

2. FUNDAMENTOS DE METROLOGIA DE TEMPO E FREQUÊNCIA

2.1. Sistema Internacional de Unidades (SI): um breve histórico

Podemos considerar a criação do Sistema Métrico Decimal, na época da Revolução Francesa, e a deposição de 2 padrões de platina, em 22 de junho de 1799, representando o metro e o quilograma, nos Arquivos da República, em Paris, como o primeiro grande passo para o desenvolvimento do que viria a ser o atual Sistema Internacional de Unidades (SI).

Em 1832, Gauss deu um grande impulso ao SI com a aplicação deste Sistema Métrico, juntamente com o segundo definido na Astronomia. Gauss foi o primeiro a fazer medições do campo magnético terrestre em termos de um sistema métrico decimal baseado em três unidades: milímetro, grama e segundo para as quantidades de comprimento, massa e tempo.

Na década de 1860, essas aplicações no campo da eletricidade e magnetismo foram mais desenvolvidas, sob a liderança de Maxwell e Thompson, através da *British Association for the Advancement of Science* (BAAS), mostrando a necessidade de um sistema coerente de unidades de base e unidades derivadas.

Em 1874, a BAAS introduziu o Sistema CGS baseado no centímetro, grama e segundo e usando prefixos desde *micro* até *mega* para expressar múltiplos e submúltiplos decimais.

Na década de 1880, a BAAS e a *International Electrical Congress*, precessora do *International Electrotechnical Commission* (IEC), aprovaram mudanças no conjunto das unidades, acrescentando o ohm para resistência elétrica, o volt para força eletromotriz e o ampère para corrente elétrica.

Em maio de 1875, o *Comité International des Poids et Mesures* (CIPM) se concentrou na construção de novos protótipos para o metro e o quilograma como unidades de base para comprimento e massa.

Em 1889, a primeira *Conférence Générale des Poids et Mesures* (CGPM) estabeleceu novos protótipos para o metro e o quilograma e, junto com o segundo astronômico, estabeleceram o sistema MKS (metro, quilograma e segundo) similar ao sistema CGS.

Em 1954, foi aprovada a introdução do Ampère, do Kelvin e da Candela.

Em 1960, na 11^a CGPM, foi dado o nome de Sistema Internacional de Unidades (SI).

Em 1971, na 14^a CGPM, foi introduzido o mol como unidade de base para quantidade de substância, atingindo-se a configuração atual de 7 unidades de base para o SI e que são definidas de maneira absoluta, sem referência a outras unidades. As unidades de base coincidem com as do sistema MKS, amplamente utilizado pelos engenheiros e cientistas na primeira metade do século XX .

Estas 7 unidades de base do SI são: o metro (m), para comprimento; o quilograma (kg), para massa; o segundo (s), para tempo; o ampere (A), para corrente elétrica; o kelvin (K), para temperatura; o mol, para quantidade de substância e a candela (cd), para intensidade luminosa.

O segundo é a unidade realizada atualmente com maior exatidão, com incertezas chegando à casa de uma parte em 10^{15} .

Em termos de acordos internacionais, o primeiro grande passo foi a assinatura da Convenção do Metro, em 20 de maio de 1875: um acordo diplomático, atualmente assinado por 51 nações, e que confere ao CIPM, ao *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) e à CGPM a autoridade para agir no âmbito da metrologia mundial, especialmente no que se refere aos padrões de medida, e para assegurar a prova de equivalência entre os padrões de diferentes países.

Em outubro de 1999, diretores de diversos *National Metrology Institutes* (NMI) e organizações internacionais assinaram o CIPM MRA (*Mutual Recognition Arrangement – Acordo de Reconhecimento Mútuo*).

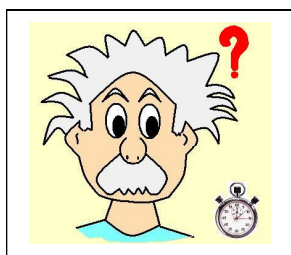
O SI é gerido pelo CIPM e todas as modificações ao SI são propostas à CGPM para a devida aprovação a fim de entrarem em vigor.

Participam da CGPM, com direito a voto (um voto por país signatário da Convenção do Metro), as delegações formalmente indicadas pelos países signatários. Participam ainda da CGPM, como convidados, representantes de Organismos Internacionais, tais como os da Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML) e da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), cujas atividades estão diretamente ligadas à metrologia.

2.2.

Unidades de tempo e freqüência (TF): uma visão histórica

Para se entender um pouco da evolução da metrologia de tempo e freqüência até o estágio atual, segue um breve histórico, começando com...O Enigma do Tempo...



O Tempo está presente na vida de todos.

O Tempo não ocupa espaço.

Usa-se o Tempo mas é difícil defini-lo.

Não é visto, não se pode pará-lo ou aprisioná-lo...mas é medido.

Os grandes cientistas e pensadores da Humanidade têm discorrido, meditado, dedicado muito tempo em busca de entender e definir o que é o Tempo.

A Natureza do Tempo... O que é Tempo ?

Santo Agostinho, teólogo que viveu no século V, observou que:

“Sabia muito bem o que era o tempo... até que alguém lhe perguntasse.”

O dicionário Aurélio fornece várias definições para tempo e as duas transcritas a seguir são particularmente importantes:

- i. A sucessão dos anos, dos dias, das horas, etc, que envolve para o homem a noção de passado, presente e futuro. “O tempo é um meio contínuo e indefinido no qual os acontecimentos parecem suceder-se em momentos irreversíveis...”
- ii. Fís.- Coordenada que, juntamente com as coordenadas espaciais, é necessária para localizar univocamente uma ocorrência física.

Mas, pode-se dizer que:

O **TEMPO** é algo abstrato e associado à consciência do ser humano sobre si e mudanças (eventos) que ocorrem ao seu redor.

Na verdade, o que sempre se faz é uma medição de
INTERVALO DE TEMPO.

A principal origem de observação e registro de intervalo de tempo foi o nascer e o por do sol.

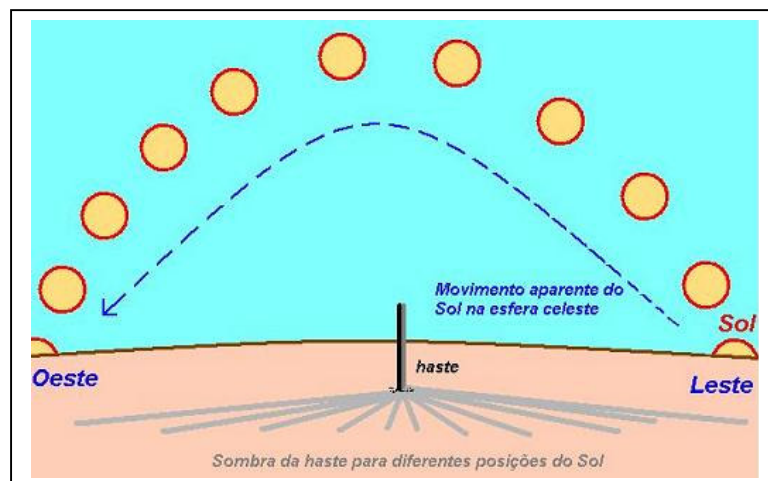


Figura 1 - Observação do movimento aparente do Sol na esfera celeste

O trajeto da sombra foi dividido em 12 partes dando origem ao primitivo relógio de Sol, conforme ilustrado pelas figuras 2 e 3.

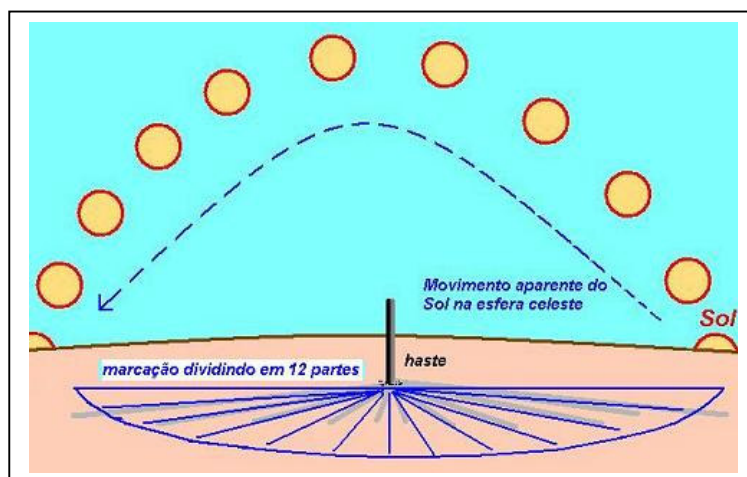


Figura 2 - Divisão em 12 partes para acompanhar o deslocamento da sombra

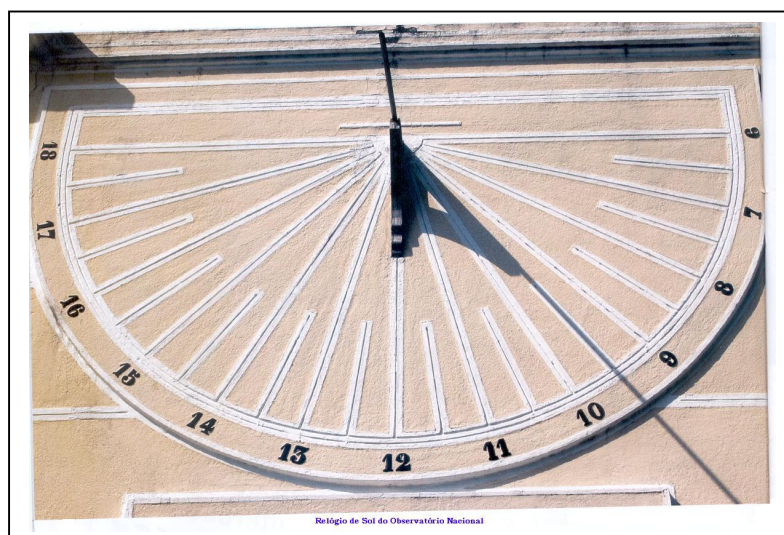


Figura 3 - Relógio de Sol do Observatório Nacional

Assim, foi possível estimar-se quanto tempo havia decorrido desde o nascer do Sol até o anoitecer.

Quando ficou definido que o período noturno durava o mesmo tempo do período diurno, ficou estabelecido que duas passagens do Sol consecutivas, referentes a uma mesma posição da marcação da passagem do Sol, correspondiam a 24 destas divisões chamadas de **horas**.

Esta hora foi chamada de **HORA SOLAR**, estabelecendo-se ao período destas 24 horas o chamado **DIA SOLAR**, baseado no movimento aparente do Sol na esfera celeste, correspondendo a uma rotação completa da Terra em torno de seu eixo.

