando a programação por dispensar o uso de gravadores externos.

Portanto, o kit de *hardware* e sua plataforma de desenvolvimento de *software* (developer.mbed.org) formam um ambiente de integrado bastante ágil para o desenvolvimento de programação do *firmware* do sistema de instrumentação utilizado no relógio e prototipagem de seu circuito eletrônico.

4.6 Sistema gerador de padrões de saída digital

O *chip* do microcontrolador LPC 1768 possui ao todo 100 terminais, porém o Mbed disponibiliza 26 pinos digitais de entrada/saída (I/O) nos terminais de 5 a 30. Que podem ser configurados tanto como entrada quanto como saída de sinal digital, ou seja, 0 ou 3,3V. Enquanto é possível utilizar os terminais como simples saídas ou entradas digitais, praticamente todos possuem funções secundárias que estão conectadas aos periféricos do microcontrolador.

No desenvolvimento de um dispositivo que gere uma sequência de padrões binários de saída em intervalos de tempo bem definidos são requisitos: capacidade de armazenar dados de valores binários, referentes ao estado do ciclo de funcionamento do padrão atômico, armazenar os valores de tempo que a saída deve permanecer com determinado valor binário, combinar os valores binários de saída com o tempo de cada um gerando as formas de onda e ser dotado de algum tipo de interface de comunicação para que configure os valores de tempo e dado de saída sem ter que necessariamente alterar a configuração do dispositivo. Além disso, é desejável uma entrada que dispare a geração cíclica.

As portas do LPC1768 são divididas em *ports* de 32 *bits*, como a arquitetura de seu processador. Devido a este fato, pode-se escrever uma palavra binária no registrador da porta de saída utilizada no formato de 32 *bits*, porém escrevendo apenas nos pinos que são de interesse. Utilizamos como saída digital os pinos do *port 0* do 4 ao 11, conectados aos terminais 30, 29, 8, 7, 6, 5, 28, 27, do Mbed.

Para desenvolver o código fonte do microcontrolador foram disponibilizadas algumas APIs (*Application Programming Interface*) que permitem trabalhar com *hardware* e periféricos do LPC1768 em alto nível, se comparado a programação baseada em configuração de registradores. Para tratamento de portas digitais o pacote de desenvolvimento de *firmware* do Mbed disponibiliza o comando (*PortOut*) permite a escrita diretamente de um valor binário na porta de maneira direta, o que torna a execução programa mais rápida, porém necessita que os outros bits da porta sejam mascarados para que possam ser utilizados por outras interfaces.

O kit Mbed, como mencionado anteriormente, possui uma memória do tipo *flash*. Isso permite que os programas leiam e escrevam arquivos na mesma unidade de disco que é usada para programar o microcontrolador Mbed. Uma vez criados, funções de acesso à arquivos padrão do C, são usadas para abrir, ler e gravar arquivos. Isso permite escrever um sistema operacional dedicado, que inicializa o sistema embarcado e gerência seu funcionamento, manipulando dados, sinais, gravando e acessando dados de configuração e informações obtidas pelo sistema em memória não volátil.

Em uma placa customizada sem o uso do kit é possível utilizar o mesmo tipo de sistema, com uso da biblioteca (SD Card File System) que permite o acesso e manipulação de arquivos em memórias externas por meio da interface SPI (Serial Peripheral Interface).

O *firmware* desenvolvido para esse subsistema faz o uso das bibliotecas de acesso as portas digitais, temporização e cria um sistema de arquivos. Com isso é possível ter sempre a última configuração de tempos e dados das saídas atualizados no dispositivo, mesmo se houver algum tipo de falha de energia. Sempre que há uma requisição de comunicação o sistema efetua o armazenamento dos dados em um arquivo de texto padrão na memória externa, depois de efetuar a comunicação satisfatoriamente.

Duas versões de *firmware* foram implementadas, sendo uma delas utilizando comunicação CAN para configurar os dados do sistema por meio de rede. Outra visando módulos independentes para serem utilizados em experimentos diversos utilizando comunicação serial RS232. Sendo assim, pode-se configurar e utilizar o módulo de maneira geral sem necessariamente precisar de uma rede local.

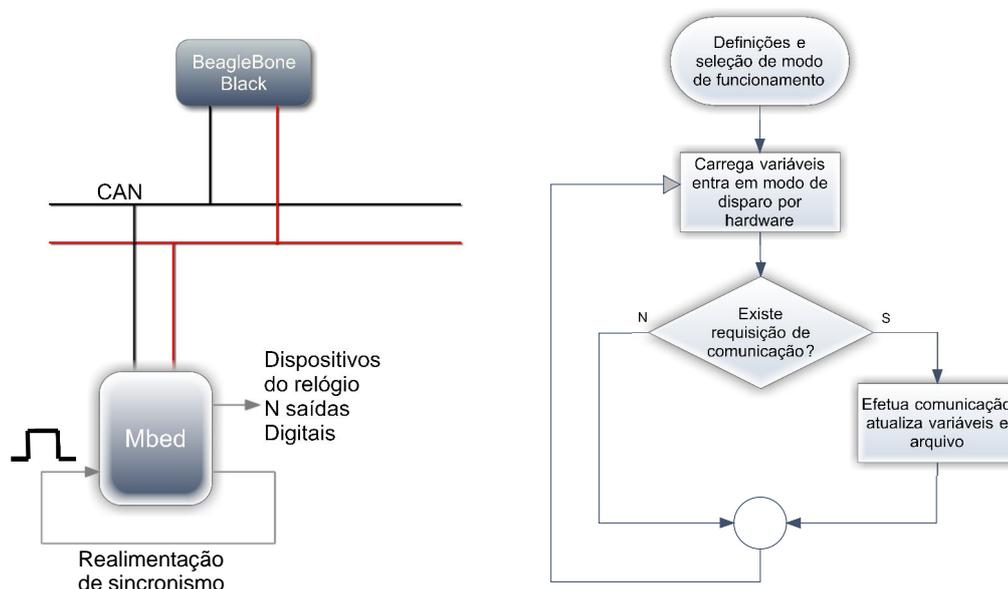
De maneira geral, o programa embarcado no LPC1768 primeiramente realiza uma série de definições e inicializações. Define as constantes de programa, define o dicionário de mensagens da rede CAN, seleciona o modo de funcionamento dos periféricos do microcontrolador que serão utilizados, inicializa as variáveis globais, monta os protótipos das funções que serão chamadas no decorrer do programa.

A rotina principal inicialmente chama a função que carrega os valores nas variáveis de tempo e padrão binário, a partir dos dados existentes no arquivo de texto, para que a sequência temporal digital do ciclo atômico possa ser executada. Em seguida, habilita o desvio de programa devido interrupção por *hardware* utilizando borda de subida no pino 14 do Mbed.

Essa interrupção é fundamental na estrutura do subsistema, pois ela dispara a execução da sequência temporal, ou seja, ela recebe o estímulo elétrico externo e desvia o programa para uma função que faz a chamada da execução do padrão temporal pertencente do ciclo de interrogação dos átomos. Dessa forma, mantendo o sincronismo do sistema por meio desse disparo de *hardware*.

Após, é selecionada a frequência de trabalho da rede CAN ou a velocidade com a qual o dispositivo irá se comunicar na rede, esse parâmetro depende da configuração da rede, porque todos os dispositivos presentes na rede devem necessariamente possuir mesma velocidade de comunicação. Escreve as mensagens de recepção e transmissão dos dados, em seguida, opera os métodos para o devido tratamento dos dados.

Entrando em laço e o funcionamento do módulo passa a ser comandado pelo disparo de *hardware* que executa o tratamento e chamadas das funções que efetuam a sequência temporal até que ocorra uma requisição de comunicação para uma nova configuração do módulo. Nesse caso, o programa chama uma função que atualiza os dados das variáveis e edita o arquivo de texto, mantendo o sistema atualizado sempre com a última configuração que foi utilizada para o ciclo de interrogação atômica. A [Figura 80](#) apresenta uma representação geral da interação de programa embarcado e circuito desenvolvido para este módulo do relógio.

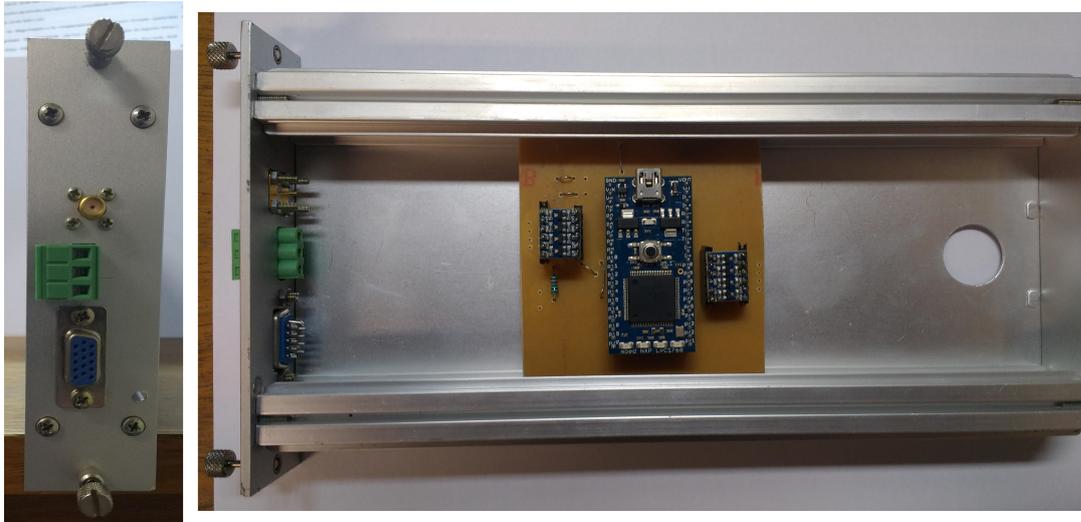
Figura 80: Esquema geral de *hardware* e *firmware* do módulo de saídas digitais

Fonte: próprio autor

Durante a fase de desenvolvimento do programa, os testes de configuração e experimentos com o microcontrolador foram realizados em matriz de contatos, esse tipo de abordagem ajuda bastante no desenvolvimento de protótipos rápidos de *hardware*. Utilizando instrumentos disponíveis no laboratório, foi possível chegar a um protótipo inicial de circuito para o módulo de saídas digitais. Nesse primeiro circuito utilizamos o próprio kit Mbed como elemento central da placa. Fizemos a interface de potência que converte o nível de tensão de saída de 3,3V para 5V utilizando mosfets BSS138 em SMD (*surface mount Device*).

O circuito foi alocado dentro de uma caixa metálica padrão para rack, para a conexão das saídas utilizamos um conector tipo DB15. A [Figura 81](#) apresenta uma vista frontal e lateral do sistema colocado em sua caixa para encaixe no rack de instrumentos. Embora, tenhamos utilizado 8 saídas para essa configuração do módulo conforme já mencionado a porta disponibiliza vários pinos de I/O, logo utilizar mais sinais digitais ou expandir a quantidade de portas de saída para o módulo é totalmente factível. Este fato favorece sua aplicação nos experimentos, pois para diferentes métodos de interrogação do ciclo atômico pode surgir a necessidade de acionar algum dispositivo que precisa ser ligado ou desligado durante o processo.

Figura 81: Placa de circuito do modulo de saídas digitais vista frontal e lateral



Fonte: próprio autor

O Mbed é um projeto tanto de *hardware* quanto de *software* abertos idealizado pela própria ARM para popularizar e facilitar o uso e programação de seus sistemas. Logo, permitindo a criação de placas customizadas para as necessidades do usuário tendo como ponto de partida o projeto original do kit ou a criação de circuitos caseiros idênticos ou baseados no Mbed (TOULSON; WILMSHURST, 2017).

A próxima fase do projeto do modulo de saídas digitais realizará o projeto de circuito totalmente customizado em que o kit será substituído pelo chip do microcontrolador e o circuito de protótipo será incorporado com os periféricos necessários como: reguladores de tensão, pinos de gravação, circuitos osciladores ou de tratamento de clock.

No laboratório, foi desenvolvido um kit baseado no Mbed em que fizemos o uso de *hardware* mínimo, esse kit foi necessário para que pudéssemos desenvolver nossos testes sem correr o risco de estragar um kit original e também como alternativa de recurso de mais baixo custo, uma vez que o circuito é montado totalmente no laboratório, apenas as placas do circuito precisam ser feitas por empresa terceira devido ao fato do circuito ser sofisticado demais para os recursos disponíveis, até então, no laboratório. A Figura 82 apresenta o circuito do kit customizado que fizemos para os testes de *hardware*. Seu uso foi fundamental nos testes de fontes de *clock* e análise de desempenho de interrupções.

Utilizando um relógio atômico de feixe térmico comercial modelo 5071A como sistema de referência, presente em nosso sistema de avaliação de sinais de tempo e frequência, alimentamos a entrada de fonte de *clock* externa de um contador modelo SR620 Stanford Research Systems, com precisão de 12 casas decimais depois da virgula da unidade, com sinal de 5 MHz.

A saída de 1PPS do relógio foi utilizada para disparar a contagem do intervalo

Figura 82: Kit Mbed alternativo desenvolvido no laboratório



Fonte: próprio autor

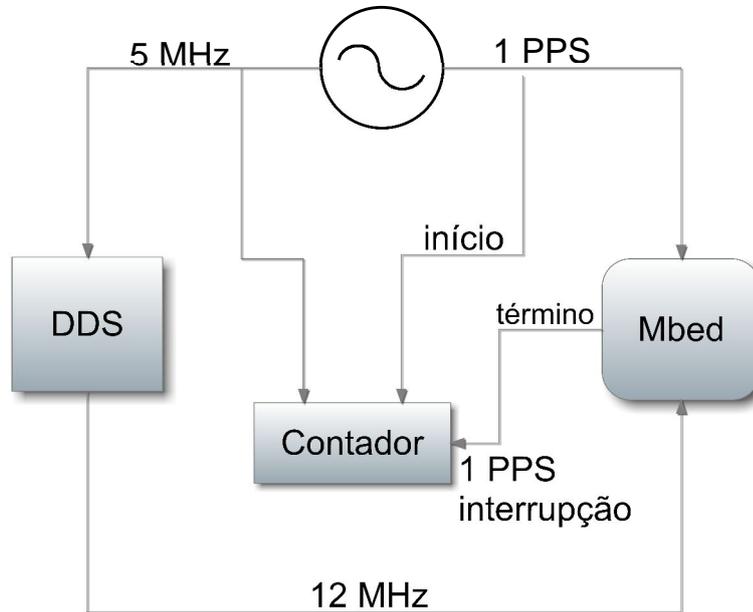
de tempo entre o disparo de uma interrupção por borda do LPC1768 e o atendimento da interrupção. O mesmo sinal de 1PPS foi utilizado para disparar a interrupção no microcontrolador. O pulso do relógio disparava o desvio para rotina de interrupção que atendia realizando um pulso de $1 \mu\text{s}$ em uma de suas saídas digitais, o sinal de saída acionava a parada da contagem.