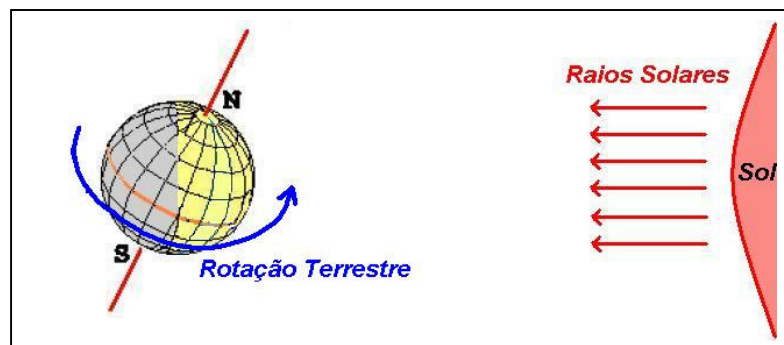


Figura 4 - Rotação terrestre e a hora solar

O homem observou que o tempo medido pelo relógio de sol variava e com o aperfeiçoamento da “arte” de medir tempo viu que podia haver desvios “consideráveis” deste tempo, especialmente em fevereiro e novembro.

Então, o **DIA SOLAR** foi corrigido para o **DIA SOLAR MÉDIO** que é a duração média de todos os dias solares individuais ao longo do ano, obtendo-se a Equação do Tempo.

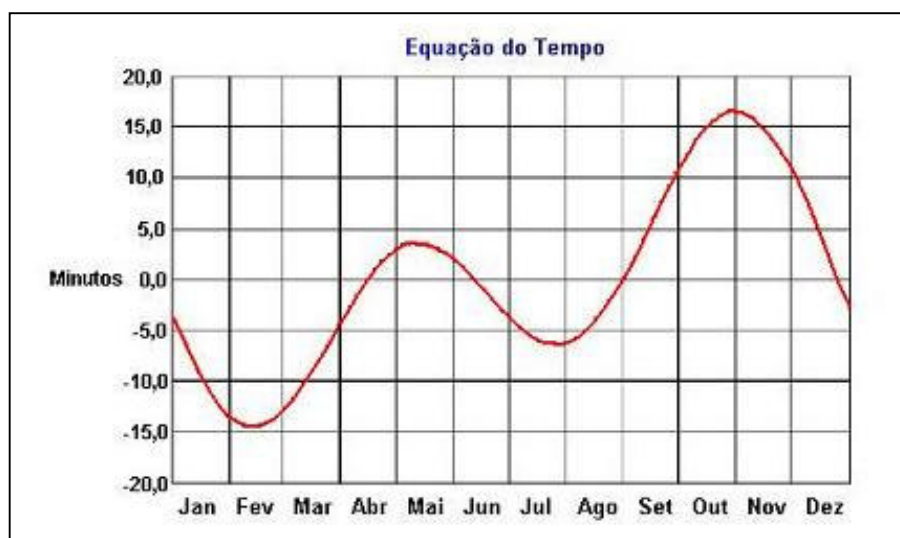


Figura 5 - Gráfico da equação do tempo

Equação do Tempo: é a diferença entre o Tempo Solar Verdadeiro e o Tempo Solar Médio. Seu maior valor positivo é cerca de 16 minutos e seu maior valor negativo é cerca de 14 minutos. Esta é a diferença entre o meio dia verdadeiro (passagem meridiana do Sol), e o meio dia do Sol médio.

Quando alguém se deslocava de uma cidade para outra, com o aperfeiçoamento dos mecanismos de medição como ampulhetas (relógios de

areia), clepsídras (relógios de água) passou-se a observar essas diferenças de tempo.

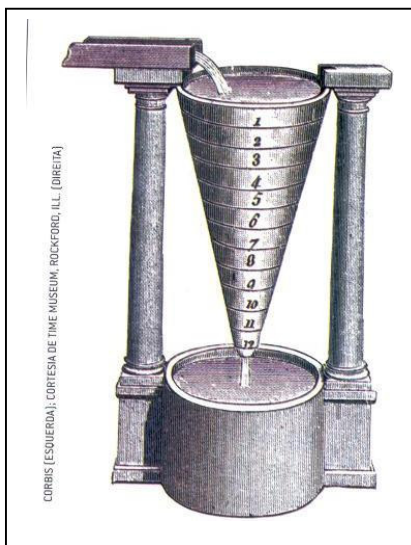


Figura 6 - Relógio de água
(Marcação de 12 h)

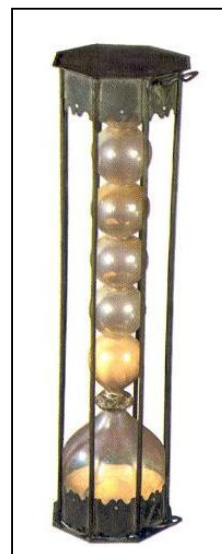


Figura 7 – Ampulheta Francesa
(séc. XVIII; hora dividida em intervalos de 10 minutos)

A partir daí, surgiu o conceito de **TEMPO LOCAL**, ou **HORA LOCAL**.

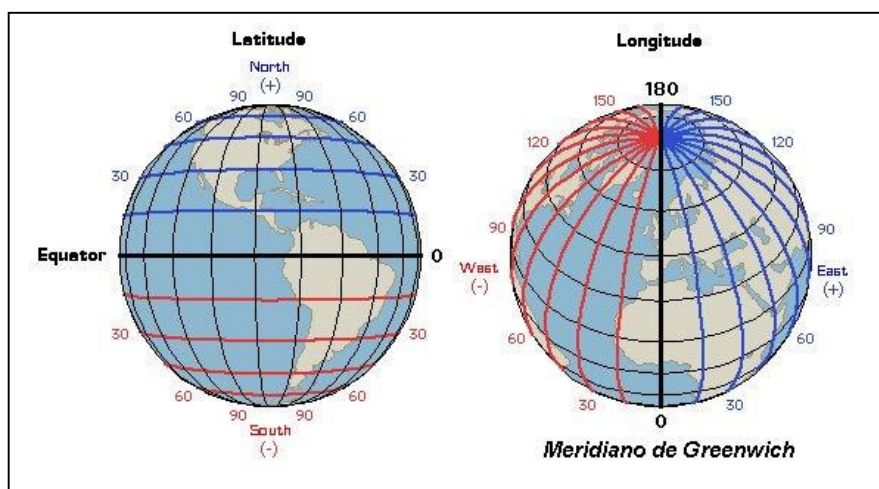


Figura 8 - Meridiano de Greenwich

Então, definiu-se um meridiano para a contagem de tempo e que é o **meridiano de Greenwich**. Este tempo associado a uma rotação completa da Terra em torno de seu eixo e referenciado ao meridiano de Greenwich passou a ser chamado **TEMPO UNIVERSAL (UT - *Universal Time*)** e é a partir dele que se estabelece a hora, mundialmente, para as demais longitudes.

2.3.

Definição do segundo, escalas de tempo e fusos horários

Conforme o homem foi identificando variações que influenciavam a escala de **TEMPO UNIVERSAL (UT - *Universal Time*)**, ele foi fazendo correções e estabelecendo diferentes escalas de tempo.

Fenômenos que interferem no Tempo Universal:

- “A Terra está desacelerando” – em virtude da interação Terra-Lua com efeitos diretos nas marés, estima-se que o dia está 16 ms mais longo que há 1000 anos atrás e, através do estudo de fósseis, que há 600 milhões de anos atrás o dia tinha 21 h.
- As posições dos pólos apresentam uma deriva de alguns metros de um ano para o outro. Acredita-se que tais flutuações sejam por efeitos sazonais e mudanças na estrutura da Terra.
- Flutuações regulares e irregulares sobrepõem-se alterando a velocidade de rotação da Terra. E algumas estão associadas à mudanças sazonais.

Então, surgiram outras **Escalas de Tempo**:

- a) Tempo Universal **UT** - designação genérica das escalas de tempo baseadas na rotação da Terra.
- b) Tempo Universal **UT0** - escala gerada pelo Dia Solar Médio.
- c) Tempo Universal **UT1** - UT0 corrigida quanto ao movimento dos pólos.
- d) Tempo Universal **UT2** - UT1 corrigida empiricamente para variações anuais e semi-anuais da rotação da Terra.

De todas essas observações e normalização surgiu a **primeira definição da unidade de base da grandeza Tempo**:

SEGUNDO

(primeira definição)

Até o ano de 1956, tendo em vista que o dia com 24 horas tem 86400 segundos, a unidade básica de tempo era definida como:

$$\frac{1}{86400} \text{ do Dia Solar Médio (UT0)}$$

O chamado Segundo Solar.

Nome = segundo

Símbolo = s

Observando que este tempo de referência associado à rotação terrestre e sua órbita em torno do Sol não era suficientemente estável, especialmente na observação de eventos astronômicos, o homem estabeleceu uma nova escala de tempo mais estável chamada: **Ephemeris Time (ET) – Tempo das Efemérides:**

Uma escala de tempo astronômica baseada no movimento orbital da Terra em relação às estrelas distantes, vigorando como referência de tempo desde 1956 até 1967.

O dia determinado por uma estrela é chamado **Dia Sideral** e é aproximadamente 4 minutos mais curto que o Dia Solar Médio.

É o chamado **Tempo Sideral**.

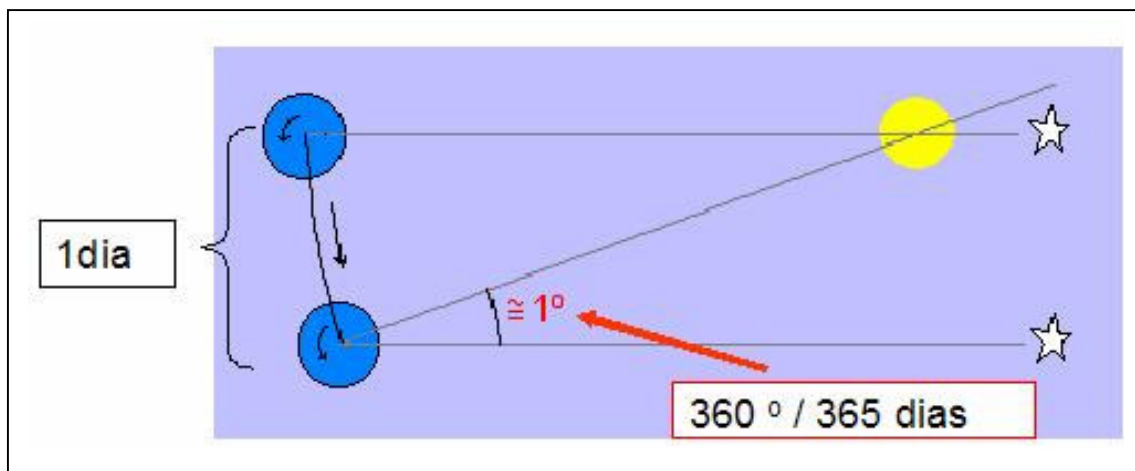


Figura 9 - Dia Sideral e o Dia Solar Médio

O Ano Sideral corresponde a 365,2564 Dias Solares Médios. Outro tipo de ano que é utilizado é o chamado **Ano Tropical**.

Ano Tropical é o intervalo de tempo que o Sol leva para realizar uma volta aparente na esfera celeste, saindo de um ponto de equinócio e retornando a ele.