A medida foi realizada utilizando primeiramente o sinal de *clock* do cristal de 12 MHz presente no kit, posteriormente utilizamos o sinal de 5 MHz para alimentar a fonte de *clock* de um sintetizador de frequências DDS modelo DS345 Stanford Research Systems, que por sua vez, alimentava o microcontrolador com 12 MHz. A [Figura 83](#) apresenta um diagrama de como a medida foi realizada.

O sistema de avaliação de sinais de tempo e frequência que possui os seguintes equipamentos: contador SR620, DDS DS345, relógio 5071A. Além disso, Possui distribuidores de sinal, sistema de GPS e MASER CH1-65. A [Figura 84](#) apresenta o microcontrolador LPC1768 sendo avaliado em estabilidade de interrupção.

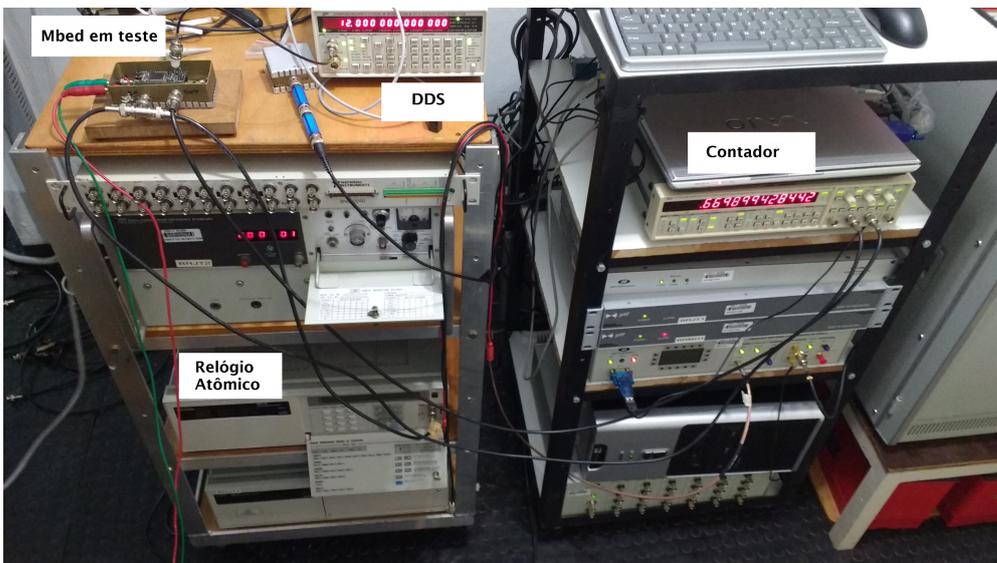
A [Figura 85](#) apresenta o gráfico obtido pelo desvio de Allan dos dados de medição da estabilidade de interrupção do LPC1768 usando as duas fontes de *clock* diferentes. A curva azul mostra a estabilidade usando o cristal de *clock* comum de 12MHz de uso geral em eletrônica, como pode ser visto, embora a curva seja mais linear sua estabilidade no atendimento da interrupção de 1PPS é menor do que a curva verde. A curva verde foi

Figura 83: Diagrama de sistema de medida utilizado no experimento



Fonte: próprio autor

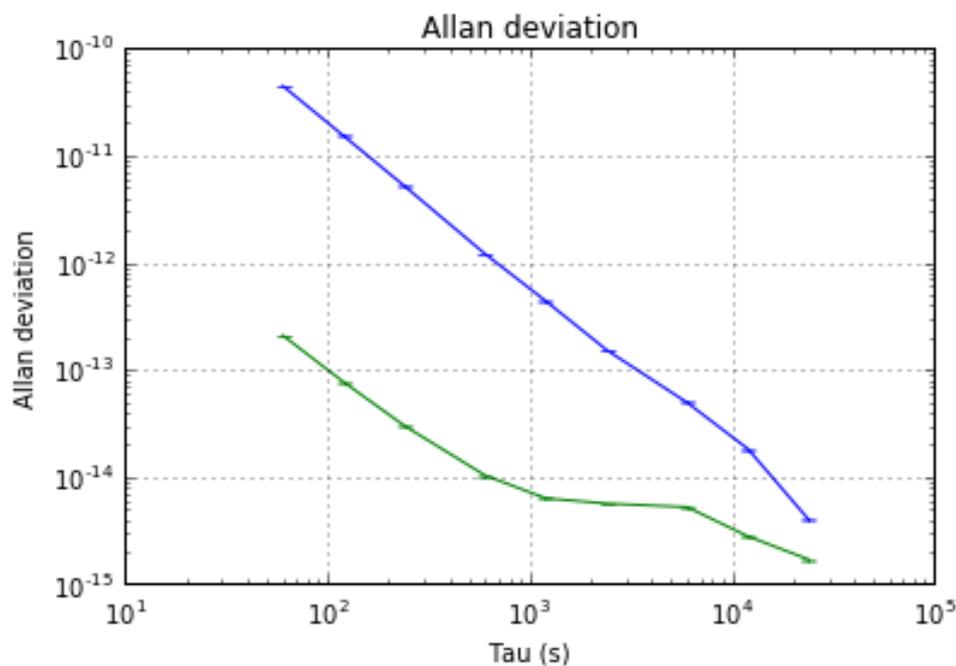
Figura 84: Equipamentos de avaliação de sinais de tempo e frequência



Fonte: próprio autor

obtida com o relógio atômico servindo de *clock* e fonte de interrupção para o LPC1768. Pode-se observar que a estabilidade do atendimento de interrupções seguiu a estabilidade proporcionada pelo relógio atômico. Isso deixa clara a natureza do desempenho do sistema.

Figura 85: Desvio padrão de Allan para atendimento de interrupção do LPC1768



Fonte: próprio autor

Com a medida, torna-se clara a estabilidade com a qual o LPC1768 pode acompanhar a interrupção da fonte. O LPC1768 acompanhou a estabilidade de interrupção de acordo com sua fonte de *clock* porque o sinal de disparo foi o mesmo para ambas as fontes do *clock*. Este resultado mostra que o hardware do microcontrolador torna-se mais confiável no atendimento das interrupções de acordo com a estabilidade da fonte de *clock* utilizada no sistema.

4.7 Sistema de geração de formas de onda analógica para desvios de frequência

Microcontroladores são dispositivos digitais, porém em muitas ocasiões necessitam lidar com sinais analógicos. Para que o dispositivo digital possa interagir com sinais analógicos é necessário converter sua forma digital em valor analógico equivalente. Dessa forma, podendo atuar em processos em que sinais de controle analógicos são requeridos como: controle de motores, iluminação, modulação de tensão, por exemplo. Muitas vezes, servindo como um gerador de formas de onda analógica para diversos fins como: operar curvas de aceleração de motores, atuar na correção de osciladores e etc.

O gerador de formas de onda analógica que é requisitado na arquitetura de instrumentação do relógio transportável consiste de um sistema de computação embarcada que recebe parâmetros de níveis tensão, tempo de permanência em cada nível e tempo para realizar a transição entre os níveis, baseado nessas informações deve processar os dados de

modo que o sistema de DAC (*Digital to Analog Converter*) embutido no hardware forme, em sua saída, ondas baseadas em rampas crescentes, decrescentes e patamares de tensão.

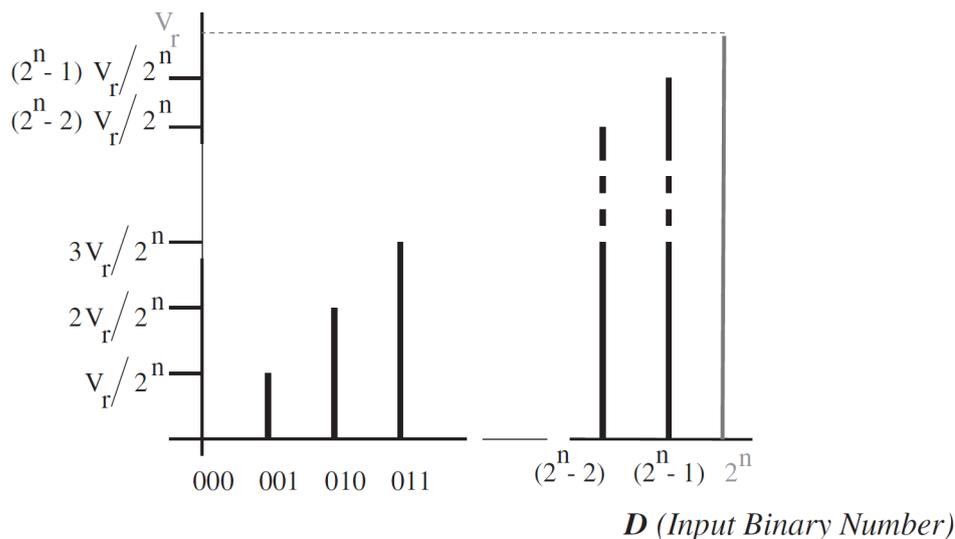
As formas de onda analógica formadas na saída do sistema são utilizadas para realizar desvios de intensidade e frequência de VCO's (*Voltage Controlled Oscillators*) utilizados no relógio, pois cada fase do ciclo de interrogação atômica utiliza pequenos desvios para realizar a manipulação e resfriamento dos átomos, por meio de moduladores acusto-óticos que são atuados com os sinais provenientes dos VCO's.

O circuito interno do conversor digital para analógico do LPC1768 é um tanto complexo, mas podemos entender, de um modo geral, como um bloco que recebe como entrada um conjunto de bits e entrega em sua saída uma tensão analógica proporcional ao valor representado pelos bits em sua entrada. Sendo que a relação entre entrada e saída está baseada na referência de tensão do conversor, que, no caso do LPC1768, utiliza 3,3 V precisa, estável e conhecida em relação ao terra do circuito. Podemos relacionar a saída de tensão analógica com a palavra binária da entrada pela expressão:

$$V_o = \frac{D}{2^n} \cdot V_r$$

Em que, V_r é o valor da referência de tensão, D é o valor da palavra de entrada binária, n é o número de bits nessa palavra e V_o é a tensão de saída. A [Figura 86](#) mostra esta equação representada graficamente. Para cada valor digital de entrada, existe uma saída analógica correspondente.

Figura 86: Características de entrada e saída de conversores de sinal digital para analógico



Fonte: (TOULSON; WILMSHURST, 2017)

É como se estivéssemos criando uma escada de tensão com as entradas digitais. O número de possíveis valores de saída é dado por 2^n e o tamanho do passo por $V_r/2^n$; isso

é chamado de resolução. O valor de saída máximo possível ocorre quando $D = (2^n - 1)$, então o valor de V_r como saída nunca é alcançado. O intervalo do DAC é a diferença entre seus valores de saída máxima e mínima.

O microcontrolador LPC1768 possui um conversor digital analógico de 10 bits de arquitetura *R-String* bufferizado com taxa máxima de atualização de 1 MHz. Dessa forma, existem 1024 posições em sua escala de tensão de 0 a 3,3V, resultando em uma resolução de 3,22 mV (isso quer dizer que podemos percorrer toda a escala de tensão com incrementos de 0,0032).

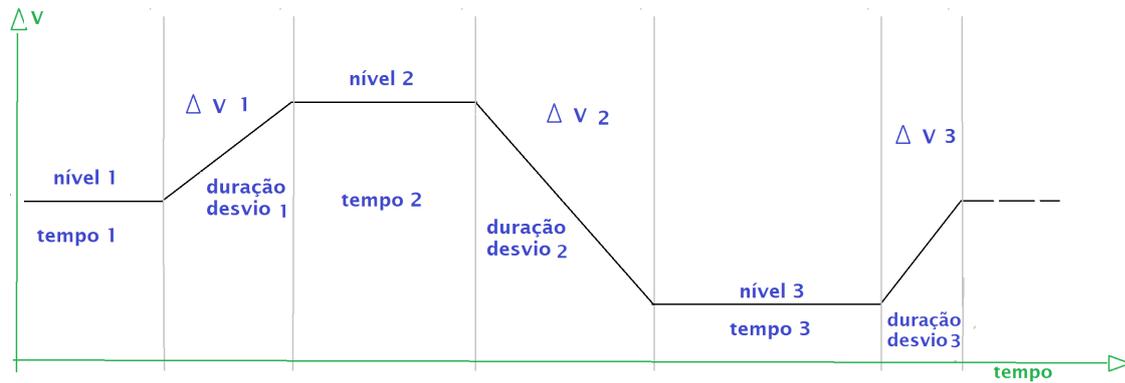
O compilador possui uma API (*Application Programming Interface*) que disponibiliza funções para trabalharmos em alto nível de forma padronizada com sinais analógicos. Podemos inicializar e nomear uma saída, usando `write()` ou `write_u16()`, podendo definir a tensão de saída com um número de ponto flutuante ou com um número hexadecimal.

Em hexadecimal, a função recebe o valor correspondente a saída, por exemplo, 3FF para 3,3V, quando utilizado o ponto flutuante temos a porcentagem da tensão de referência com valores de 0 a 1, por exemplo, se quisermos 1,235 V na saída teremos 0,3742 no parâmetro da função `write()`. Isso corresponde a 37,42% da tensão de 3,3 V da referência do DAC.

O programa do gerador de formas de onda analógica primeiramente define as funções utilizadas pelos terminais de saída do microcontrolador, no caso do LPC1768, a saída do DAC está localizada no pino 18 do kit Mbed. Definimos como base de tempo para os desvios analógicos 100 μ s, na atual versão, definimos 3 níveis fixos de tensão, para formar a onda analógica de saída.

Os parâmetros que serão processados pela rotina de construção de formas de onda são armazenados em memória não volátil, logo, mesmo quando o dispositivo é desligado os dados da última configuração são mantidos. Com isso, temos o carregamento das variáveis em todo processo de reinicialização do dispositivo. Os parâmetros podem ser alterados por rede CAN e fizemos uma versão para comunicação serial, quando é realizada a comunicação o programa processa os dados e atualiza os valores do arquivo.

Figura 87: Parâmetros de forma de onda utilizados pelo sistema para gerar os desvios



Fonte: próprio autor

Para gerar as formas de onda, quando há seu disparo, primeiramente a rotina recebe os vetores que contem os dados dos níveis de tensão, tempo em que deve permanecer em cada nível e tempo que deve levar para transitar de um nível a outro.

A primeira posição do vetor de tensão é colocada na saída, e sua respectiva posição do vetor de tempo é utilizada para temporizar a saída. Em seguida, a primeira posição do tempo de transição é dividida pela base de tempo para os desvios de $100 \mu\text{s}$, resultando num valor inteiro que é utilizado para controlar um laço de repetição. Dentro deste laço a tensão é decrementada ou incrementada com passos de $100 \mu\text{s}$. O valor do incremento ou decremento de tensão é feito com base na diferença entre o nível de tensão atual na saída e o próximo nível que deverá ser colocado na saída dividida pela quantidade vezes em que o laço irá inteirar. A Figura 87 apresenta como os dados são utilizados para a construção da forma de onda analógica.

O microcontrolador LPC1768 em sua saída analógica nativa pode trabalhar com valores de tensão de 0 a 3,3V, porém em nossos experimentos necessitamos de uma faixa de tensão um pouco maior de 0 a 10V, para obter essa tensão utilizamos um amplificador operacional com ganho 2 na configuração não inversor para, proporcionalmente, ampliar a faixa de tensão dos desvios analógicos.

A Figura 88 apresenta uma forma de onda analógica gerada com o dispositivo, com seu primeiro nível de tensão em 1 V permanecendo nele por 1 segundo, depois vai para 2,5 V levando 0,5 s para transitar entre os dois níveis e permanece durante 1 s, faz transição para 0,5 V em 0,5 s e permanece com essa tensão na saída durante um segundo quando faz a última transição para o valor inicial durante 0,5 s permanecendo nesse estado até que ocorra outro disparo de geração de onda analógica.

Quando utilizamos formas de onda, com saídas analógicas, longos períodos em que a saída de tensão deve permanecer num mesmo valor podem causar problema relacionados a limitação do *buffer* de saída, que no caso do sistema desenvolvido não ocorre devido

abordagem utilizada na temporização da saída. Em que, colocamos o valor da saída uma única vez e acionamos o temporizador, reduzindo sobre maneira as repetições de valores de escrita no *buffer* de saída.

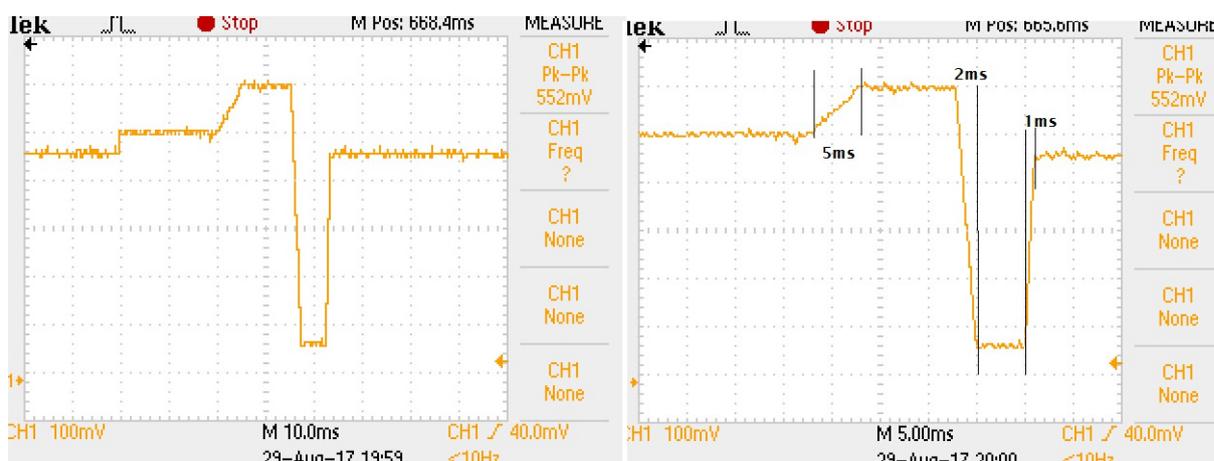
Figura 88: Forma de onda analógica gerada pelo dispositivo



Fonte: próprio autor

Formas de onda estreita temporalmente também podem ser realizadas com o mínimo de 100 μ s para cada desvio devido a escolha da base de tempo. A Figura 89 apresenta uma forma de onda com 500 mV, 600 mV, 60 mV respectivamente. Com permanência de 20, 10 e 5 ms em cada respectível nível de tensão. Fazendo as transições em 5, 2 e 1 ms entre cada um dos níveis.

Figura 89: Forma de onda analógica

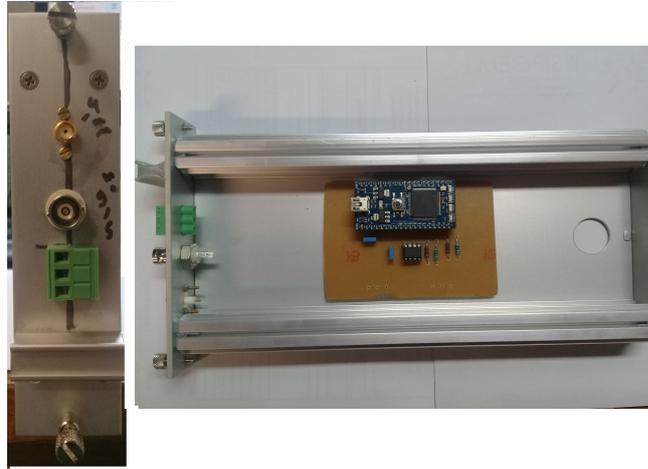


Fonte: próprio autor

Na montagem dos sistemas de instrumentação para o projeto padronizamos o uso de caixas de rack, o sistema de saída analógica foi alocado em uma caixa e no painel frontal

temos os conectores SMA para entrada de clock, BNC para a saída analógica e o conector para comunicação CAN. [Figura 90](#) apresenta a vista lateral e frontal do sistema na caixa.

Figura 90: Caixa padrão rack do sistema de geração de formas de onda analógicas



Fonte: próprio autor

4.8 Sistema de aquisição de dados

Um sistema de aquisição de dados consiste de um arranjo que permita a conversão de sinais analógicos ou digitais para informação que serão tratadas geralmente por computador embutido e essa informação depois de interpretada poderá ser usada na construção de um sinal de resposta para o sistema ([BRUSAMARELLO; BALBINOT, 2010](#)).

A medida do sinal de fluorescência é realizada por meio do fotodiodo que transforma o sinal de luz em um sinal de corrente, este sinal é amplificado pelo circuito de transimpedância que, por sua vez, transforma o sinal de corrente em um sinal de tensão que é aquisição pelas entradas analógicas.

A aquisição analógica é disparada pelo sinal de trigger vindo da saída digital, ao final da iteração dos átomos, a entrada analógica é acionada e uma quantidade específica de pontos, configurados no programa, são adquiridos, a taxa de amostragem é configurada no programa e pode ser alterada dependendo da resposta obtida.

Dessa forma, a aquisição de dados torna-se determinística. A cada ciclo completo de operação do relógio uma quantidade de pontos é adquirida e, com este sinal em um pós-processamento, é possível estimar a temperatura da nuvem atômica, o desvio padrão devido a colisões, o diâmetro da nuvem e a potência dos fótons emitidos, integrando a área do sinal.

A maioria dos conversores de sinal analógico para digital obedece à Equação:

$$D = \frac{V_i}{V_r} \times 2^n$$

Onde V_i é a tensão de entrada, V_r a tensão de referência, n o número de bits na saída do conversor e D o valor de saída digital. O número binário de saída D é um número inteiro, e, para um número de n bits, pode ter qualquer valor de 0 a $(2^n - 1)$. O processo ADC (*Analog to Digital Converter*) interno efetivamente ronda ou trunca o cálculo para produzir uma saída de número inteiro.

Claramente, o ADC não pode simplesmente converter qualquer tensão de entrada, mas tem valores de entrada máximos e mínimos permitidos. A diferença entre este máximo e mínimo é chamada de alcance. Muitas vezes, o valor mínimo é 0 V, então o alcance é apenas o valor de entrada máximo possível. As entradas analógicas que excedem os valores de entrada máximos ou mínimos admissíveis serão digitalizadas como os valores máximo e mínimo respectivamente, ou seja, uma ação de limitação (ou "recorte") ocorre. O intervalo de entrada do ADC está diretamente ligado ao valor da referência de tensão; Em muitos circuitos ADC, o alcance é realmente igual à tensão de referência.

O LPC1768 possui um conversor A/D interno do tipo de aproximação sucessiva com 12 bits e taxa máxima de conversão de 200 kHz. Isso leva a uma amplitude de passo de $3.3/2^{12}$, ou 0.8 mV; o erro de quantificação do pior caso é, portanto, 0,4 mV.

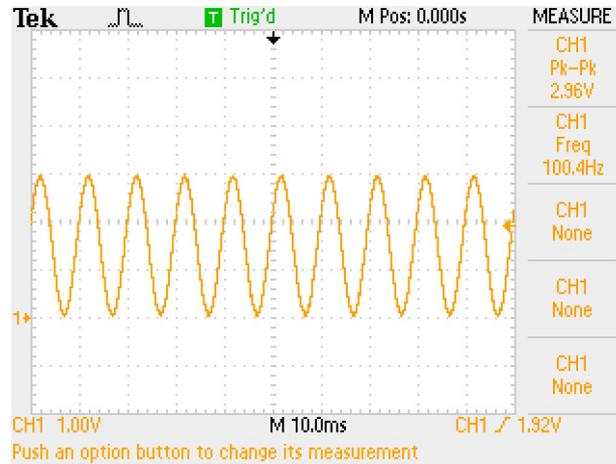
A frequência de amostragem depende da frequência máxima do sinal que está sendo digitalizado. Se a frequência de amostragem for muito baixa, as mudanças rápidas no sinal analógico podem não ser representadas nos dados digitais resultantes. O critério de amostragem de Nyquist indica que a frequência de amostragem deve ser pelo menos o dobro da frequência de sinal mais alta, normalmente na prática, é costumeiro utilizar frequências de amostragem até dez vezes maior que a frequência do sinal para obter uma reconstrução do sinal amostrado com boa qualidade.

Se o critério de amostragem não for satisfeito, então um fenômeno chamado Aliasing ocorre e uma nova frequência menor é gerada. Aliasing é muito prejudicial a um sinal e deve ser sempre evitado, uma abordagem comum é usar um filtro anti-aliasing, que limita todos os componentes de sinal para aqueles que satisfazem o critério de amostragem. Nos sistemas do relógio, costumamos utilizar a taxa de amostragem de 10 kHz, o LPC1768 possui uma taxa máxima de 200 KHz, porém devido a limitações de pacotes de *software* das bibliotecas disponibilizadas a taxa máxima factível na prática é de um quarto da 200 kHz, ou seja, 50 kHz o que já é suficiente para nossa aplicação.

O programa embarcado no sistema de entrada analógica, primeiramente, configura as portas utilizadas, define 2000 amostras para cada disparo de aquisição, partindo disso aguarda o momento em que uma entrada digital dispara a aquisição dos dados. Após a conversão o vetor de dados é convertido para valores de tensão e armazenados em um arquivo de texto. A conversão dos dados é realizada multiplicando o valor da leitura de tensão de entrada em bits pelo valor da tensão de referência de 3,3 V e então dividindo-se por 65535, devido ao valor da leitura ser armazenado em uma variável do tipo long- Uint16

não sinalizada.

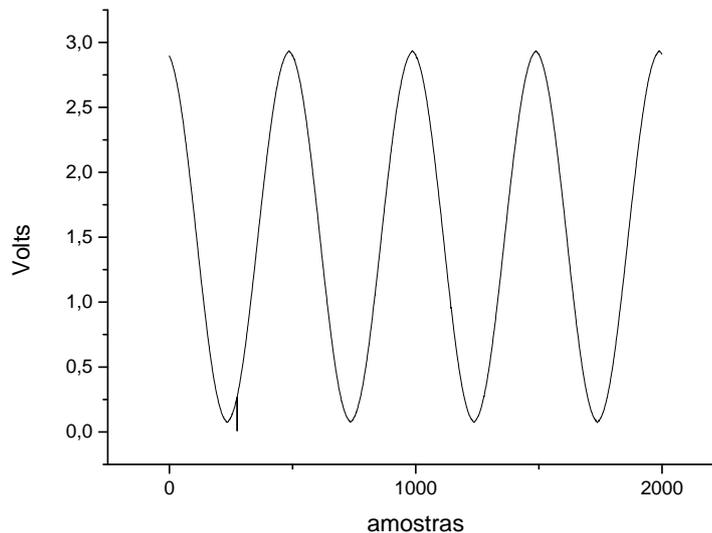
Figura 91: Forma de onda analógica para aquisição



Fonte: próprio autor

A Figura 91 apresenta o sinal de entrada utilizado para testes de 100 Hz senoidal com amplitude de 0 a 3 V. A Figura 92 mostra o gráfico do mesmo sinal gerado a partir dos dados adquiridos e gravados no arquivo de texto.

Figura 92: Forma de onda analógica adquirida com o sistema



Fonte: próprio autor

4.9 Sistema de laser e *driver* de controle compacto

Sistemas de laser de diodo de baixa largura espectral são de extrema importância em padrões de frequência que utilizam átomos frios. São utilizados em processos de

bombeamento e detecção óptica, nos processos de resfriamento, manipulação e detecção. Dessa forma, as fontes de lasers de diodo ocupam um papel fundamental em áreas científicas em que pureza espectral é requisito, principalmente em espectroscopia atômica.

Com o avanço tecnológico, essas fontes se tornaram mais estáveis, com largura de linha reduzida e sintonia precisa, permitindo diversos avanços no estudo da interação da luz com a matéria. A resolução espectral é um dos principais requisitos em muitas aplicações de base metrológica, como é o caso da espectroscopia, sendo um dos fatores que está intimamente ligado com o tipo e qualidade da medida realizada.

Um laser de diodo basicamente é constituído por uma cavidade óptica ressonante (cavidade Fabry-Pérot), formada por dois espelhos paralelos entre si, separados por uma região ativa. Um espelho semirrefletivo é utilizado para fornecer a realimentação óptica, formando assim uma cavidade ressonante.