O Ano Tropical corresponde a 365,2422 dias solares médios, ou seja, aproximadamente, 20 minutos mais curto que o Ano Sideral.

Então, estabeleceu-se uma nova definição para o segundo:

SEGUNDO

(segunda definição)

O conceito de segundo a partir do Tempo das Efemérides foi proposto pela 10^a CGPM em 1954 e ratificada em 1956 pelo CIPM conforme o texto seguinte:

“O segundo é a fração $1/31556925,9747$ do ano tropical de 0 de janeiro de 1900 às 12 horas do tempo das efemérides”

Esta definição foi ratificada pela 11^a CGPM em 1960.

O fato é que o tempo das efemérides não é adequado, em termos práticos do cotidiano, pois exige períodos de observação longos. Para se obter níveis de exatidão usuais requeridos no dia-a-dia seriam necessários alguns anos de observação dos eventos astronômicos.

Mas, continuando a história da evolução do Tempo Local (Hora Local), posteriormente surgiu o conceito de **TEMPO LEGAL** ou **HORA LEGAL** ou **HORA CIVIL** para padronizar e facilitar a vida entre os homens, entre as cidades e entre as nações.

O mundo foi dividido em 24 fatias de 15 graus, chamados de **FUSOS HORÁRIOS**, onde cada fatia tem a sua hora inteira, sem subdivisões. Ao passar-se de um fuso a outro, altera-se o relógio em horas inteiras e o tempo, dentro de cada fuso horário, é dado em relação ao **Meridiano Central do Fuso**.

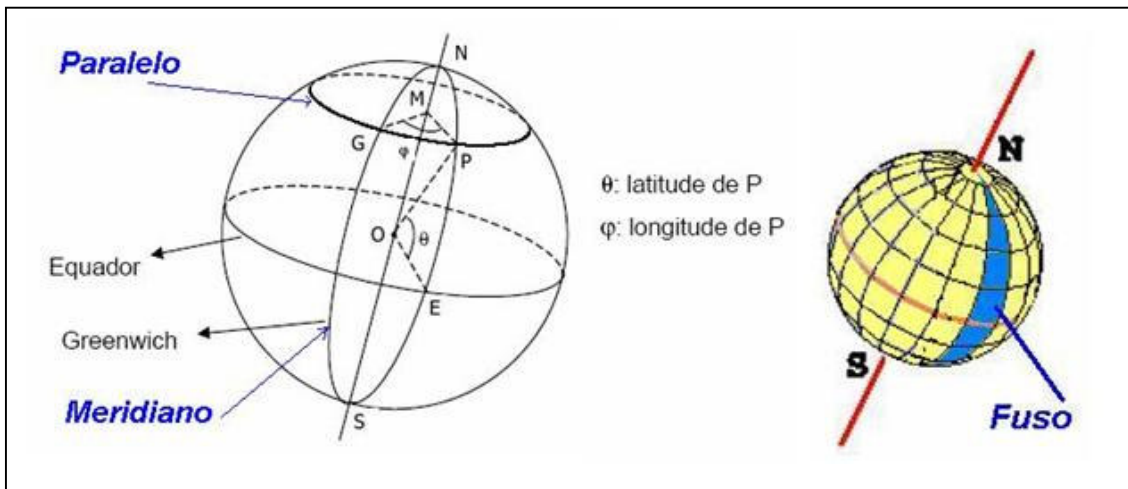


Figura 10 - Meridiano e Fuso Horário

Para cada fuso horário temos:

$360^\circ / 24 = 15^\circ$ e corresponde a 1 hora. Então, 1° corresponde a 4 minutos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611876/CA

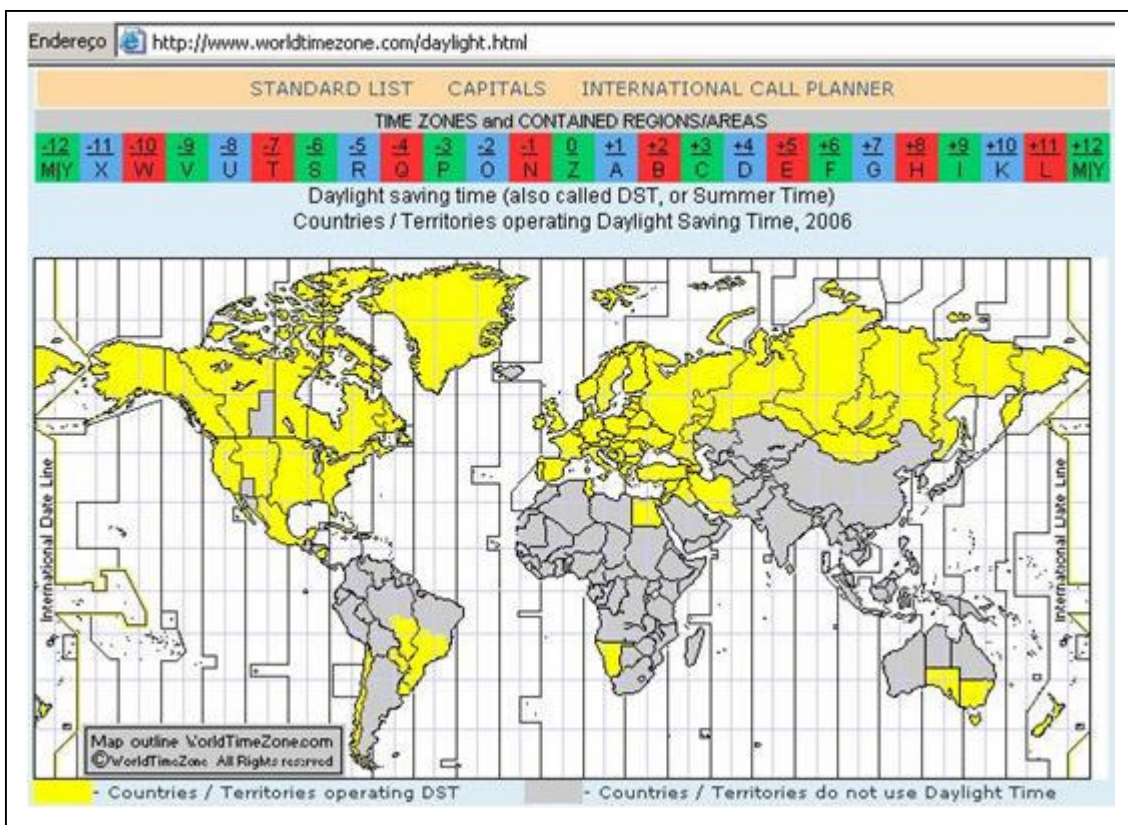


Figura 11 - Fusos Horários com Horário de Verão

O **Fuso ZERO** recebe a letra de identificação **Z** e seu meridiano central é o meridiano de Greenwich, sendo seus meridianos limites os de $007,5^\circ$ E e $007,5^\circ$ W. Portanto, a Hora Legal do Fuso ZERO é a própria Hora Média de Greenwich (É o próprio tempo UT0).

Este fuso também é conhecido como Tempo Zulu e, antigamente, designava--se a esta hora legal o acrônimo GMT (*Greenwich Mean Time*) que, atualmente, não é mais empregado.

Como a divisão política não segue rigidamente as fronteiras determinadas pelos fusos horários, alguns ajustes foram feitos de modo a melhor atender às necessidades dos países.

No Brasil, vigoram quatro fusos horários.



Figura 12 - Fusos horários no Brasil

Horário de Verão
 (Decreto Nº 5.920 de 03/10/2006)
 Período: 00h de 05/11/2006 até 00h de 25/02/2007

Adotam: Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Distrito Federal.

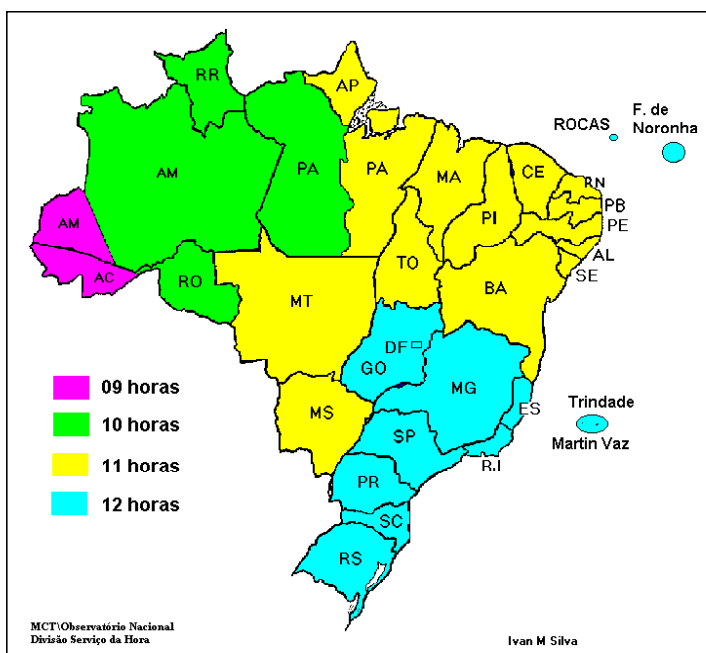


Figura 13 - Brasil, os fusos horários e o horário de verão 2006/2007

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611876/CA

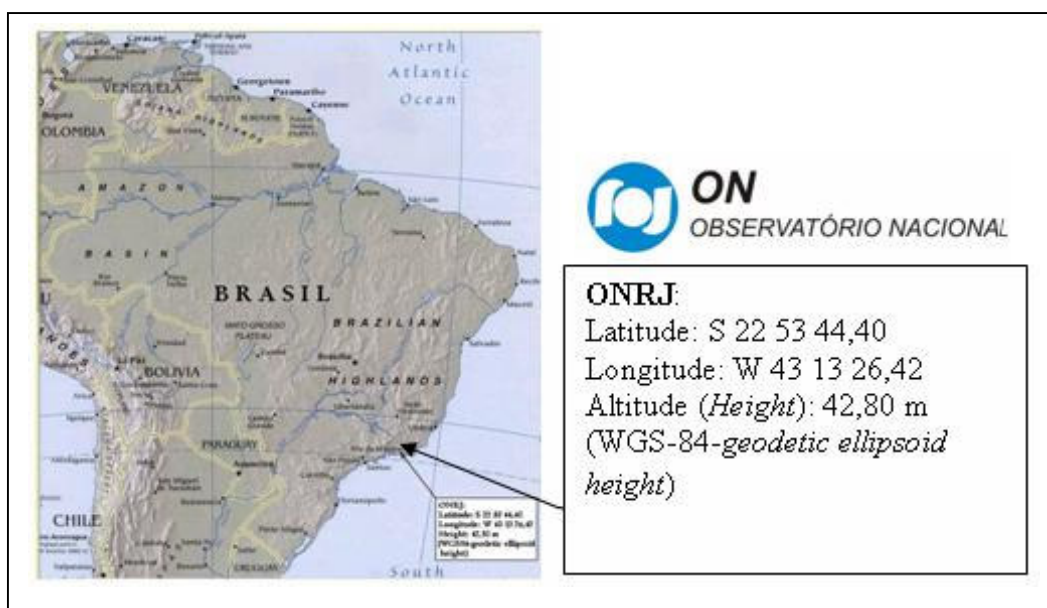


Figura 14 - Localização geográfica do Observatório Nacional

Estabeleceu-se a **Linha Internacional de Mudança de Datas**, a 180° de Greenwich, que passa pelo meio do oceano Pacífico, correspondendo a uma área pouco habitada, de modo a causar menores problemas operacionais, já que o cruzamento desta linha implica na mudança da data.