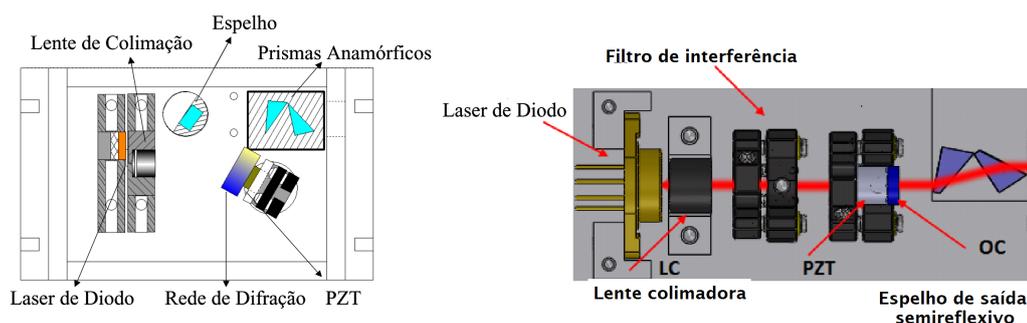
Para que ocorra a ação laser é necessária à inversão de população no meio ativo do laser, ou junção p-n no caso de um laser semiconductor, ou seja, a população no estado excitado deverá ser maior que a população no estado fundamental. Essa inversão é conseguida através da injeção de corrente elétrica na região ativa do laser (TUBOY, 1996).

Para atingir larguras espectrais finas, além da cavidade ressonante do laser, a estabilidade e qualidade de seu controle eletrônico é um requisito indispensável (WIEMAN; HOLLBERG, 1991). Existe também a necessidade, visando aplicações móveis, de redução de tamanho do sistema optomecânico do laser de cavidade estendida.

Nesse sentido, visando à melhoria da robustez e compactação de nossos sistemas laser para uso em nossos relógios, desde o início do projeto do relógio tipo chafariz paralelamente são desenvolvidas alterações em nossos lasers.

Para redução do sistema optomecânico foram feitas duas gerações de caixas para acomodar o laser e seus componentes ópticos. A Figura 93 apresenta um desenho esquemático de cada uma das configurações com seus respectivos componentes, além do chip laser.

Figura 93: Esquema do sistema optomecânico dos lasers de diodo geração 1 e 2



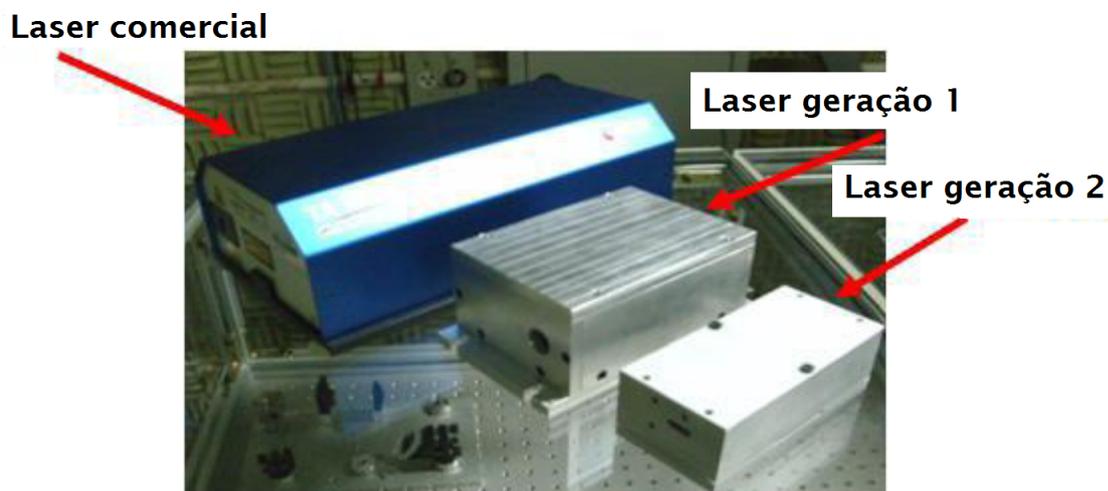
Fonte: próprio autor

As caixas do laser de diodo são feitas de alumínio, pois sua característica de condutividade térmica aliada ao seu peso é bastante favorável para nossos objetivos. Atualmente, são realizados estudos e pesquisa de um novo protótipo para uma terceira geração de sistema optomecânico para os lasers utilizando outros tipos de materiais como polímeros, por exemplo, que se encontra em fase de testes.

As dimensões atuais da segunda geração são de 140 x 22 x 50 mm, todos os sistemas foram usinados pela oficina mecânica do Instituto de Física de São Carlos. A principal alteração do sistema óptico do laser da primeira para a segunda geração foi a empregabilidade de uma configuração de cavidade estendida usando filtro de interferência visando a compactação e estabilidade do sistema.

Em relação ao sistema optomecânico, a geração 2 possui as seguintes características: fácil montagem e manuseio com relação os componentes ópticos, seleção do modo longitudinal feita com um filtro de interferência, maior estabilidade mecânica, menor tamanho. A [Figura 94](#) ilustra as gerações de lasers de diodo utilizados em nosso laboratório. O laser maior é do fabricante TOPTICA, o laser do meio foi construído em nosso laboratório geração 1, por último, o novo projeto geração 2.

Figura 94: Gerações dos lasers utilizados nos relógios atômicos



Fonte: próprio autor

Uma limitação pertinente em relação à compactação do laser, deve-se ao seu driver de controle e está relacionada aos controles manuais, potenciômetros, chaves e monitores. Eles limitam o tamanho do driver. Sendo assim, uma alternativa no sentido de compactar e automatizar o sistema laser é a aplicação de microcontroladores no projeto do driver de controle eletrônico, ligados à rede de comunicação (CAN Bus) com uma configuração mestre-escravo.

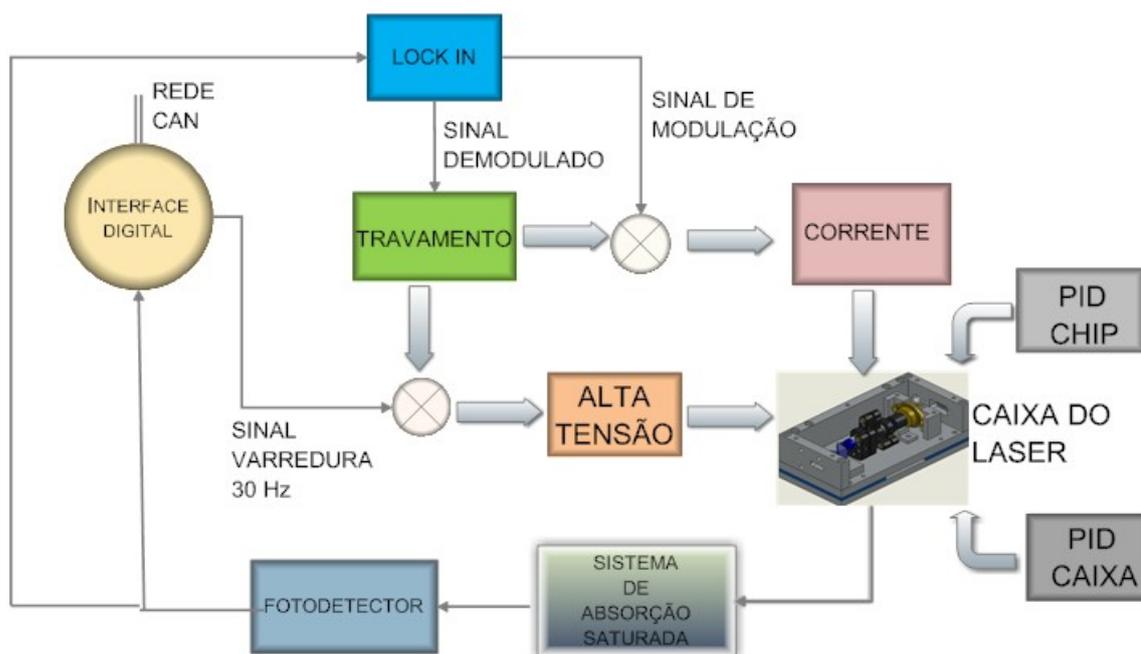
De modo que a placa eletrônica possua um microcontrolador responsável pelos

ajustes locais, por exemplo, ajuste grosso e fino no controle de temperatura. O computador embutido no relógio ficará responsável pela interface homem e máquina (IHM). Essa configuração tem vista a aplicações remotas do sistema laser de diodo que atingem interesses não só do projeto do relógio atômico transportável.

O sistema de controle para os lasers de diodo são necessários para a sintonia e travamento da frequência de interesse. No entanto, a frequência de um laser de diodo é proporcional à temperatura do laser e à corrente de injeção. Se, um desses parâmetros flutuar, a frequência flutuará.

Outro fator importante é o controle de temperatura da caixa do laser, pois, o comprimento da cavidade externa varia com a temperatura. Porém, nem todas as aplicações necessitam desse controle, mas em aplicações mais sofisticadas como espectroscopia de átomos e partículas, por exemplo, esse tipo de recurso é indispensável (MAGALHÃES, 2004).

Figura 95: Esquema geral do controle eletrônico para laser de diodo



Fonte: próprio autor

A Figura 95 apresenta uma ilustração esquemática geral de um controle eletrônico de sistema laser de diodo. Cada um dos blocos presentes representa um circuito utilizado no sistema de controle de laser de diodo, a compactação desses circuitos integrando todos em uma mesma placa de circuito é uma abordagem que permite reduzir significativamente o tamanho geral do driver de controle.

Nesse tipo de driver, o sinal de um fotodetector é amplificado e enviado para um circuito de demodulação, criando um sinal de erro para a correção do sistema. Utilizado

para fornecer um sinal de atuação para a corrente e para o circuito de alta tensão que gera a DDP para uma cerâmica piezolétrica (PZT) que sustenta o espelho de saída da cavidade estendida.

Este tipo de controle é geralmente associado a métodos de travamento com absorção saturada que permitem um bom ganho de resolução espectral. Inicialmente, nosso projeto fica concentrado no projeto de controle de laser mais geral e informatizado.

O circuito de travamento tem a finalidade de tornar a frequência do laser mais estável possível, utilizando como referência uma linha de transição atômica. Esse circuito atua na corrente (resposta mais rápida) e no comprimento da cavidade estendida (resposta mais lenta).

No estágio de entrada do circuito, temos um sinal de erro proveniente de um amplificador *lock-in*, passando por um filtro passa-baixa passivo para minimizar a influência da frequência de modulação do sinal (acima de 80 kHz). Após esse estágio, o sinal passa por um integrador, que permite ligar e desligar o circuito de travamento.

O sinal de saída do integrador fornece a correção para corrente do laser de diodo. Na saída, um circuito somador pode adicionar ao sinal modulação na corrente. O sinal de correção de corrente é integrado novamente para gerar o sinal de correção da cerâmica PZT, por fim sua saída é somada a um sinal de varredura de baixa frequência.

Para o circuito de travamento são necessários dois sinais digitais que virão do microcontrolador, esses sinais serão enviados para as chaves digitais presentes no circuito. Esses sinais são enviados quando for identificada que a frequência do laser é a mesma de transição do átomo desejada. Essa identificação é feita por meio do foto detector que envia níveis de tensão proporcional ao feixe de laser para o microcontrolador.

O amplificador de alta tensão foi desenvolvido com a finalidade de controlar o tubo piezoelétrico, em que o espelho de realimentação óptica é afixado. O circuito funciona com uma fonte de alta tensão ajustada em 400 V que alimenta um amplificador operacional de alta tensão com ganho de 200.

Uma entrada de modulação é utilizada para fazer a varredura e correção da cavidade e outra utilizada como um ajuste manual. Por fim, a saída do amplificador, com excursão de 10 à 400 V, alimenta a cerâmica piezoelétrica.

Para a interface do circuito de alta tensão é utilizado uma saída digital do microcontrolador que vai para o conversor digital analógico MCP 4921 de 12 bits, sua tensão de alimentação e referência é proveniente do regulador de 4.1 volts. Portanto, a sua resolução é de aproximadamente 1 mV.

A função do microcontrolador é proporcionar uma varredura no sinal em que será enviado para a placa de alta tensão, o sinal irá varrer de 0 à 4.1 volts seguindo a resolução

do conversor. O usuário também pode selecionar o setpoint de excursão da tensão. O sinal analógico de saída do conversor D/A é uma onda triangular com a frequência aproximada em 30 Hz. Esse sinal vai para uma entrada somadora inversora da placa de alta tensão, o mesmo é responsável por proporcionar uma excursão de 10 à 400 V de saída da placa.

A fonte de corrente do laser fornece corrente elétrica suficiente para a operação em uma determinada região, não obrigatoriamente o valor máximo suportado pelo diodo, mas definido por condições estáveis de operação, por exemplo, níveis de ruído e estabilidade térmica. O circuito de controle de corrente desenvolvido no projeto possui dois ajustes manuais, um ajuste para limitar a corrente, chave liga-desliga, chave para selecionar o ganho da modulação externa, entrada para modulação usada para fazer a correção da frequência do laser e um monitor de corrente.

O controle analógico de corrente do laser de diodo garante uma boa estabilidade e a possibilidade de ajuste grosso, que está em torno de 100 mV, e um ajuste fino em torno de 10mV. Esses ajustes são feitos por meios de 2 botões que ao serem pressionados acionam um contador de uma das interrupções, nesses laços é verificado a quantidade de vezes em o botão é pressionado e multiplicado, no momento estamos trabalhando em uma interface gráfica para que esses ajustes sejam feitos totalmente por meio da rede CAN.

Utilizamos uma saída analógica do LPC1768 para implementar o ajuste de corrente, quando o botão de incremento ou decremento é pressionado a saída aumenta em 10 mV ou de 100 mV dependendo da posição de uma chave ligada a uma entrada digital. Se a chave estiver em nível alto (5 Volts) o ajuste será "grosso", ou seja, o incremento ou decremento será em 100 mV, e se estiver em nível baixo (0 Volts) o ajuste será "fino", incremento ou decremento será de 10 mV. A leitura da corrente é feita através da medição da tensão na referência (resistor), pois na fonte a corrente do laser é proporcional à tensão em cima da referência seguindo a lei de Ohm.

O laser utilizado é denominado anodo aterrado, significa que a corrente vai do terra para a tensão negativa. Porém, para que seja possível a leitura é necessário fazer um condicionamento do sinal devido a tensão na referência ser negativa, para isso, o sinal passa por um amplificador inversor com um ganho ajustável por meio de um potenciômetro, e um buffer, garantindo o sinal positivo e o casamento de impedância. Para evitar que ocorra uma sobretensão na entrada do microcontrolador foi colocado um diodo zener de 3.3 V

O controle de temperatura da caixa do laser tem por finalidade minimizar a variação do tamanho da cavidade externa do laser devido à variações da temperatura ambiente. O controle de temperatura da caixa não atua diretamente na estabilização do laser. No entanto, o bom funcionamento desse controlador é fundamental para o travamento de frequência do laser de diodo.

Para o controle de temperatura da caixa utilizamos um controlador Proporcional Integral e Derivativo (PID) analógico. Para condicionar o sinal do sensor de temperatura, montamos uma ponte de Wheatstone, para fornecer o sinal de erro e permitir o ajuste de ponto de operação. Com isso o sinal de erro será tratado pelo controlador PID que agirá no controle de temperatura da caixa.

A temperatura é mensurada através do sensor LM35 (National Semiconductor) que possui uma resposta em $10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, o sinal é enviado para uma entrada A/D do microcontrolador que através do código de programação é convertido em graus celsius.

O controle de temperatura do chip de laser é utilizado como um ajuste fino para buscar as linhas de transição dos átomos do sistema de referência. Sendo de grande importância para o sistema laser, pois a variação de temperatura na cavidade do chip interfere diretamente na estabilidade da frequência do laser, podendo causar, inclusive, saltos de modo. Sendo assim, uma estabilidade de temperatura da ordem de mK é fundamental.

Para alcançar esse patamar foi desenvolvido um controlador PID similar ao controle de temperatura da caixa, porém com ganhos e constantes de tempo diferentes. A vantagem desse controlador está relacionado a capacidade de minimizar o tempo de resposta do sistema para uma mudança no ponto de operação, isso é bastante útil quando varremos a temperatura do laser. Além disso, a condição de ganhos ideais minimiza o ruído na condição de operação estacionária.

O funcionamento desse controlador é idêntico ao controle de temperatura da caixa, a única diferença é em relação aos ganhos P,I e D do controlador. A sintonia é feita utilizando o método de Ziegler-Nichols modificado (OGATA, 2011).

No controle de temperatura do chip do laser, utilizado para o ajuste fino, é medido o valor de temperatura atual (erro em relação ao set) e corrido na saída, a interface digital não é responsável pelo controle direto, assim como no controle da caixa, fazendo apenas a interface com usuário e ajuste de parâmetros.

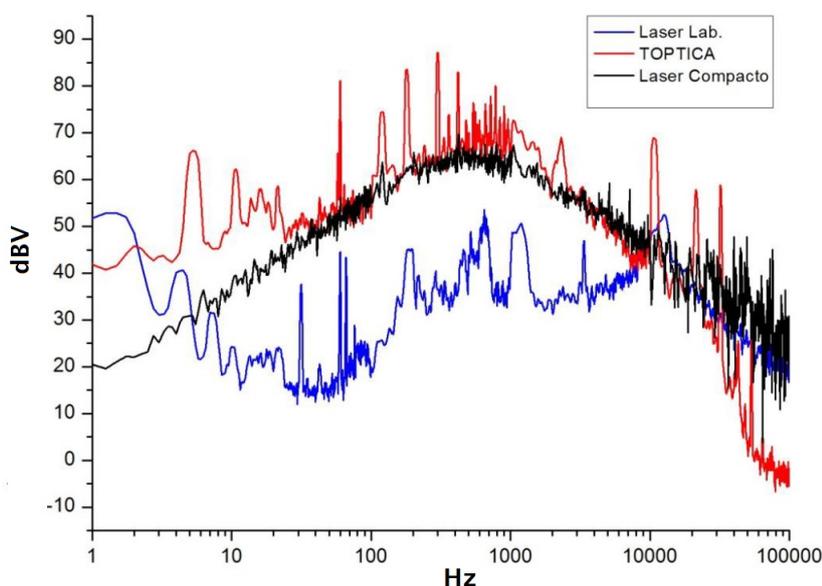
As saídas dos sensores de temperatura da caixa e do chip do laser não precisam passar por nenhum condicionamento de sinal. Porém, para um melhor acoplamento de sinal um circuito buffer faz a interface entre a saída do sensor e o microcontrolador. Para o circuito utilizamos o amplificador operacional (OP37) que faz a isolação dos circuitos e o casamento de impedância.

Estudos desenvolvidos por Junior (2013) mostraram resultados promissores para o projeto do laser compacto que serviram de base e motivação para o avanço no desenvolvimento do projeto. Foram analisados três lasers de diodo: um comercial, modelo TA-100 da TOPTICA, o laser desenvolvido no laboratório geração 1 com rede de difração para a cavidade estendida, e o laser compacto com filtro de interferência geração 2.

O laser compacto apresentou o mesmo patamar de ruído com relação ao laser comercial. Desta análise, conclui-se que as características de ruídos estavam majoritariamente associadas ao tipo de resistores utilizados nos circuitos de controle o que motivou o projeto da terceira geração de driver de controle utilizando componentes de maior confiabilidade e resistores de filme fino.

Pretendemos atingir ou superar, com alterações de ganho e uma avaliação mais precisa da resposta em frequência dos sub-sistemas, o patamar menor de ruído do laser de referência do laboratório. Pela [Figura 96](#) observa-se que o laser compacto já tem o mesmo patamar de ruído com relação ao laser comercial.

Figura 96: Espectros dos sinais de ruído dos lasers de diodo, utilizado para fazer a comparação entre os sistemas



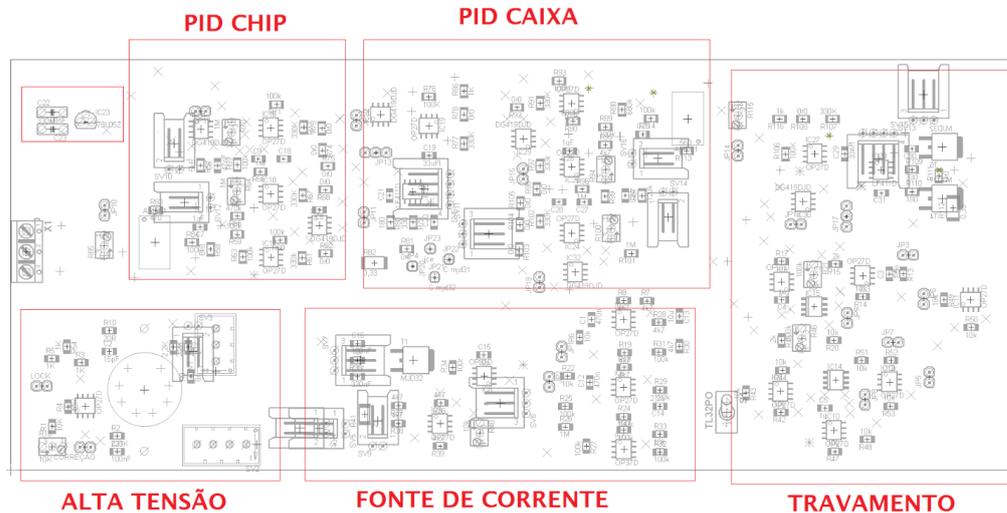
Fonte: [Junior \(2013\)](#)

Utilizando a placa de interface de controle digital o laser passou a ser gerenciado por meio de um microcontrolador LPC1768, capaz de controlar o circuito de fonte de corrente com ajustes de 10 mV ou 100 mV, controlar duas chaves digitais do circuito de travamento do laser, gerar uma onda triangular de aproximadamente 30 Hz para o circuito de alta tensão para proporcionar a modulação do PZT.

Deste modo, contribui com a compactação do sistema de laser. Porém, todos os outros circuitos: corrente, alta tensão, travamento e PID's necessitam de adaptações para compatibilidade como o novo driver de controle digital. Nesse sentido, investimos nossos esforços em obter um modelo de layout para os circuitos de controle analógico de laser que estivessem todos em uma única placa, ou seja, como placa-mãe em que estariam presentes

todos os circuitos necessários para a estabilização do laser (travamento, fonte de corrente, alta tensão, PID's).

Figura 97: Layout compacto da placa de driver de controle do laser



Fonte: próprio autor

A [Figura 97](#) apresenta o layout de placa desenvolvido em que foi feita todas as alterações necessárias para que os controles analógicos possam ser comandados por interface digital. Além disso, tomamos todos os cuidados para minimizar ruídos em trilhas de sinais e separamos a camada de alimentação da camada de trilhas de sinal. Nesta placa já estão as chaves digitais e as entradas necessárias aos sinais que virão dos conversores digital/analógico da placa de interface.

No atual momento do desenvolvimento do controle do sistema laser, estamos trabalhando na otimização do layout da placa de controle analógico, devido ao sucesso obtido com os testes de funcionamento de cada circuito isoladamente. Também estamos concentrando esforços nas melhorias e ajustes da interface digital, estamos efetuando agora os testes de funcionamento em conjunto digital/analógico e definindo as medidas que serão tomadas na próxima versão do firmware da interface digital.

4.10 Sistema de geração de sinal senoidal (sintetizador) baseado em chip DDS AD9912

Quando o relógio atômico trabalha em modo travado, ou seja, com a frequência do oscilador externo tendendo sempre para o pico do sinal de ressonância dos átomos, variações de frequência da cadeia de osciladores causam diferentes picos de tensão no sinal fluorescência, que causam variações no sinal proveniente da fluorescência dos átomos.

Caso a variação do sinal seja positiva, em relação a medida anterior, o algoritmo de controle deve corrigir por meio de um equipamento de síntese direta digital (DDS) a

ressonância, aumentando a frequência da cadeia. Quando a variação do sinal de tensão é negativa, então o computador envia o comando para o DDS abaixar a frequência do sinal.

Este método de travamento permite obter um sinal de referência, da cadeia de osciladores, mais ressonante quanto possível com a transição atômica do césio na medida em que mais ciclos vão se efetuando no experimento, a variação de frequência proporcionada pelo DDS encontra-se na ordem de unidades de micro Hertz.

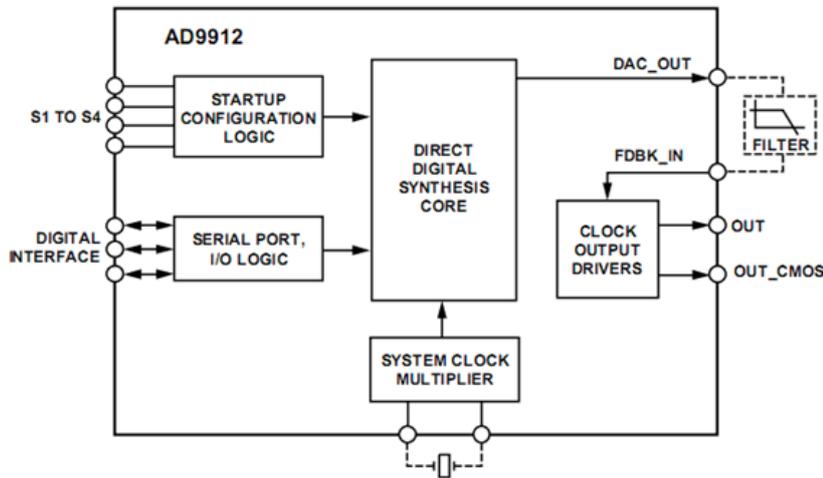
No projeto de relógio atômico transportável é necessário um equipamento de geração de sinais (DDS) que seja pequeno, de baixo consumo, e que disponha de interfaces de comunicação com a rede CAN. Tendo em vista os requisitos de nossa aplicação baseamos o desenvolvimento desse dispositivo no chip AD9912 (DDS), capaz de realizar as mesmas tarefas de equipamento comercial atualmente utilizado nos relógios, porém com tamanho muito menor e a liberdade de ser desenvolvido focado em nossa demanda dentro do laboratório [Analog Devices \(2009\)](#).

O uso do chip AD9912 (DDS) oferece várias vantagens, tais como resolução de micro Hertz na frequência de saída, mudanças entre frequências de saída extremamente rápidas e sem sobressinal, elimina o uso de componentes analógicos, a interface de controle digital facilita o controle remoto através de um microcontrolador e com tamanho e custo extremamente reduzidos. Capaz de gerar um sinal com frequência que varia entre 25 MHz e 1 GHz, à partir de um sinal de *clock* na entrada de referência. O chip AD9912 pode sintetizar frequências de até 1 GHz com resolução de pelo menos 4 μ Hz.

Para realizar a interface entre o chip AD9912 e a rede de comunicação é utilizado o microcontrolador LPC1768. O controle do AD9912 é feito através do padrão de comunicação SPI, o LPC1768 fará o papel de receber o comando do computador, interpretá-lo e configurar o chip DDS.

O AD9912 é um sintetizador digital direto (DDS) que possui um conversor digital para analógico (DAC) integrado. A arquitetura do AD9912 possui uma palavra de sintonia de frequência de 48 bits (FTW) que pode sintetizar frequências com uma resolução de 4 μ Hz. O AD9912 também possui um PLL integrado, que permite utilizar um clock de referência na ordem de 100 MHz, podendo gerar uma frequência de até 1 GHz em sua saída. A [Figura 98](#) mostra, de maneira simplificada, os componentes internos ao chip AD9912.

Figura 98: Diagrama básico do AD9912



Fonte: [Analog Devices \(2009\)](#)

A frequência do sinal gerado pelo DDS é determinada pela palavra de ajuste de frequência (FTW) que possui 48 bits. Para a configuração da frequência do sinal de saída é necessário conhecer a frequência do sinal de referência (f_s) e a frequência que se deseja que o sinal de saída possua (F_{dds}). Para encontrar o valor da palavra de 48 bits para a configuração do registrador FTW é utilizada a seguinte equação:

$$FTW = \text{round}\left[2^{48} \frac{F_{dds}}{F_s}\right]$$

Por exemplo, para um sinal de referência com frequência de 1 GHz e um sinal de saída com frequência de 19.44 MHz, observa-se que FTW é igual a 5.471.873.547.255 na base decimal, ou 04FA05143BF7 na base hexadecimal. A configuração da frequência do sinal de saída é extremamente simples, basta configurar o registrador FTW com a palavra da frequência do sinal de saída e gerar um pulso de atualização no pino de update do chip. O canal de comunicação do chip DDS é uma porta no padrão SPI utilizada para configurar todos os registradores do AD9912.