Um novo dia começa na Terra, por convenção, quando o Sol Médio passa pelo meridiano inferior de Greenwich, isto é, pelo meridiano de 180° .

Há uma diferença de exatamente 24 horas entre os dois lados do meridiano de 180° , pois o setor que se estende de $172,5^\circ$ E a 180° constitui o fuso +12 e o setor de $172,5^\circ$ W a 180° constitui o fuso -12.

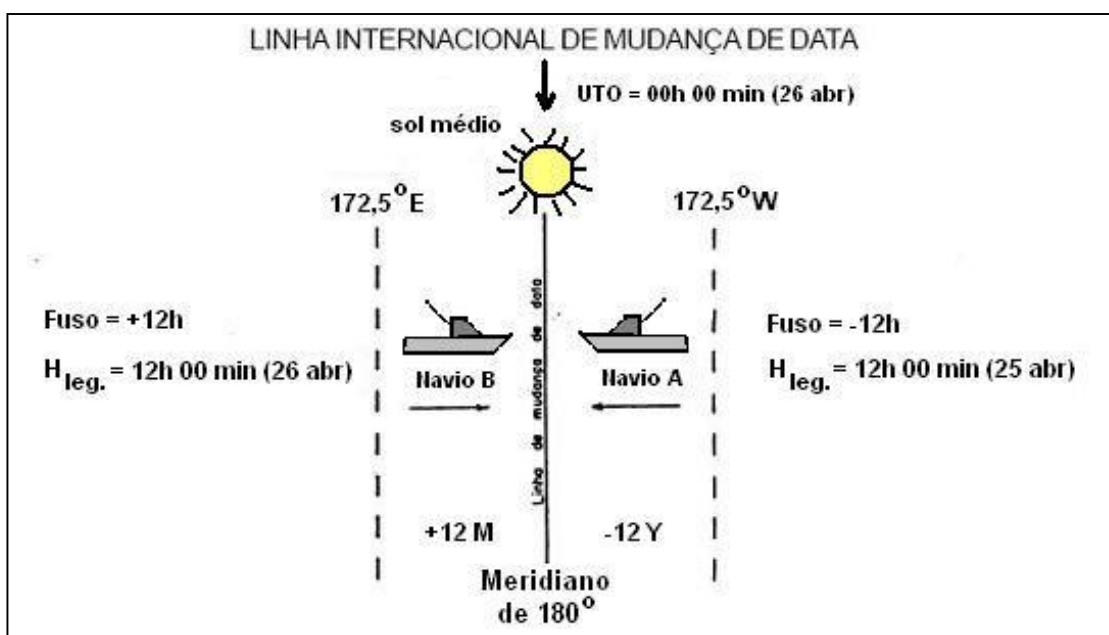


Figura 15 - Linha internacional de mudança de data

Desta forma, se tem duas condições na figura 15 para um navio cruzando o meridiano de 180° :

- Para o navio B navegando no sentido E (LESTE), subtrai-se um dia da data.
- Para o navio A navegando no sentido W (OESTE), soma-se um dia à data.

2.4.

A navegação e a necessidade de relógios estáveis

A necessidade de se desenvolver relógios estáveis surgiu com a navegação e, particularmente, com a dificuldade de determinar a **longitude** de um local. A longitude está associada diretamente à hora local.

A determinação da **latitude** é um processo mais fácil e exato, especialmente no hemisfério norte, onde a Estrela Polar indica facilmente o Polo Norte em virtude de situar-se verticalmente sobre ele.

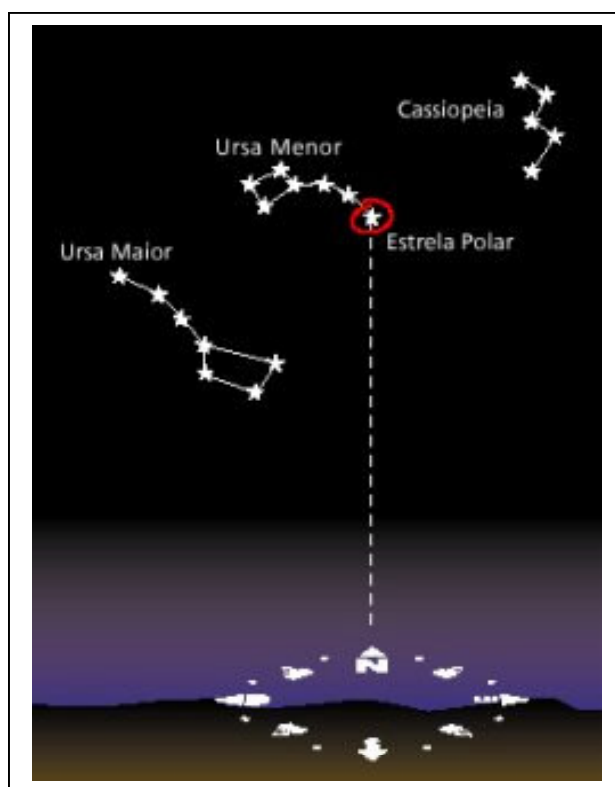


Figura 16 - Estrela Polar

À noite, olhando para o céu, a Estrela Polar indica sempre a direção do norte da Terra. As outras estrelas rodam todas em torno da Estrela Polar.

O ângulo que a Estrela Polar faz com o horizonte é a latitude do lugar onde se encontra o observador na superfície terrestre.

Por exemplo, quando se observa a Estrela Polar em qualquer local ao longo do paralelo dos 30° N, o ângulo que a Estrela Polar faz com o horizonte, determinado com o astrolábio, é de 30° .

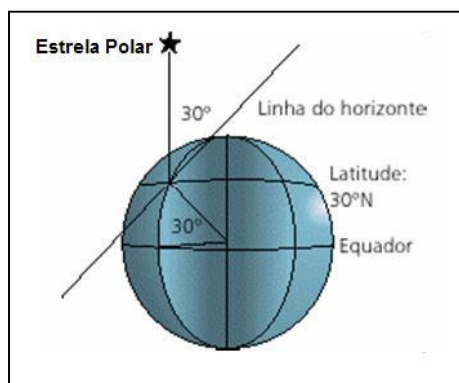


Figura 17 - Latitude e a Estrela Polar



Figura 18 - Astrolábio português (séc. XVII)



Figura 19 – Sextante moderno

Quanto à determinação da longitude, nos primórdios da navegação, o processo era mais complicado e sujeito a erros.

Sabendo que cada 1 grau de arco deslocado para leste ou para oeste corresponde a 4 minutos, se o navegador observasse a hora do local da viagem e tivesse um relógio que indicasse a hora do seu porto de partida, cuja posição ele conhece (por exemplo, a hora de Greenwich), conseguiria então determinar sua longitude.

O relógio de pêndulo foi um grande avanço na marcação de tempo, mas não era funcional para uso em navios velejando em mares agitados, sujeitos a umidade e variações de temperatura. Era uma tarefa nada fácil para os relógios dos séculos XV ao XVIII.

Foram tantas as dificuldades encontradas por perda de rumo e de naufrágios que, em 1598, o rei Filipe III de Espanha ofereceu um prêmio para quem descobrisse um processo prático de determinar a longitude. Mais tarde,

em 1714, o rei George III de Inglaterra, a pedido de navegadores e comerciantes, instituiu o prêmio do Ato da Longitude para quem encontrasse uma solução prática e confiável para o problema da determinação da longitude.

A invenção de um relógio que funcionasse nos navios foi feita pelo carpinteiro inglês John Harrison, em meados do século XVIII, e o primeiro teste náutico foi realizado em 1736, numa viagem para Lisboa. Este relógio de John Harrison pesava 35 Kg.

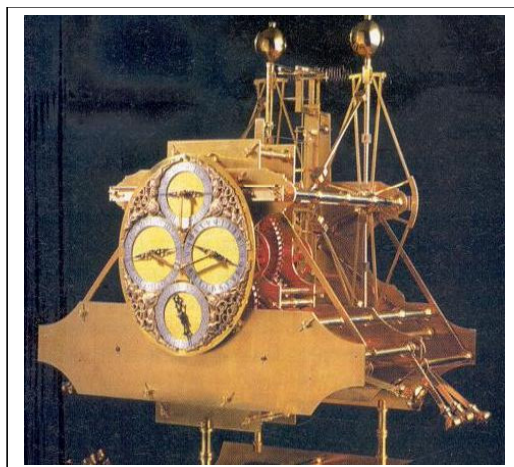


Figura 20 - Relógio de Harrison

Só depois de 1773 é que se tornou possível determinar com precisão longitudes no mar. Até lá, a navegação era feita com grande risco, tendo ficado na história vários relatos de acidentes por perda de orientação. Muitas vezes, por segurança, os navegadores seguiam rotas ao longo de paralelos, mantendo sempre a mesma altura do Sol ao meio-dia. Foi o caso de Cristóvão Colombo que, em 1492, chegou à América navegando sempre ao longo de um paralelo.

Harrison não estava contente com a precisão nem com as dimensões do seu relógio. Nos vinte e cinco anos que se seguiram, construiu mais três protótipos. Durante este tempo, Harrison foi apoiado pela Sociedade Real Inglesa e desenvolveu todos os mecanismos que estão na base dos relógios modernos.

O quarto relógio só foi acabado em 1759, pesando 1,5 kg. Depois dos testes de navegação à Índia, John Harrison recebeu em 1773 o prêmio do Ato das Longitudes, morrendo três anos depois.

2.5. Tempo, período e freqüência

Associado ao tempo tem-se o conceito de FREQÜÊNCIA.

A freqüência reflete o número de vezes que determinado evento ocorre por intervalo de tempo.

Freqüência é a taxa de ocorrência de um evento repetitivo

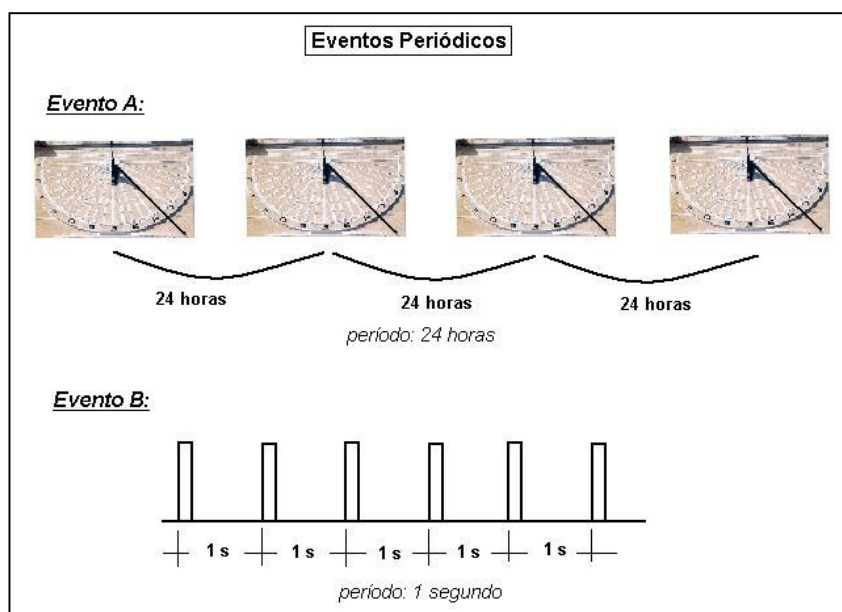


Figura 21 - Períodos de eventos repetitivos

A unidade do SI para Freqüência :

Nome = hertz

Símbolo = Hz

Expressão em unidade de base = s^{-1}

O hertz é unidade derivada do segundo.