A porta de controle serial do AD9912 é uma porta síncrona flexível que permite uma interface fácil com qualquer microcontrolador. Suporta transferência simples ou de múltiplos bytes. A porta serial do AD9912 pode ser configurada para um simples pino I/O bidirecional (somente SDIO) ou para dois pinos unidirecionais (SDIO e SDO). Note que todas as operações da porta serial, como a atualização da palavra de frequência, dependem da presença do sinal de referência (f_s).

DESCRIÇÃO DOS PINOS DA PORTA DE CONTROLES SERIAL:

- SCLK (clock da comunicação serial) é o clock de deslocamento dos bits da serial, esse pino é uma entrada. SCLK é usado para sincronizar a leitura e a escrita a ser efetuada

na DDS. A escrita dos bits são registrados na borda de subida do clock, e a leitura dos bits são feitas na borda de descida do clock. Esse pino possui um resistor de pull-down interno.

- SDIO (entrada/saída de dados da serial) é um pino de uso geral duplo que pode ser configurado para trabalhar como entrada ou saída. A configuração padrão da DDS é configurar esse pino como sendo entrada e saída. Alternativamente, SDIO pode ser usada como um pino unidirecional para escrita dos dados (Registrador 0x00, Bit0 = 1). Nesse caso SDIO é configurado como entrada e SDO como saída.

- SDO (Saída de dados) é usado somente no modo unidirecional (Registrador 0x0000, Bit0 = 1) como uma saída alternativa para leitura de dados da DDS. Para configurar o modo bidirecional (usando SDIO como entrada/saída) basta configurar o padrão da DDS novamente (registrador 0x0000, Bit0 = 0).

- CSB (pino de seleção do chip) é um controle ativado em nível baixo que habilita os ciclos de escrita e leitura. Quando CSB está em nível alto, SDO e SDIO permanecem em estado de alta impedância. Esse pino possui um resistor de pull-up interno de 100K ligado a 3.3V. Isso garante que não haja flutuação nesse pino.

- IO UPD (pino de atualização) este pino é utilizado para atualizar as configurações do chip após as palavras de dados serem escritas no buffer da porta serial. Após a escrita da palavra de configuração, é necessário gerar um pulso nesse pino para que as atualizações tenham efeito.

Após os primeiros testes com o kit de desenvolvimento foi possível o desenvolvimento de uma placa dedicada ao AD9912, essa placa possui apenas os periféricos necessários para a aplicação em questão. Foram aproveitados os valores dos componentes e o esquemático da placa de desenvolvimento para o projeto da placa dedicada ao AD9912, porém foi necessário o desenvolvimento de um layout diferente.

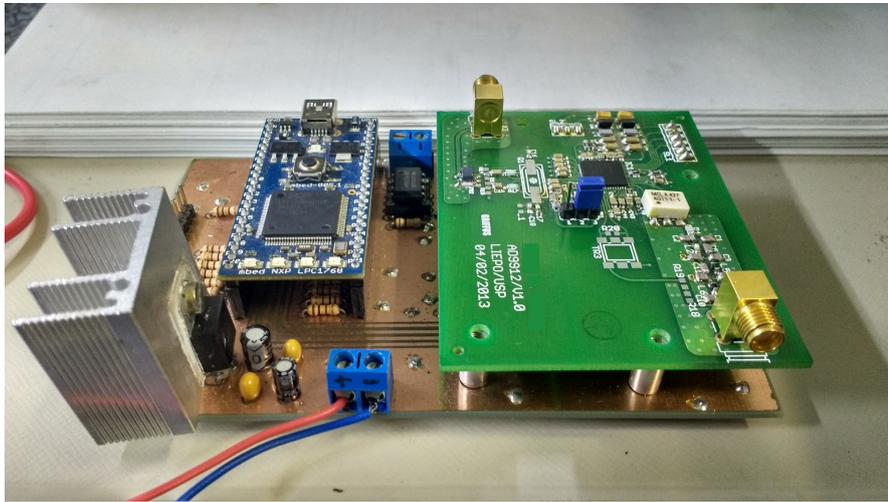
Nessa placa estão presentes: o filtro passa baixas de saída, o conector de alimentação do circuito, o conector de comunicação SPI, a entrada de referência e o conector de saída de sinal. Esta placa é conectada de interface de controle, contendo o LPC1768.

Para realizar o controle e a interface entre o computador e o AD9912 foi utilizado o LPC1768 conforme mencionado, a escolha desse dispositivo foi feita com base nos periféricos necessários para o desenvolvimento do trabalho e topologia de *hardware* adotada na arquitetura de instrumentação do projeto. Para a interface com o chip AD9912 é necessário um canal de comunicação SPI, para a interface com o computador é necessário uma porta de comunicação de rede CAN bus.

Para realizar os primeiros testes foi montado, em uma placa de protótipo, um circuito com o LPC1768 para realizar a comunicação com o AD9912, através da porta de comunicação SPI, e fazer algumas configurações na frequência do sinal de saída. Para facilitar o desenvolvimento do projeto foi utilizada o kit Mbed.

O LPC1768 é responsável por receber um comando do computador, via CAN, e transferir o comando para o AD9912 via comunicação SPI. A placa também possui um regulador de tensão LM7805 e dois reguladores LM317, como a tensão disponível para alimentar os circuitos no relógio atômico é de 12 volts, esse componente é necessário para abaixar a tensão para 5,0; 1,8 e 3,3 volts, para a alimentação dos componentes do circuito e o DDS. A [Figura 99](#) apresenta o protótipo montado para testes e desenvolvimento com o Mbed, a placa com interfaces de comunicação e o circuito DDS com o AD9912 customizado.

Figura 99: DDS com o AD9912 customizado e interface com Mbed



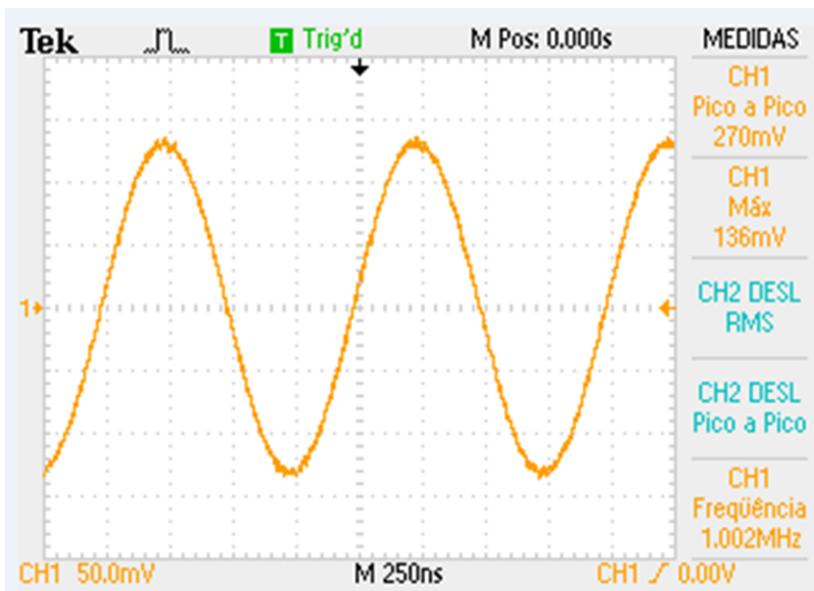
Fonte: próprio autor

O software de configuração do AD9912 calcula, com base na frequência do sinal de referência e na frequência do sinal de saída desejada, a palavra da configuração da frequência e a envia para os devidos registradores do AD9912 através da rede CAN e do protocolo de comunicação SPI.

Quando a palavra de configuração é totalmente enviada do LPC1768, o software de configuração do AD9912 faz uma leitura dos registradores do chip e compara com os valores enviados anteriormente, se os dados forem diferentes quer dizer que houve um erro de comunicação, nesse caso o software reenvia os dados.

Para uma frequência de saída de 1 MHz a palavra de configuração enviada para o DDS é 0x4189374BC7 (heximadecimal). [A Figura 100](#) mostra um sinal de 1 MHz sendo gerado, na saída do filtro passa-baixas da placa do chip AD9912, após os registradores do mesmo serem configurados com a palavra de dados acima a frequência do sinal de saída do AD9912.

Figura 100: Sinal de 1 MHz senoidal



Fonte: próprio autor

Uma grande vantagem do sistema digital de geração de sinais é que este tipo de sistema não depende de componentes passivos para realizar tal função e, sendo assim, o sinal de saída não sofre drift de frequência com a variação de temperatura. As características do sistema se mantêm as mesmas ao longo do tempo, pois os componentes digitais não sofrem envelhecimento, um dos grandes problemas dos componentes passivos.

Conforme foi colocado na seção sobre a arquitetura de instrumentação e controle para o relógio transportável, utilizaremos os sistemas DDS para corrigir a cadeia de osciladores que produzem o sinal de ressonância de 9192631770 Hz e também para gerar o sinal de referencia de clock para os LPC1768 utilizados para geração e aquisição de sinais de analógicos e digitais do experimento que implementam o ciclo atômico.

Para isso utilizamos o sinal de 100 MHz que vem do distribuidor de clock para alimentar a entrada de sinal de referência da DDS, que por sua vez irá, a partir disso, produzir um sinal senoidal de 12 MHz para os microcontroladores que atuam diretamente no ciclo atômico.

Lembrando, que o oscilador Wenzel de 100 MHz será parte inclusa dos osciladores que compõem a cadeia de síntese de frequência para o sinal de ressonância, ou seja, teremos um sistema totalmente fechado em laço de frequência em que todos os dispositivos que atuam diretamente no ciclo atômico partilham de uma mesma fonte de referência clock que está diretamente sendo corrigida pela própria ressonância dos átomos.

Pretende-se, com isso, obter um aumento da qualidade de sincronismo de nossos subsistemas, uma vez que partilharam de um sinal com fase comum a todos os dispositivos.

A [Figura 101](#) apresenta a medida realizada com analisador de espectro tanto da fonte de 100 MHz quanto da saída de 12 MHz em que é possível observar sua pureza espectral. Podemos ainda, sugerir ensaios de análise de fase para o sistema DDS, a fim avaliar suas componentes de ruído em cada banda de emissão e validar sua aplicação na correção da cadeia de osciladores.

Figura 101: Medida realizada com analisador de espectro tanto da fonte de 100 MHz quanto da saída de 12 MHz



Fonte: próprio autor

Após todos os testes serem feitos, a rotina desse *software* será integrada ao programa principal de controle do relógio atômico, fazendo com que a malha de realimentação seja fechada, ou seja, o programa principal, que está rodando no computador do relógio atômico,

calculará o desvio de frequência do oscilador (AD9912), com base no sinal de fluorescência dos átomos de Césio, e o software fará a correção de frequência pelo DDS. Dessa maneira a frequência do oscilador (AD9912) ficará travada à frequência de ressonância dos átomos de césio

4.11 Estrutura mecânica para acomodação e transporte do sistema

Todo padrão de frequência atômico seja ele experimental ou comercial necessita invariavelmente de uma estrutura de sustentação mecânica. No caso de um sistema transportável de um lugar a outro existe ainda o requisito de mobilidade. Isso significa que necessitamos de uma estrutura robusta mecanicamente e que possua rodas ou um dispositivo que permita mover o aparato de um lugar a outro com facilidade. Com esse objetivo, construímos uma estrutura utilizando perfis de alumínio em que podemos alocar a mesa ótica, os sistemas de laser de diodo, a bomba de vácuo, o rack com os circuitos de instrumentação e controle e as fontes de alimentação do sistema. A [Figura 102](#) mostra a montagem da estrutura com ênfase nas rodas para que possamos transportar o sistema como um todo.

Figura 102: Estrutura metálica com o rack de instrumentos e rodas



Fonte: próprio autor

5 CONCLUSÃO

Existe uma notável demanda por maior precisão na medida de frequência o que tem levado a área de metrologia científica de tempo e frequência a voltar sua atenção para sistemas que possam prover sinal de referência de alto desempenho com um aparato compacto e robusto para suprir a necessidade de sistemas de telecomunicações e posicionamento global, calibração industrial e metrologia científica, principalmente.

Modernas tecnologias em óptica para resfriamento atômico são aplicadas em uma nova geração de padrões de frequência que está sendo transferida para escala industrial. O desenvolvimento de chafarizes e relógios ópticos tornou possível a avaliação de sinais de tempo e frequência com elevada exatidão e precisão o que contribui para o desenvolvimento de relógios compactos fornecendo sinal de referência e comparação de alta confiabilidade.

Equipes de pesquisa de instituições do mundo todo estão investindo no desenvolvimento de alguma tecnologia para obter relógios atômicos mais compactos, inclusive já existem dispositivos sendo comercializados com foco principal na aplicação como instrumento embarcado em satélites. Dominar a tecnologia do desenvolvimento de padrões de frequência é de fundamental importância para o interesse nacional, pois coloca o país equiparado aos mais desenvolvidos e, em um futuro próximo, passar a contribuir para as escalas de tempo com medidas realizadas com relógios atômicos experimentais.

De forma geral, um padrão atômico de frequência é um sistema capaz de extrair do átomo uma referência baseada em suas transições de estado de energia. Existem diferentes técnicas para interrogar os átomos e desenvolvimento de diversos experimentos, porém a maioria visa a aumento ou melhora em desempenho, custo, robustez, mobilidade, de seus sistemas. Isso faz com que sejam implementados, dentro dessa área, os mais variados experimentos, tanto em espécies de átomos, como na forma de obter sua informação ou sinal de referência.

Um estudo minucioso do padrão de frequência compacto foi realizado, e com isso, foi possível atualizar seu sistema de aquisição de dados e realizar novos experimentos. Seu desenvolvimento e o domínio dos detalhes de implementação serviram como guia para os trabalhos desenvolvidos para obtermos um sistema transportável.

O foco principal deste trabalho foi estudar os principais relógios compactos e métodos utilizados para interrogação dos átomos. Entender detalhadamente o processo de interrogação atômica feito no padrão compacto de átomos frios do laboratório e a partir disso, os requisitos de projeto para o sistema de instrumentação para um relógio transportável.

Contudo, neste trabalho, com base nos requisitos, foi desenvolvido uma arquitetura

de instrumentação distribuída, baseada em dispositivos embutidos visando maior compactação e modularidade para os equipamentos utilizados em sua configuração, servindo de diretriz para trabalhos futuros.

Uma análise de recursos de computação embarcada disponíveis e aplicáveis em projetos e testes de dispositivos com a finalidade de estabelecer um que atendessem à aplicação, foi realizado. Com os sistemas definidos investimos os esforços na configuração de seu *hardware* e em aprender como desenvolver os *softwares* para obtermos nossos sistemas dedicados.

O realizado o desenvolvimento e teste de um sistema para gerar sinal de *clock* baseado em um dos osciladores que fará parte da síntese que gera o sinal de interrogação, trabalhamos para obter o menor ruído de fase possível, o que demandou muito esforço para otimizar o sinal, pois trabalhamos em um nível de ruído que até mesmo conexões e cabos interferem em nosso sinal.

Com os sistemas de geração e aquisição de sinais baseado em microcontroladores ARM LPC 1768 desenvolvidos, todo o código embarcado foi desenvolvido em linguagem C e feito exclusivamente para atender as especificidades do relógio transportável, ou seja, obtivemos um sistema operacional dedicado em cada dispositivo na geração de formas de onda digital e analógica e na aquisição de sinal analógico.

Para a computação de alto nível utilizamos uma BeagleBone Black em que fizemos a adaptação em seu sistema Linux Debian para comunicar-se via rede CAN com os demais dispositivos também concentramos esforços em dominar a linguagem Python para o desenvolvimento dos aplicativos necessário para esta e as próximas fases do projeto.

Estudou-se e estabeleceu-se uma rede de comunicação *CAN bus*, trabalhou-se no desenvolvimento de um protocolo proprietário de uso específico para nosso experimento. No entanto, foi necessário o estudo e testes de toda a topologia da rede CAN e o conhecimento de sua aplicação industrial e automobilística.

Contudo, este trabalho realizou seus objetivos estudando a forma como padrões de frequência são controlados para obter o sinal de saída eletrônico ressonante com a transição relógio, implementando métodos de aquisição, geração e processamento de sinais visando travar um oscilador macroscópico no pico de ressonância da transição do Césio que define o segundo no sistema internacional de unidades.

Apesar de ainda ser um projeto de pesquisa em fase de desenvolvimento, caracteriza-se como um projeto de alta tecnologia agregada, que poderá no futuro tornar-se um produto de tecnologia nacional trazendo recursos para a inovação da metrologia de tempo e frequência no Brasil.

REFERÊNCIAS

AHMED, M. et al. The Brazilian time and frequency atomic standards program. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 80, n. 2, p. 217–252, 2008. ISSN 00013765.

ALLAN, D. W.; ASHBY, N.; HODGE, C. C. The Science of Timekeeping: Application Note 1289. **Hewlett Packard**, p. 88, 1997. Disponível em: <http://www.allanstime.com/Publications/DWA/Science{_}Timekeeping/TheScienceOfTimekeeping.>

ALVES, R. F. **Chafariz atômico de Cs 133**. mar 2012. 99 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, mar 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/76/76131/tde-05062012-162759/>>.

ALVES, R. F. et al. Brazilian microwave standards of time and frequency. **2009 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 22nd European Frequency and Time Forum**, p. 1035–1037, 2009. ISSN 1075-6787.

AMARAL, M. M. et al. Historical overview of Ramsey spectroscopy and its relevance on Time and Frequency Metrology. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 733, p. 012020, 2016. ISSN 1742-6588. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1742-6596/733/i=1/a=012020?key=crossref.6a51b5d5b29fe7cae48fff48b77aaf94>>.

Analog Devices, I. **1 GPS Direct Digital Synthesizer with 14-Bit DAC AD9912**. Norwood: [s.n.], 2009.

BAUCH, A. Caesium atomic clocks: function, performance and applications. **Measurement Science and Technology**, v. 14, n. 8, p. 1159, 2003. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0957-0233/14/i=8/a=301>>.

_____. Caesium Atomic Clocks: Function, Performance and Applications. XXXIII, n. 2, p. 81–87, 2014.

BEBEACHIBULI, A. **Relógio atômico a feixe efusivo de ^{133}Cs : estudo da estabilidade e da acurácia como função do deslocamento da frequência atômica devido ao efeito zeeman de segunda ordem, ao cavity pulling e ao rabi pulling**. mar 2003. 117 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, mar 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/76/76131/tde-12092007-114223/>>.

BEBEACHIBULI, A. **Espectroscopia Ramsey em um chafariz atômico**. nov 2007. 127 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, nov 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/76/76131/tde-19012008-090258/>>.

BEBEACHIBULI, A. et al. Characterization of the main frequency shifts for the brazilian Cs 133 atomic beam frequency standard. **Brazilian Journal of Physics**, v. 35, n. 4a, p. 1010–1015, 2005. ISSN 0103-9733. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/bjp/files/v35{_}1010.>

BENDER, P. L. Effect of Hydrogen-Hydrogen Exchange Collisions. **Physical Review**, v. 132, n. 5, p. 2154–2158, dec 1963. ISSN 0031-899X. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.132.2154>>.

BIZE, S. **Tests fondamentaux à l'aide d'horloges à atomes froids de rubidium et de césium**. 2001. Tese (Doutorado) — Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2001.

BIZE, S. et al. Advances in atomic fountains. **Comptes Rendus Physique**, v. 5, n. 8 SPEC.ISS., p. 829–846, 2004. ISSN 16310705.

BOSCH, R. G. CAN Specification Version 2.0. p. 72, 1991.

_____. **Controller Area Network (CAN) Version 2.0**. [S.l.], 1998.

BRUSAMARELLO, A.; BALBINOT, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas Vol. 1**. 2. ed. São Paulo: LTC, 2010. 404 p. ISBN 9788521617549.

CALMANOVICI, C. E. A inovação, a competitividade e a projeção mundial das empresas brasileiras. **Revista USP**, n. 89, p. 190–203, 2011. ISSN 0103-9989. Disponível em: <http://rusp.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-99892011000200013&lng=en&nrm>.

CARR, J. J. **Elements of electronic instrumentation and measurement**. 3. ed. [S.l.]: Pearson Education Taiwan, 2002. 594 p. ISBN 9867910699 9789867910691.

CIPM. National and International Needs Relating to Metrology: International Collaborations and the Role of the BIPM. 1998. Disponível em: <<http://www.bipm.org/utills/en/pdf/blevin1998-EN.pdf>>.

COHEN-TANNOUDJI, C. N.; PHILLIPS, W. D. New Mechanisms for Laser Cooling. **Physics Today**, v. 43, n. 10, p. 33, 1990. ISSN 00319228.

COHEN-TANNOUDJI, C. N.; PHILLIPS, W. D. New Mechanisms for Laser Cooling. **Physics Today**, v. 43, n. 10, p. 33–40, 1990. ISSN 0031-9228. Disponível em: <<http://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/1.881239>>.

CORRIGAN, S. **Introduction to the controller area network (CAN) REV.B**. [S.l.], 2002. 1–15 p. Disponível em: <<http://www.ti.com/sloa101-aaj>>.

DAVIS, R. I. et al. Controller Area Network (CAN) schedulability analysis with FIFO queues. **Proceedings - Euromicro Conference on Real-Time Systems**, p. 45–56, 2011. ISSN 10683070.

DONLEY, E. et al. Number enhancement for compact laser-cooled atomic samples by use of stimulated radiation forces. **2010 IEEE International Frequency Control Symposium, FCS 2010**, p. 125–128, 2010. ISSN 1075-6787.

DONLEY, E. A. et al. Cancellation of Doppler shifts in a cold-atom CPT clock. **2013 Joint European Frequency and Time Forum and International Frequency Control Symposium, EFTF/IFC 2013**, p. 445–447, 2013.

DROZ, F. et al. Space passive hydrogen maser - Performances and lifetime data-. **2009 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 22nd European Frequency and Time Forum**, p. 393–398, 2009. ISSN 1075-6787.

_____. Space passive hydrogen maser - Performances and lifetime data-. **2009 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 22nd European Frequency and Time Forum**, n. December 2008, p. 393–398, 2009. ISSN 1075-6787.

ESNAULT, F. et al. Stability of the compact cold atom clock HORACE. **Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition**, p. 1342–1345, 2007. ISSN 1075-6787.

ESNAULT, F. et al. **ETUDE DES PERFORMANCES ULTIMES D'UNE HORLOGE COMPACTE A ATOMES FROIDS : OPTIMISATION DE LA STABILITE COURT TERME**. 2009. 230 p. Tese (Doutorado) — UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE, 2009.

ESNAULT, F. X. et al. Cold-atom double- Λ coherent population trapping clock. **Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics**, v. 88, n. 4, p. 1–5, 2013. ISSN 10502947.

ESNAULT, F.-X.; DONLEY, E. a.; KITCHING, J. Towards a compact cold atom frequency standard based on coherent population trapping. **Frequency Control Symposium FCS 2010 IEEE International**, p. 465–469, 2010. ISSN 10756787.

ESNAULT, F. X. et al. High-stability compact atomic clock based on isotropic laser cooling. **Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics**, v. 82, n. 3, p. 1–5, 2010. ISSN 10502947.

ESNAULT, F.-X.; KITCHING, J.; DONLEY, E. a. A compact cold-atom frequency standard based on coherent population trapping. **2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings**, p. 1–3, 2012. ISSN 1075-6787. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/articleDetails.jsp?arnumber=6243673>.

ESNAULT, F. X. et al. New design of the compact cold atom clock HORACE. p. 237–240, 2006.

_____. HORACE: A compact cold atom clock for Galileo. **Advances in Space Research**, v. 47, n. 5, p. 854–858, 2011. ISSN 02731177.

FORMAN, P. Atomichron: The Atomic Clock from Concept to Commercial Product. **Proceedings of the IEEE**, v. 73, n. 7, p. 1181–1204, 1985. ISSN 15582256.

FRANCHI, C. M. **Controle de processos industriais: princípios e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2011. 255 p.

FREESCALE. **Controller Area Network (CAN)**. [S.l.], 1998. Disponível em: https://www.nxp.com/files-static/microcontrollers/doc/data_sheet/BCANPSV2.pdf.

FREQUENCY, E. **Rubidium Atomic Frequency Standard Model FE-5680A**. 2016. Disponível em: http://freqelec.com/rb_osc_fe5680a.html.

GODONE, A. et al. High-performing vapor-cell frequency standards. **Nuovo Cimento Rivista Serie**, v. 38, p. 133–171, mar. 2015.

GOLDENBERG, H. M.; KLEPPNER, D.; RAMSEY, N. F. Atomic Hydrogen Maser. **Physical Review Letters**, v. 5, n. 8, p. 361–362, oct 1960. ISSN 0031-9007. Disponível em: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.5.361>.

GOUJON, D. et al. Development of the Space active Hydrogen Maser for the ACES Mission. **EFTF 2010 - 24th European Frequency and Time Forum**, n. 1, p. 2–7, 2010.

- GUILLOT, E. et al. Horace: Atomic clock with cooled atoms in a cell. In: **Proceedings of the 1999 Joint Meeting of the European Frequency and Time Forum and the Institute of Electrical and Elect.** United States: IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999. v. 1, p. 81–84. ISBN 0780354001.
- HAFIZ, M. A. et al. A high-performance Raman-Ramsey Cs vapor cell atomic clock. **Journal of Applied Physics**, v. 121, 2017. ISSN 10897550. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1703.04720>.
- HENDERSON, A.; PRAKASH, A. **Android for the BeagleBone Black**. [S.l.]: Packt Publishing, 2015. ISBN 978-1784392161.
- HOWE, D. Interpreting oscillatory frequency stability plots. **Proceedings of the 2002 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition (Cat. No.02CH37234)**, p. 725–732, 2002. ISSN 01616404.
- HUMPHREY, M. A. **Precision measurements with atomic hydrogen masers**. 2003. Tese (Doutorado) — Harvard University, 2003.
- INSTRUMENTS, N. **DAQ M Series M Series User Manual NI 622x, NI 625x, and NI 628x Multifunction I/O Modules and Devices**. Austin, Texas, 2016.
- JEFFERTS, S. R. et al. Accuracy evaluation of NIST-F1. **Metrologia**, v. 39, n. 4, p. 321–336, 2003. ISSN 0026-1394.
- JESPERSEN, J.; FITZ-RANDOLPH, J. **From Sundials to Atomic Clocks**. 1999. ed. Washington: [s.n.], 1999. 285 p. ISBN 978-0486409139.
- JUNIOR, J. D. M. **Sistema de laser de diodo de cavidade estendida para padrões de frequência**. may 2013. 118 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, may 2013. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18149/tde-29052014-144230/>.
- JUNQUEIRA, S. et al. Comparação remota de relógios atômicos da renertf. p. 3, 2012.
- KANG, S. et al. Demonstration of a high-performance pulsed optically pumped Rb clock based on a compact magnetron-type microwave cavity. **Journal of Applied Physics**, v. 117, n. 10, p. 19–23, 2015. ISSN 10897550.
- KLEINE-BUDDE, M. SocketCAN - The official CAN API of the Linux kernel. **13th International CAN Conference**, 2012. Disponível em: https://www.can-cia.org/fileadmin/resources/documents/proceedings/2012_kleine-budde.pdf.
- KLEPPNER, D. et al. Hydrogen-maser principles and techniques. **Physical Review**, v. 138, n. 4 A, 1965. ISSN 0031899X.
- KLEPPNER, D.; GOLDENBERG, H. M.; RAMSEY, N. F. Theory of the hydrogen maser. **Physical Review**, v. 126, n. 2, p. 603–615, 1962. ISSN 0031899X.
- KORPEL, A. **Acousto-Optics**. [S.l.]: CRC Press, 1996. 360 p. ISBN 082479771X, 9780824797713.

KOZLOVA, O. **Caractérisation d'une horloge à piégeage cohérent de population dans une vapeur thermique de césium. Principaux effets pouvant affecter la stabilité de fréquence á moyen-long terme.** 2012. 212 p. Tese (Doutorado) — Université Paris VI Pierre et Marie Curie, 2012.

KUSTERS, J.; CUTLER, L.; POWERS, E. Long-term experience with cesium beam frequency standards. **Proceedings of the 1999 Joint Meeting of the European Frequency and Time Forum and the IEEE International Frequency Control Symposium (Cat. No.99CH36313)**, v. 1, p. 159–163, 1999. ISSN 1075-6787. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/840733/>>.

LAWRENZ, W. **CAN System Engineering.** [S.l.: s.n.], 2013. v. 53. 1689–1699 p. ISSN 1098-6596. ISBN 978-1-4471-5612-3.

LETT, P. D. et al. Observation of atoms laser cooled below the doppler limit. **Phys. Rev. Lett.**, American Physical Society, v. 61, p. 169–172, Jul 1988. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.61.169>>.