No caso de um evento ocorrendo uma vez por segundo, podemos expressá-lo em unidade de freqüência como um sinal com freqüência de 1 Hz (1 hertz). Ou seja, 1 Hz é a freqüência de um evento periódico cujo período tem a duração de 1 segundo.

O Hz é uma das 21 unidades derivadas das unidades de base do SI.

Na medida em que a freqüência de determinado evento aumenta, isto significa dizer que o intervalo de tempo (período) entre eles diminui e vice-versa: matematicamente um é o inverso do outro. Se T é o período de um evento repetitivo, então a freqüência é $f = 1/T$ e vice-versa, sendo T o intervalo de tempo entre os eventos repetitivos.

Nos equipamentos e padrões utilizados em Tempo e Freqüência (TF), pode-se observar um sinal chamado **1PPS**.

Este sinal é uma seqüência de pulsos elétricos de baixa freqüência, cada pulso sendo gerado uma vez a cada segundo (1 Pulso Por Segundo = 1PPS) e usado para sincronizar os equipamentos, no tempo.

Portanto, o sinal 1 PPS é um sinal usado como padrão de tempo (1 s).

2.6. Exatidão e estabilidade

No desenvolvimento de diversos instrumentos de medição de intervalo de tempo, incluindo os relógios, buscou-se sempre dispositivos cada vez mais “exatos e estáveis com o tempo”.

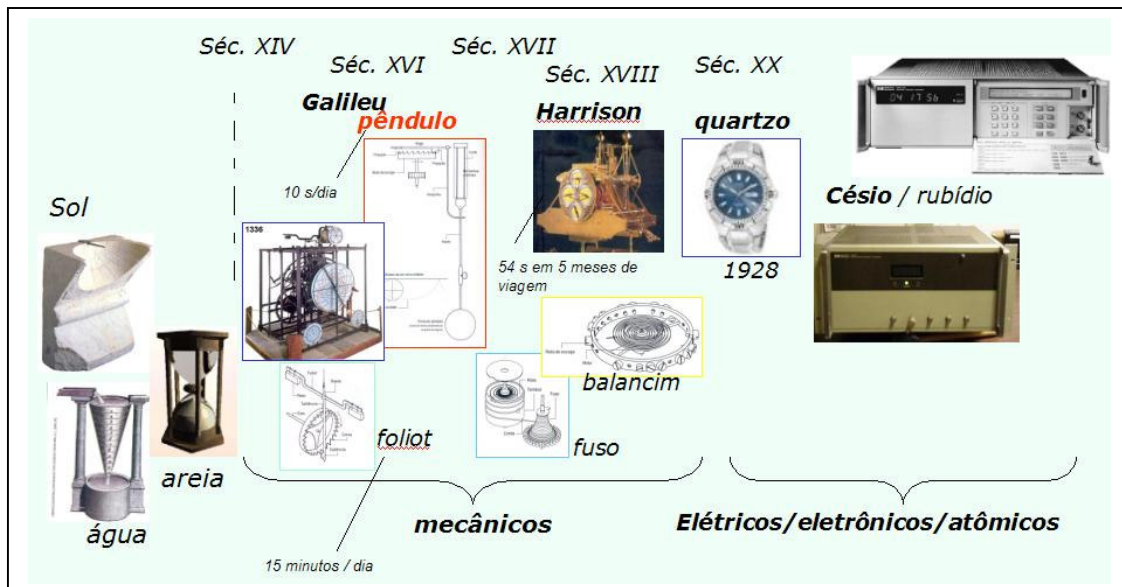


Figura 22 - Linha do tempo e a evolução dos relógios (clocks)

A seguir, a estabilidade de alguns relógios antigos:

- Século XIV - Foliot → 15 minutos/dia.
- 1656 - Huygens (pêndulo) → 10 s/dia.
- 1759 - John Harrison → 54 s em 5 meses de viagem.

Características estruturais dos relógios:

Qualquer relógio apresenta, basicamente, três características estruturais:

- 1) um dispositivo que produza um evento periódico e chamado de **ressonador**;
- 2) um dispositivo para sustentar a geração deste evento periódico fornecendo energia ao ressonador. O conjunto desta fonte de energia e do ressonador é chamado **oscilador**;
- 3) um dispositivo para contar, armazenar e apresentar estes eventos e sua periodicidade que é chamado de **contador / mostrador**.

Na prática, há sempre “atrito” e outras perdas energéticas que fazem com que o ressonador execute alguns ciclos e depois pare. Este tempo que um ressonador leva para “morrer”, desde o instante em que foi inicialmente excitado, é chamado de Tempo de Decaimento.

O parâmetro que reflete essa característica de um ressonador é o Fator de Qualidade-Q.

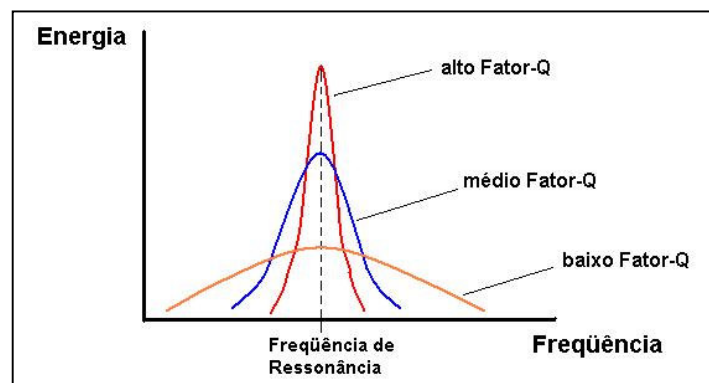


Figura 23 - Curvas de ressonância

O Fator-Q é função da **Freqüência de Ressonância** e da **Faixa de Operação** do dispositivo.

Dispositivos ressonadores com baixo Fator-Q são estruturas que podem oscilar em faixas mais largas de freqüências sendo, portanto, menos **seletivas** (menos **exatas**) e com assim menos **estáveis**.

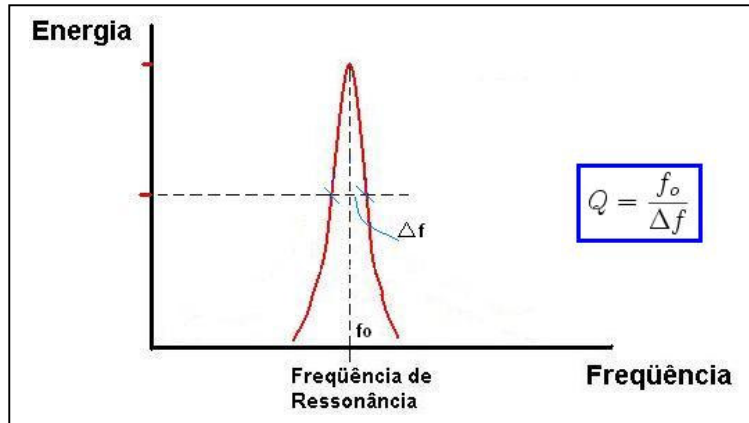


Figura 24 - Curva de ressonância e o Fator-Q

Quanto maior o tempo de decaimento, mais estreita é a curva de ressonância: menor o Δf . Demonstra-se que:

$$\text{Tempo de Decaimento} = \frac{1}{\Delta f} \quad (2.1)$$

Tabela 1 - Tipos de relógios e seus valores típicos de Fator-Q

Tipo	Fator-Q
Relógio com balancim	1000
Relógio com diapasão	2000
Relógio de quartzo	10^5 a 10^6
Relógio de rubídio	10^6
Relógio de césio	10^7 a 10^8
Relógio de maser de hidrogênio	10^9

Um grande avanço em exatidão e estabilidade veio com o **relógio de quartzo**, em 1928.

A estrutura atômica do **crystal de quartzo** funciona como ótimo ressonador através da característica física intrínseca que apresenta e denominada:

Efeito piezoelétrico:

- que é a produção de uma voltagem elétrica quando um cristal é comprimido. A voltagem gerada é proporcional ao grau de compressão. Se o cristal é estirado, uma voltagem de polaridade oposta é originada. O efeito piezoelétrico reverso é a compressão ou expansão de um cristal induzida pela aplicação de uma voltagem.

A freqüência de ressonância de um cristal de quartzo depende da forma como é cortado e de seu tamanho, podendo oscilar desde alguns milhares a alguns milhões de Hz, apresentando elevado Fator-Q.

Um ótimo relógio a quartzo pode apresentar estabilidade de 1ms / mês.

Todo oscilador apresenta flutuações de sua freqüência em torno de seu ponto de operação nominal. Assim, por meio de cálculo de média de valores obtidos para determinado intervalo de tempo chamado *Average Time* ou *Averaging Time* (tempo médio), durante o processo de calibração, caracteriza-se a estabilidade de freqüência, obtendo-se curvas típicas conforme ilustração da figura 25 e detalhamento no item 3.2.

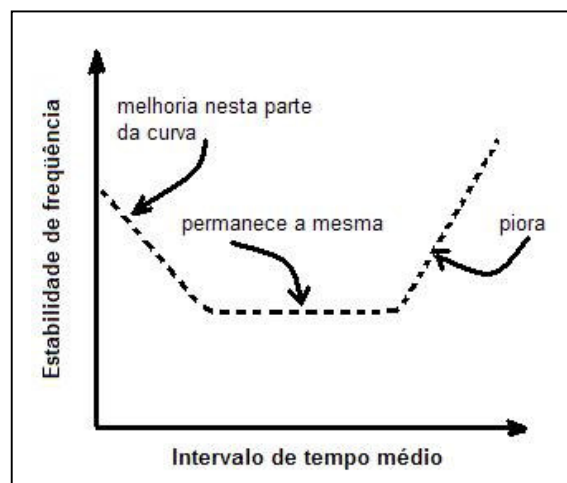


Figura 25 - Curva típica de estabilidade de um oscilador

O próximo grande salto no desenvolvimento de relógios mais exatos e estáveis foi usar átomos como ressonadores e que atingem Fator-Q da ordem de 100 milhões: os **Ressonadores Atômicos**.

2.7. Padrões atômicos de TF e o tempo atômico

Padrões de freqüência são dispositivos que geram freqüências bem conhecidas e exatas.