LEVINE, J. Introduction to time and frequency metrology. **Review of Scientific Instruments**, v. 70, p. 2567–2596, 06 1999.

LEWIS, L. An introduction to frequency standards. **Proceedings of the IEEE**, v. 79, n. 7, p. 927–935, jul 1991. ISSN 00189219.

LOMBARDI, M. A.; HEAVNER, T. P.; JEFFERTS, S. R. Nist primary frequency standards and the realization of the si second. **NCSLI Measure**, Taylor Francis, v. 2, n. 4, p. 74–89, 2007.

LUGLI, A. B.; SANTOS, M. M. D. **SISTEMAS FIELDBUS PARA AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL: DEVICENET, CANOPEN, SDS E ETHERNET.** São Paulo: Érica, 2009. 160 p.

LUTWAK, R. The Sa.45S Chip-Scale Atomic Clock – Early Production Statistics. **Proceedings of the 43rd Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting**, p. 207–220, 2011.

LUTWAK, R. et al. the Chip-Scale Atomic Clock -Low-Power Physics Package . **36th Annual Precise Time and Time Interval Meeting**, p. 339–354, 2004.

_____. The chip-scale atomic clock – Recent Development Progress. **Proceedings of the 34th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, December 2-4, 2003, The Hilton Resort on Mission Bay, San Diego, California**, p. 539–550, 2003.

_____. The Chip-Scale Atomic Clock – Coherent Population Trapping Conventional Interrogation. **34th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting**, p. 539–550, 2002.

_____. The Miniature Atomic Clock - Pre-production results. **Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition**, p. 1327–1333, 2007. ISSN 1075-6787.

_____. The MAC - A miniature atomic clock. **Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition**, v. 2005, p. 752–757, 2005.

- MAGALHÃES, D. V. **Desenvolvimento de uma fountain atômica para utilização como padrão primário de tempo**. apr 2004. 158 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, apr 2004. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/76/76132/tde-17012008-161241/>>.
- MARGOLIS, H. S. Frequency metrology and clocks. **Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics**, v. 42, n. 15, p. 154017, 2009. ISSN 0953-4075.
- MBED, O. **CAN network with mbed**. 2016. Disponível em: <<https://os.mbed.com/handbook/CAN>>.
- MBED.ORG. **Explore | mbed**. 2015. Disponível em: <<https://developer.mbed.org/explore/>>.
- MICALIZIO, S. et al. Metrological characterization of the pulsed Rb clock with optical detection. **Metrologia**, v. 49, p. 425–436, 2012. ISSN 0026-1394. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1111.3450>> <<http://iopscience.iop.org/0026-1394/49/4/>>.
- MIYADAIRA, A. N. **Microcontroladores ARM Cortex M3: Família LPC175x/6x da NXP: Programação em linguagem C**. 1. ed. [S.l.]: Cia Books Ltda, 2012. v. 1. 696 p.
- MOLLOY, D. **Exploring BeagleBone: Tools and Techniques for Building with Embedded Linux**. 1. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, 2015. v. 1. ISBN 978-1-118-93512-5.
- MULLER, S. T. **Estudo da viabilidade de construção de um padrão de frequência atômico baseado em uma nuvem de átomos frios em expansão**. mar 2005. 98 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, mar 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/76/76132/tde-24062008-090738/>>.
- MULLER, S. T. **Padrão de frequência compacto**. apr 2010. 123 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, apr 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/76/76132/tde-11052010-154900/>>.
- MÜLLER, S. T. et al. Padrões Primários de Tempo e Frequência Desenvolvidos no Brasil. In: CATUNDA, S. Y. C. (Ed.). **Sba Controle & Automação**. 1. ed. Campina Grande: Sociedade Brasileira de Automática, 2010. cap. Metrologia, p. 13–24. ISBN 0103-1759. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-17592010000600001>>.
- MULLER, S. T. et al. Compact Frequency Standard Based on an Intra-cavity Sample Cold Cesium Atoms. v. 28, n. 11, p. 15, 2011. ISSN 0740-3224. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1108.4407>>.
- _____. Compact Frequency Standard Based on an Intra-cavity Sample Cold Cesium Atoms. p. 15, 2011. ISSN 0740-3224. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1108.4407>>.
- MÜLLER, S. T. et al. Free expanding cloud of cold atoms as an atomic standard: Ramsey fringes contrast. **Journal of the Optical Society of America B**, v. 25, n. 6, p. 909, 2008. ISSN 0740-3224.
- National Physical Laboratory. **60 years of the atomic clock**. 2017. 1 p. Disponível em: <<http://www.npl.co.uk/60-years-of-the-atomic-clock/>>.

NELSON, R. a. et al. The leap second: its history and possible future. **Metrologia**, v. 38, n. 6, p. 509–529, 2001. ISSN 0026-1394. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0026-1394/38/i=6/a=6?key=crossref.3deb78a77dda9988414f5fe17c163a81>>.

NXP, S. **UM10103 LPC176x/5x User manual**. 3.1. ed. [S.l.], 2014.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

OTOBONI, F. A. **Síntese de micro-ondas para padrões atômicos de frequência de céσιο¹³³**. apr 2013. 148 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, apr 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18149/tde-18112013-151233/>>.

PATURKAR, A.; KARULE, P.; DIKHOLKAR, A. An ARM 7 based temperature measurement system using CAN bus. In: **2014 IEEE International Conference on Consumer Electronics - China**. IEEE, 2014. p. 1–5. ISBN 978-1-4799-4756-0. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7029886>>.

PECHONERI, R. et al. Portable compact cold atoms clock topology. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 733, n. 1, 2016. ISSN 17426596.

PECHONERI, R. D. **Sistema de controle e monitoramento para padrão atômico de frequência de Césio**. mar 2013. 137 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, mar 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18149/tde-17052013-133752/>>.

PEREIRA, F. **Tecnologia ARM Microcontroladores de 32 Bits**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2007. 448 p. ISBN 9788536501703.

PHILLIPS, W. et al. Optical molasses: cold atoms for precision measurements. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 40, n. 2, p. 78–80, apr 1991. ISSN 0018-9456.

PHILLIPS, W. D. Laser cooling and trapping of neutral atoms: theory. **Physics Reports**, v. 219, n. 3-6, p. 153–164, 1998. ISSN 03701573.

_____. Nobel lecture: Laser cooling and trapping of neutral atoms. **Reviews of Modern Physics**, APS, v. 70, n. 3, p. 721, 1998.

POTTIE, P.-E. et al. 3D speckle cooling in a microwave clock. **IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, 2003. Proceedings of the 2003**, p. 150–154, 2003. ISSN 1075-6787.

RAAB, E. L. et al. Trapping of Neutral Sodium Atoms with Radiation Pressure. **Physical Review Letters**, v. 59, n. 23, p. 2631–2634, dec 1987. ISSN 0031-9007. Disponível em: <<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.59.2631>>.

RAMSEY, N. F. A molecular beam resonance method with separated oscillating fields. **Physical Review**, v. 78, p. 695–699, 1950.

_____. Magnetic shielding of nuclei in molecules. **Physical Review**, APS, v. 78, n. 6, p. 699, 1950.

- RICHARDSON, M. **Getting Started With BeagleBone**. 1. ed. Sebastopol: Maker Media, 2014. 143 p. ISBN 9781449345372.
- RIEHLE, F. **Frequency Standards Basics and Applications**. [S.l.: s.n.], 2004. 526 p. ISBN 3527402306.
- RODRIGUEZ, S. A. et al. Progress in Brazilian cesium atomic fountain-BrCsF. p. 0–3, 2016.
- ROSSETTO, N. et al. Dick effect and cavity pulling on HORACE compact cold atom clock. In: **Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition**. [S.l.: s.n.], 2011. ISBN 9781612841106. ISSN 1075-6787.
- ROY, A. et al. Instrumentation for atomic clock experiments. In: . [S.l.: s.n.], 2015.
- SALOMON, C. et al. Laser cooling of cesium atoms below 3 μk . **EPL (Europhysics Letters)**, IOP Publishing, v. 12, n. 8, p. 683, 1990.
- SANTARELLI, G. et al. Frequency stability degradation of an oscillator slaved to a periodically interrogated atomic resonator. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, v. 45, n. 4, p. 887–894, jul 1998. ISSN 0885-3010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/710548/>>.
- SANTOS, M. S.; BAGNATO, V. S. Construção de um sintetizador de microondas com vistas á aplicação em metrologia. v. 15, n. 1, p. 8–14, 2002.
- SANTOS, R.; PERESTRELO, L. **BeagleBone for Dummies**. 1. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, 2015. v. 1. ISBN 9781118992913.
- SCHILLER, S. et al. The space optical clocks project: Development of high-performance transportable and breadboard optical clocks and advanced subsystems. In: **2012 European Frequency and Time Forum**. IEEE, 2012. p. 412–418. ISBN 978-1-4673-1923-2. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6502414/>>.
- SHAH, V. et al. A compact and low-power cold atom clock. **2012 IEEE International Frequency Control Symposium, IFCS 2012, Proceedings**, p. 695–700, 2012.
- SHULER, R. L. The twins clock paradox history and perspectives. **Journal of Modern Physics**, n. 5, p. 1062–1078, 2014.
- SILVA, F. T. C. da. **Construção e avaliação de um relógio de césio**. apr 1998. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, apr 1998. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/76/76132/tde-20022014-172902/>>.
- SILVA, F. T. C. da. **Metrologia de tempo e frequência: relógio de feixe de césio e chafariz com átomos frios**. may 2002. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, may 2002. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/76/76132/tde-14102014-163814/>>.
- SOUSA, R. V. **CAN (Controller Area Network): uma abordagem para automação e controle na área agrícola**. 2002. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2002.

- STÄHLER, M. et al. Progress on a Miniature Cold-Atom Frequency Standard. **Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition**, OSA, v. 1, n. 11, p. 1–12, nov 2011. ISSN 1075-6787.
- SULLIVAN, D. B. et al. Characterization of clocks and oscillators. **NIST Tech. Note**, v. 1337, p. N–N, 1990.
- TARELHO, L. V. G. et al. The role of time and frequency metrology inside the new definitions of SI quantities. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 575, p. 012029, 2015. ISSN 1742-6596. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1742-6596/575/i=1/a=012029?key=crossref.243b0cbcd0ca0f9c60f7a523b0ee5c98>>.
- TELES, F. et al. Characterization of the Brazilian Cs atomic-frequency standard: evaluation of major shifts. **Metrologia**, v. 39, n. 2, p. 135–141, 2002. ISSN 0026-1394.
- THORNE, B. **python-can Release 2.0.0-alpha.2**. 2. ed. [S.l.], 2017.
- TORADEx. Colibri T20 Datasheet. p. 45, 2010. Disponível em: <<https://www.toradex.com/>>.
- _____. Colibri VFxx DataSheet. p. 59, 2013. Disponível em: <<https://www.toradex.com/>>.
- _____. Iris V1.1 Baseboard DataSheet. p. 1–27, 2015. Disponível em: <<https://www.toradex.com/>>.
- TOULSON, R.; WILMSHURST, T. **Embedded Systems, Microcontrollers, and ARM**. [S.l.: s.n.], 2017. 3–18 p. ISBN 9780080977683.
- TREMINE, S. **Etude du refroidissement laser d'atomes de césium 133 dans un champ de speckle 3D et réalisation d'une horloge atomique compacte**. 2016. 349 p. Tese (Doutorado) — Université Pierre et Marie Curie brune Ectocarpus, 2016.
- TREMINE, S. et al. Development of a compact cold atom clock. **Proceedings of the 2004 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2004.**, v. 00, n. c, p. 6–11, 2004. ISSN 1075-6787.
- _____. Limitations to the short term frequency stability in a compact cold atom clock. **Proceedings of the IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition**, v. 2005, p. 111–116, 2005.
- TRÉMINE, S. et al. Microwave interrogation in a compact atomic clock. **IET Conference Proceedings**, v. 5p, p. 421–425, 2004.
- TUBOY, A. M. **Preparação de laser de diodo e sua utilização em aprisionamento e estudo de átomos frios**. jul 1996. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, jul 1996. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/76/76132/tde-17042009-125921/>>.
- UQUANS, P. Q. **A high-performance frequency standard based on cold atoms**. 2017. Disponível em: <<http://www.muquans.com/index.php/products/mclock>>.
- VANIER, J. Atomic clocks based on coherent population trapping: A review. **Applied Physics B: Lasers and Optics**, v. 81, n. 4, p. 421–442, 2005. ISSN 09462171.

VANIER, J.; AUDOIN, C. **The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards**. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 1989. v. 1. ISBN 085274434X.

VANIER, J.; TOMESCU, C. **The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards: Recent Developments**. [S.l.: s.n.], 2015. v. 1. 486 p. ISBN 9781466576957.

V.Shah R. Stoner V. Vuletic R. Lutwak, M. M. A Miniature Cold-Atom Frequency Standard. p. 5890–5890, 2011.

WALLER, P. et al. Update on the in-orbit performances of giove clocks. **2009 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 22nd European Frequency and Time forum**, n. I, p. 388–392, 2009.

WANG, Q. et al. Lifetime of space Passive Hydrogen Maser. **2013 Joint European Frequency and Time Forum and International Frequency Control Symposium, EFTF/IFC 2013**, p. 973–976, 2013.

Wenzel Associates Inc. **Premium 100 MHz-SC Ultra Low Noise Crystal Osc.** 2006. 1 p.

WIEMAN, C. E.; HOLLBERG, L. Using diode lasers for atomic physics. **Review of Scientific Instruments**, v. 62, n. 1, p. 1–20, 1991. ISSN 10897623.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física IV: ótica e física moderna**. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2009. 420 p. ISBN 978-85-88639-35-5.

YUN, P. **Exploring New Approaches to Coherent Population Trapping Atomic Frequency Standards By**. 2012. Tese (Doutorado) — University of Chinese Academy of Sciences, 2012.

ZANON, T. et al. Observation of Raman-Ramsey fringes with optical CPT pulses. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 54, n. 2, p. 776–779, 2005. ISSN 00189456.

ZHOLNEROV, V. S.; VERSHOVSKIY, A. K.; ROZHDESTVENSKIY, Y. V. Project of a satellite slow beam atomic clock with CPT-Ramsey registration. **EFTF 2012 - 2012 European Frequency and Time Forum, Proceedings**, n. 2, p. 320–322, 2012.

ZUBERI, K.; SHIN, K. Real-time decentralized control with CAN. **Proceedings 1996 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. ETFA '96**, v. 1, p. 93–99, 1996.