Padrões atômicos de freqüência são os dispositivos geradores de freqüência que utilizam ressonadores atômicos.

A seguir, alguns importantes eventos no desenvolvimento destes padrões atômicos de freqüência, seus princípios de funcionamento e o surgimento do Tempo Atômico, até o estado-da-arte desta tecnologia.

Em 1945, Isidor Rabi, físico na *Columbia University*, propôs um relógio, utilizando a técnica de *atomic beam magnetic resonance* (ressonância magnética de feixe atômico).

Em 1949, utilizando a técnica de Rabi, o NIST (*National Institute of Standards and Technology* – antigo NBS – *National Bureau of Standards*) anunciou o primeiro relógio atômico do mundo, empregando moléculas de amônia como ressonador.

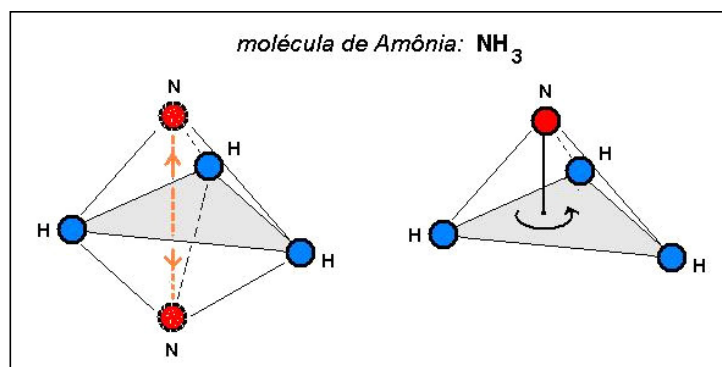


Figura 26 - Ressonador com moléculas de amônia

Ele foi elaborado no período pós-guerra, onde havia um grande número de pesquisas na faixa de freqüência de radar. Na freqüência de 23,87 GHz, a

estrutura atômica das moléculas de amônia apresenta uma freqüência de ressonância associada à uma alternância espacial do átomo de nitrogênio (N) em relação ao plano formado pelos três átomos de hidrogênio (H), ilustrada na figura 26 (Jespersen, J. Fitz-Randolph, 1999).

Esta característica atômica determinou que, ao se excitar com um sinal de Radio-Freqüência (RF) de 23,87 GHz um tubo contendo moléculas de amônia, fosse observada uma absorção de energia e conseqüente queda de corrente na saída de um detector, conforme figura 27. Com isso, através de uma “malha de realimentação” (*feedback*), controlava-se a freqüência de operação do oscilador de base do sinal de RF e, assim, a exatidão da freqüência de operação deste oscilador ficava determinada por uma característica atômica altamente estável.

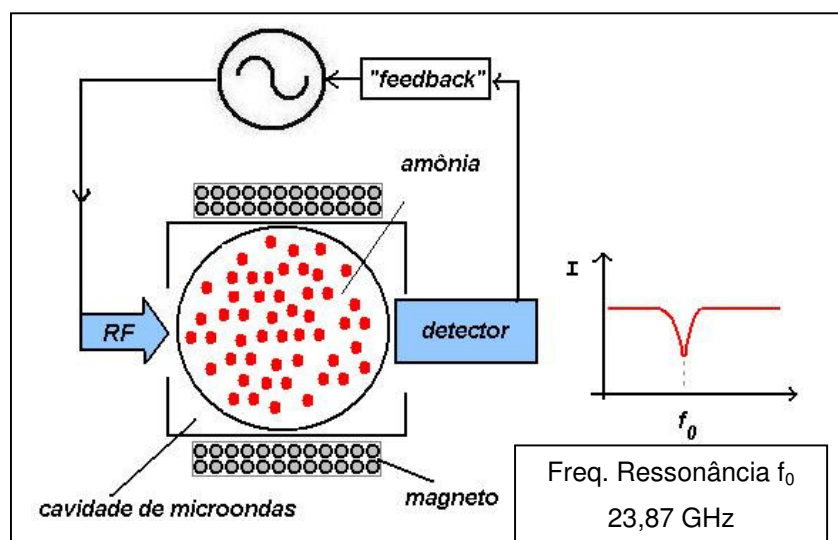


Figura 27 - Princípio de funcionamento do padrão atômico de amônia

Em 1952, o NIST realiza a primeira medição exata de freqüência usando relógio com ressonância de césio e cujo conjunto era chamado NBS-1. O princípio de funcionamento será descrito adiante.

Em 1955, o NPL (*National Physical Laboratory*), da Inglaterra, constrói o primeiro relógio a feixe de césio como fonte de calibração – primeiro padrão de freqüência de césio apresentado na figura 28.

Assim como o ressonador com moléculas de amônia utilizava uma característica atômica altamente estável para controlar a freqüência de

operação de um oscilador, o padrão de freqüência de césio também funciona de forma análoga, só que utilizando característica atômica do átomo de césio.

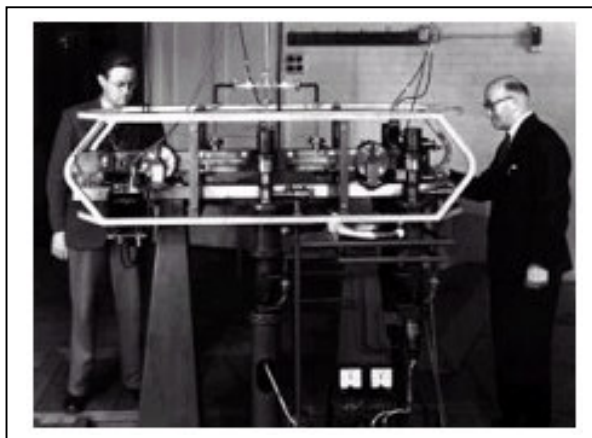


Figura 28 - Essen (à direita) e Jack Parry, no NPL, com o padrão de césio que desenvolveram, em 1955, e com estabilidade de 1 s em 300 anos.

O césio, conforme indicado na figura 29, pertence à classificação 1^a dos elementos da Tabela Periódica referente aos metais alcalinos e que possuem um único elétron na sua camada externa (elétron de valência). E é na “polarização” do *spin* deste elétron dos átomos de césio e nas leis da Mecânica Quântica que é baseado o princípio de funcionamento do ressonador com tubo de césio.

http://educar.sc.usp.br/quimica/tabela.html

Sólido	Líquido	TABELA PERIÓDICA										Gás	Sintetizados							
55 Césio		n° Atômico/Nome										Bunsen e Kirchoff 1860	Descobridor							
1 1A	2,8,18,18,8,1	Elétrons nas Camadas										28,4 690,0	Fusão/Ebulição(°C)	18 0						
H 1	2 2A	132,9054	Peso Atômico										0,79	Eletronegatividade	13 3A	14 4A	15 5A	16 6A	17 7A	He
Li	Be	[Xe]6s1										Configuração Eletrônica*								
Na	Mg	3 3B	4 4B	5 5B	6 6B	7 7B	8 8B	9 8B	10 8B	11 1B	12 2B	Al	Si	P	S	Cl	Ar			
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr			
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe			
Cs	Ba	La/Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn			
Fr	Ra	Ac/Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	-	-	-									
Lantanídeos		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
Actinídeos		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

Figura 29 - Tabela periódica de elementos com indicação do césio

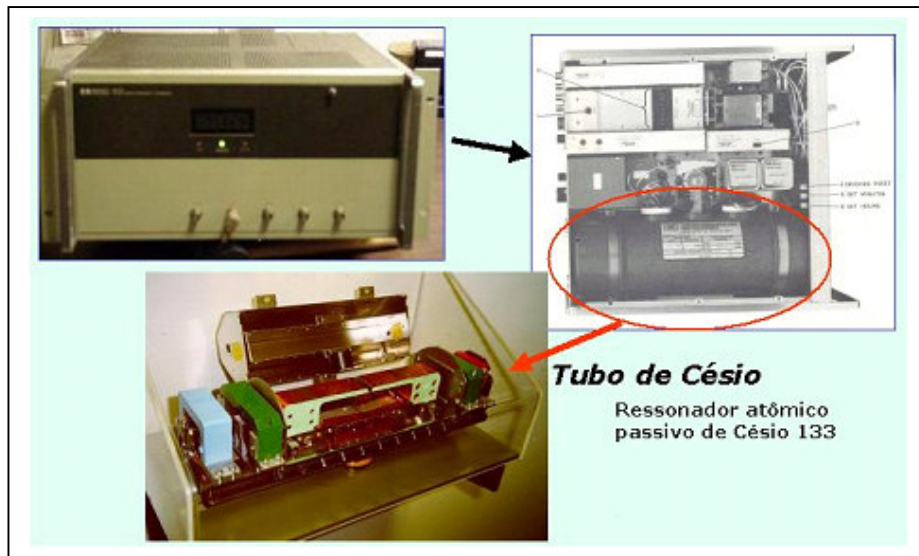


Figura 30 - Padrão de freqüência de césio: visualização interna

A mencionada “polarização” está fundamentada na Mecânica Quântica e nas transições quânticas ocorridas em Estruturas Hiperfinas cujo conceito e comparação com outros níveis energéticos estão apresentados na figura 31.

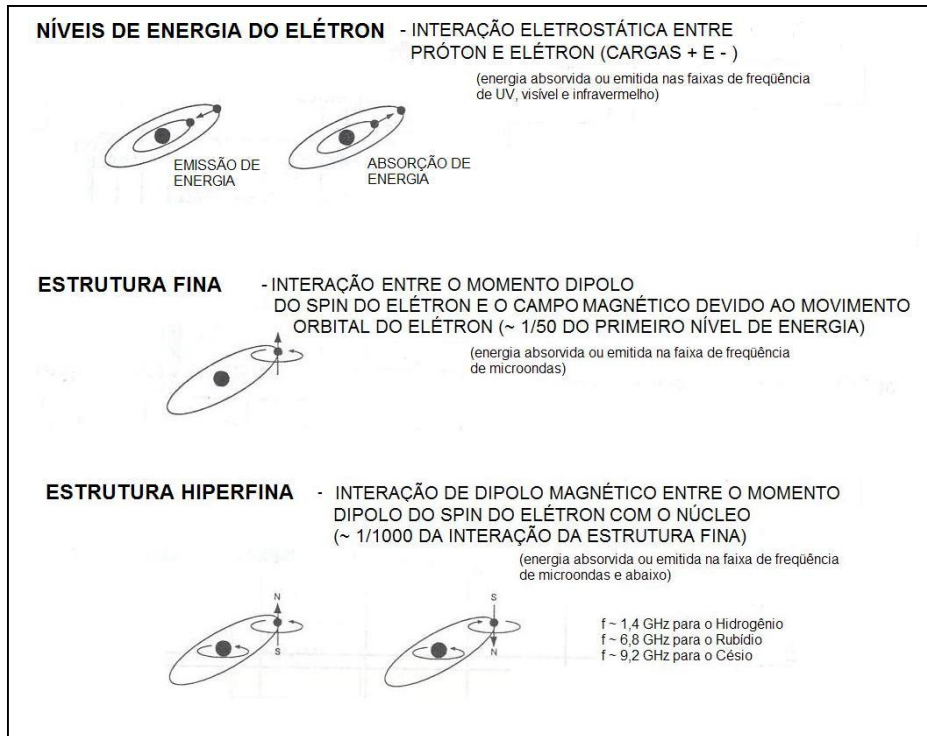


Figura 31 - Interações Energéticas

Os osciladores atômicos usam os níveis de energia nos átomos e moléculas para determinar sua freqüência de ressonância.

As leis da Mecânica Quântica estabelecem que um sistema atômico tem determinados níveis discretos de energia.

Com uma excitação energética externa (um campo eletromagnético externo), o sistema pode passar para um estado energético maior. E, deste estado energético maior, o sistema pode retornar ao estado mais baixo anterior, emitindo uma energia eletromagnética.

A figura 32 representa esta absorção e emissão de energia (um “pacote de energia” = *quantum*) entre diferentes níveis quânticos.

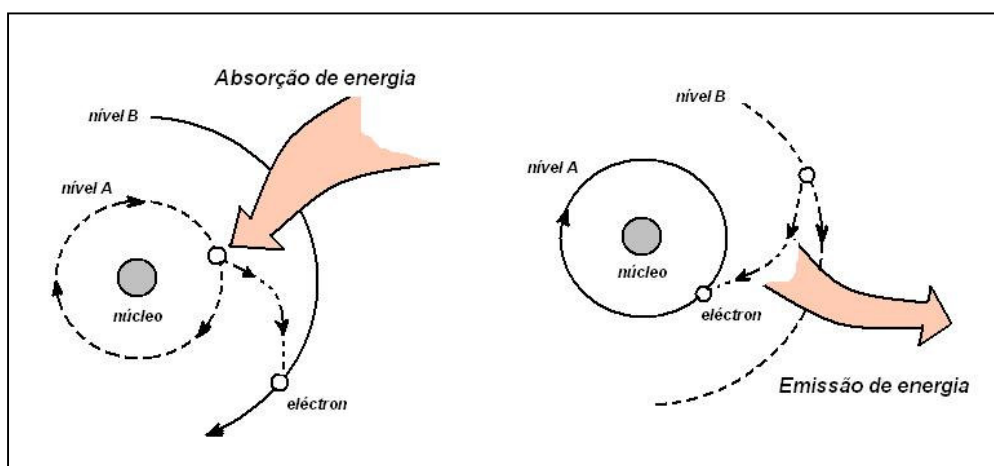


Figura 32 - Absorção e emissão de energia entre diferentes níveis energéticos

A freqüência de ressonância (f_0) de um oscilador atômico é dada pela relação a seguir:

$$f_0 = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (2.2)$$

E_2 e E_1 correspondem aos níveis energéticos de cada estado e h é a Constante de Planck.

O valor de $E_2 - E_1 = h \cdot f_0$ é o valor do “pacote de energia” (*quantum*) absorvido e emitido neste processo.

Além do padrão de césio, há outros dois osciladores atômicos de uso generalizado que são: padrões de rubídio e masers de hidrogênio. Há também, em plena evolução, mas ainda não disponível comercialmente, o padrão tipo *fontaine* (fonte) que será descrito adiante.

No caso do ressonador com tubo de césio, a freqüência de ressonância é dada pela transição atômica que ocorre entre os níveis energéticos F_3 e F_4 do césio (Transição Hiperfina) e aproximadamente igual a 9,2 GHz, conforme ilustrado na figura 33 (Site CNRC, 2006 – 2007).

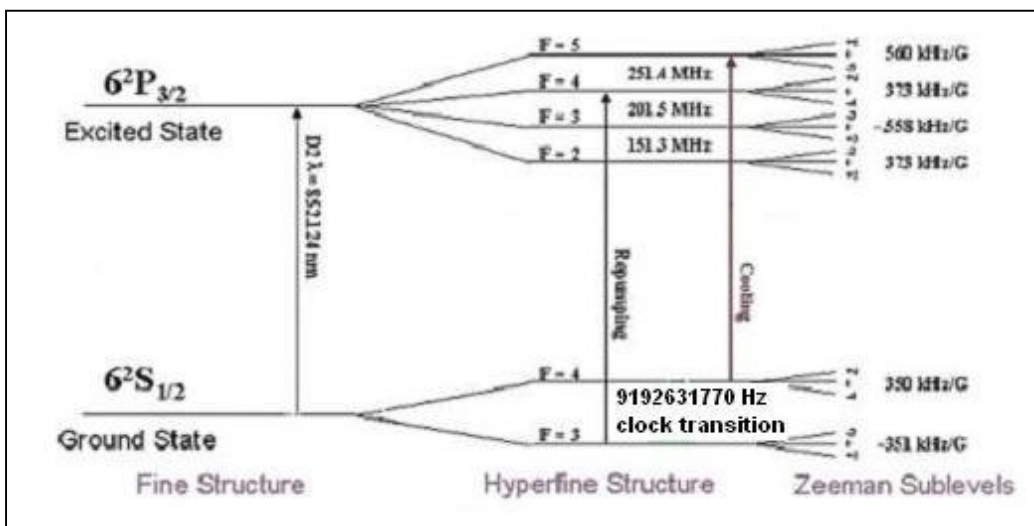


Figura 33 - Transição Hiperfina em um Padrão de Césio

Esta é uma freqüência de ressonância natural do átomo de césio, enquanto, no ressonador de amônia, a freqüência de ressonância é uma característica natural resultante da interação energética dos quatro átomos que compõem a molécula de amônia.

Em um padrão de césio, o tubo de césio (*Cesium Beam Tube* = CBT = tubo de feixe de césio) é o componente responsável por realizar a excitação e detecção dos elétrons de valência, devidamente polarizados, dos átomos de césio. A figura 34 ilustra a estrutura de um tubo de césio.

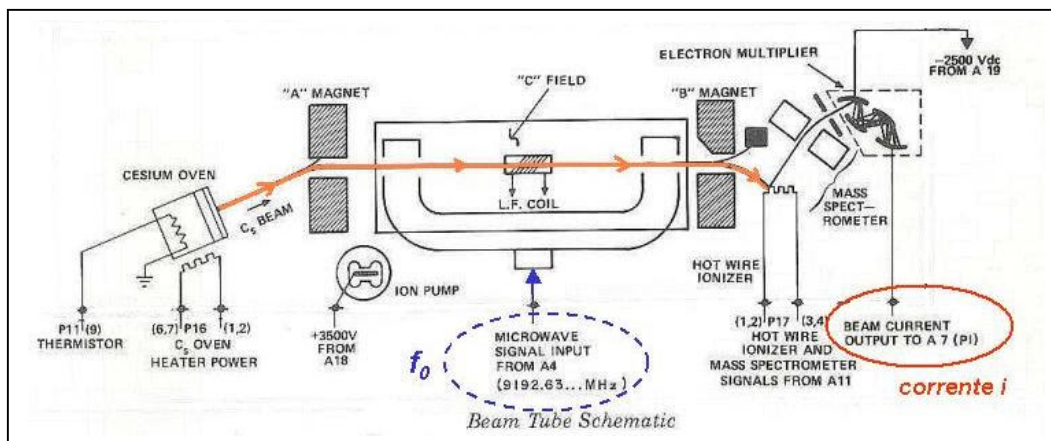


Figura 34 - Diagrama Simplificado de um Tubo de Césio

A figura 35 ilustra a Curva de Resposta da Corrente de Saída i (*Beam Current* = corrente de feixe) *versus* a Freqüência do Sinal de Entrada.

O funcionamento básico consiste de: um “forno” que aquece os átomos de césio, forçando-os a passar por um pequeno orifício e através de um longo tubo sob vácuo, de “forma enfileirada” e atingindo um primeiro “magneto” (*A magnet* da figura 34) que é um campo magnético especial destinado a separar os átomos em dois feixes: um em que o elétron de valência apresenta rotação (*spin*) no mesmo sentido do núcleo e outro em que ele apresenta rotação no sentido contrário. Somente um dos feixes é orientado a prosseguir no tubo pela seção onde serão expostos à radio freqüência (aproximadamente $f_0 = 992631770$ Hertz), enquanto o outro feixe é descartado. Se o sinal aplicado está exatamente na freqüência de ressonância f_0 , um grande número de átomos terá seu estado energético alterado e estes átomos, ao passarem pelo segundo “magneto” (*B magnet* da figura 34), serão orientados na direção de um detector composto de um Ionizador, um Espectrômetro de Massa e um Multiplicador de Eléctrons que gerará uma corrente de saída. Esta corrente atingirá o valor máximo quando a freqüência de excitação for exatamente a freqüência de ressonância f_0 , apresentando uma curva de resposta típica conforme figura 35.

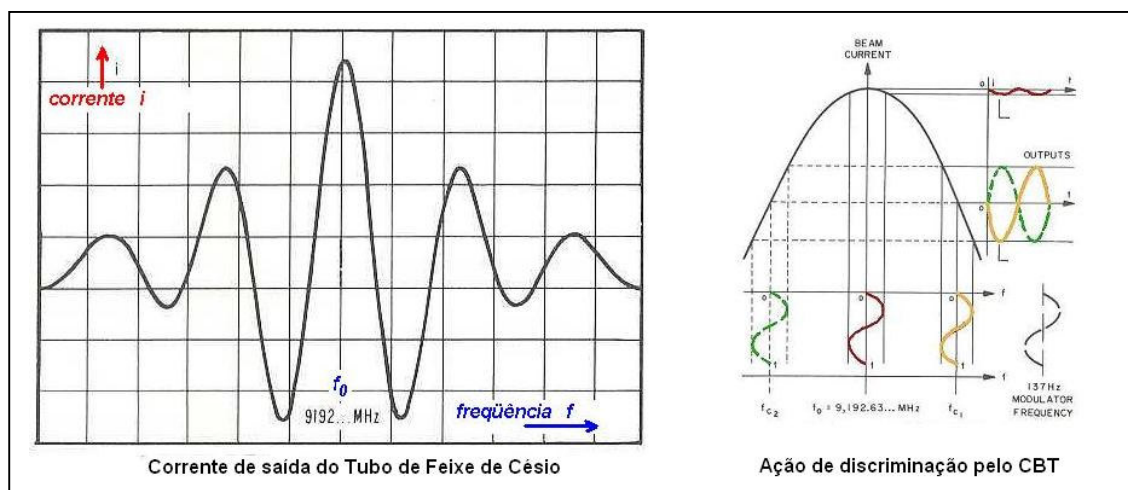


Figura 35 - Curva típica de resposta do tubo de feixe de césio

Para manter a freqüência do sinal de excitação em f_0 , há uma modulação de 137 Hz na freqüência deste sinal de entrada e, através de um circuito

discriminador, utiliza-se a corrente de saída do tubo de césio para controlar a freqüência de um oscilador a quartzo que é o responsável pela geração do sinal de excitação. Com este processo de realimentação, garante-se que o oscilador a quartzo fique “amarrado” pela freqüência de ressonância natural do césio (vide diagrama de blocos de um padrão de freqüência de césio na figura 36).

Foi visto que o tempo de decaimento de um ressonador é o inverso de Δf (largura de faixa da curva de ressonância). No ressonador a tubo de césio que foi descrito, o tempo de decaimento é o tempo que os átomos de césio levam para atravessar o comprimento do tubo. Assim, sabendo-se que os átomos de césio atravessam o tubo com velocidade de 100 m/s, obtém-se um Fator-Q de aproximadamente 100 milhões para um tubo de comprimento de 1 m (Jespersen J., Fitz-Randolph J., 1999).

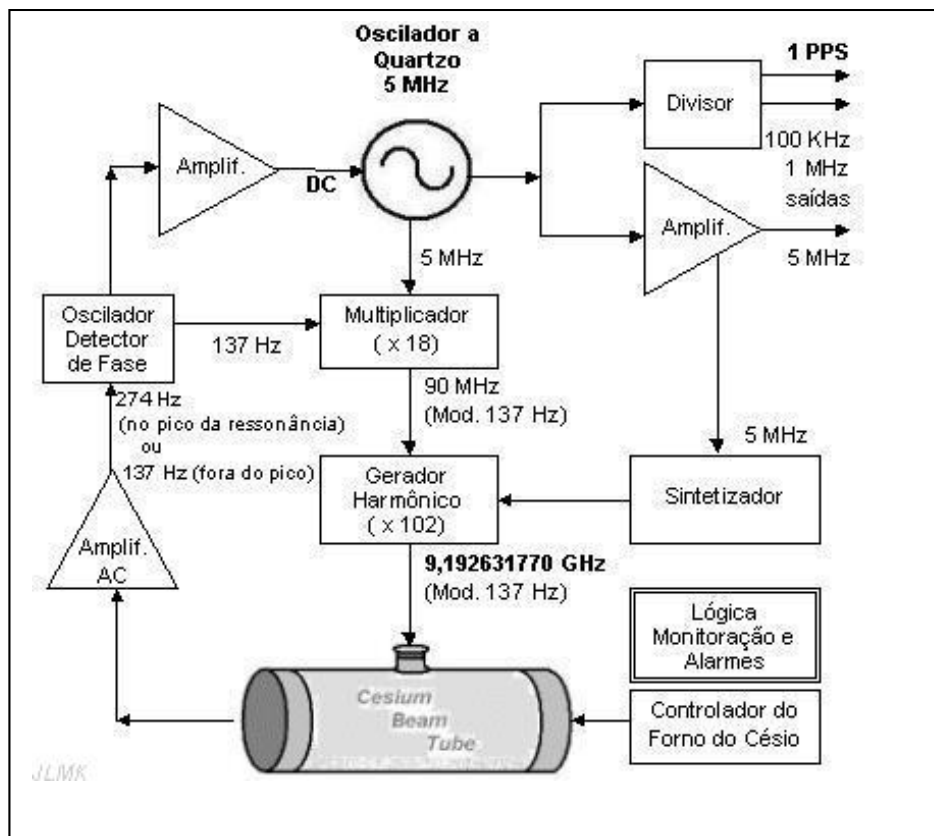


Figura 36 - Padrão de freqüência de feixe de césio: diagrama simplificado

A partir da comercialização do padrão de freqüência de césio, estabeleceu-se um novo padrão de tempo e freqüência e adotou-se uma nova definição para a unidade básica de tempo que está vigorando até hoje:

SEGUNDO

(terceira e atual definição)

Em 1967, a 13^a CGPM estabeleceu a atual definição do segundo:

O segundo é a duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo do césio 133.

Na sessão de 1997, o comitê internacional confirmou que:

Essa definição se refere a um átomo de césio em repouso, a uma temperatura de 0 K.

Estabeleceu-se também uma nova escala de tempo:

O TEMPO ATÔMICO INTERNACIONAL (TAI):

É uma escala de tempo atômico baseada em dados provenientes de um conjunto mundial de relógios atômicos (aproximadamente 250 relógios atômicos em 50 países).

Constitui-se de um acordo internacional aceito como referência de tempo em conformidade com a definição atual do segundo.

O TAI é mantido pelo BIPM, na França, tendo sido introduzido, oficialmente, em janeiro de 1972.

A estabilidade do TAI é monitorada e avaliada através de um algoritmo que estabelece um grau de ponderação aos diversos relógios dos países que contribuem para sua formação e que enviam ao BIPM os dados sobre seus padrões de tempo primários.

Os dados utilizados na geração do TAI são obtidos a partir de uma rede mundial de “enlaces de tempo”, utilizando diferentes métodos de medição (basicamente GPS e TWSTFT) abordados no Capítulo 3.

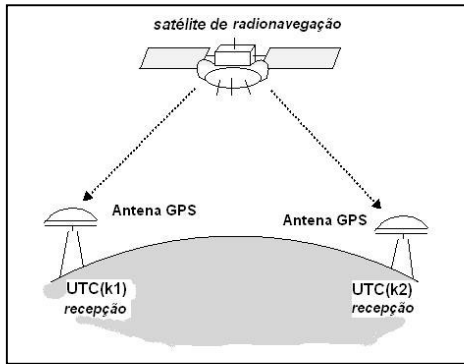


Figura 37 - GPS

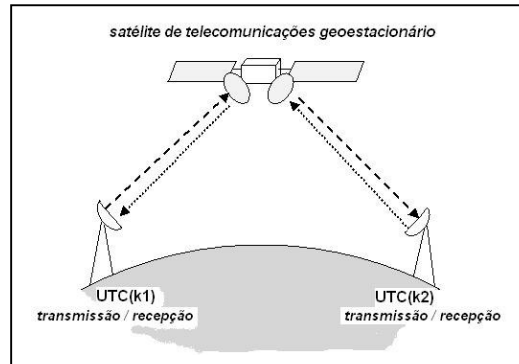


Figura 38 - TWSTFT

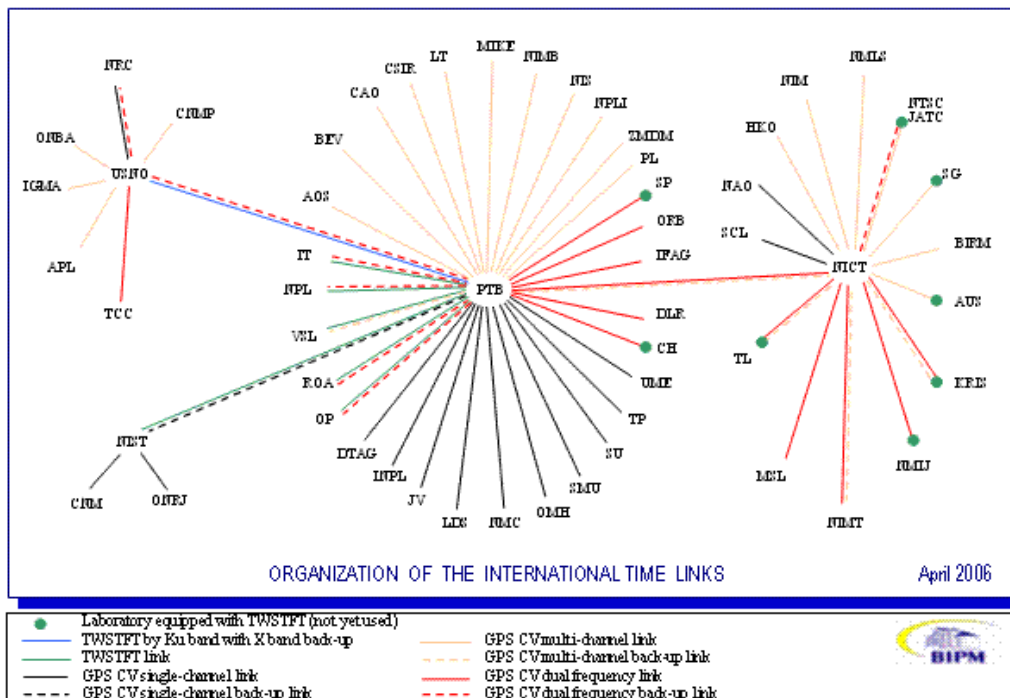


Figura 39 - Diagrama de Enlaces

O BIPM disponibiliza, mensalmente, um relatório (Circular-T) com os dados de todos os relógios que compõem o TAI.

A escala de tempo atômico TAI é estável, não acompanhando as irregularidades da rotação da Terra.

Para fins práticos e do cotidiano, era preciso ter uma escala de tempo que estivesse em sincronismo com a rotação da Terra e para isso foi estabelecido o **TEMPO UNIVERSAL COORDENADO (UTC)**:

- O tempo universal coordenado (UTC) acompanha o tempo atômico internacional (TAI), diferindo deste por um número inteiro de segundos denominados 'segundos intercalados' (*leap seconds*). A escala UTC é ajustada pela sua inserção ou retirada (segundos intercalados positivos ou negativos) assegurando, aproximadamente, uma concordância com o UT1. Isto significa que em média, durante o ano, a passagem do Sol sobre o meridiano de Greenwich às 12 h UTC não apresenta diferença que seja superior a 0,9 s em relação ao UTC; ou seja:

$$|\text{UT1} - \text{UTC}| < 0,9 \text{ s} \quad (2.3)$$

A necessidade de aplicar o *leap second* e em que data fazê-lo é determinada pela IERS (*INTERNATIONAL EARTH ROTATION & REFERENCE SYSTEMS SERVICE*) – associação estabelecida em 1988 pela *International Astronomical Union* e a *International Union of Geodesy and Geophysics*:



Figura 40 - Logo do IERS

A partir dessas informações, temos um novo parâmetro que é o **DUT1** : diferença de tempo aproximada entre **UT1** e **UTC** e é expressa com resolução de 0,1s.

O DUT1 pode ser visto como uma correção a ser adicionada ao UTC para obter a melhor aproximação para UT1.

Desde 1972 até 2006, a diferença acumulada entre o TAI e o UTC é de 33 segundos. Ou seja, a Terra está “freando”.

O último *leap second* foi introduzido às 0 h UTC de 01 de janeiro de 2006.

Os anos de 1984, 1986, 1987, 1989, 1995, 1998, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005 não tiveram ajuste.

Assim, no mundo todo a hora legal é referenciada ao UTC levando-se em consideração o fuso horário do lugar e o respectivo horário de verão, quando adotado.

2.8. Padrões atômicos de TF: estado-da-arte

No capítulo anterior, foi descrito o princípio de funcionamento de dois padrões atômicos:

- primeiro padrão atômico de TF (padrão atômico de amônia)
- atual padrão primário de TF (padrão atômico de césio)

Além destes, utiliza-se também os seguintes tipos:

- Padrão de Rubídio
- Padrão de Maser de Hidrogênio

O **Padrão de Rubídio** tem princípio de funcionamento análogo ao do padrão atômico de amônia; só que ao invés de utilizar uma característica intrínseca de uma molécula, ele utiliza a característica intrínseca do átomo de Rubídio 87 (^{87}Rb), conforme ilustrado na figura 41. Assim como o césio, o rubídio 87 também pertence à classificação 1^a (metais alcalinos) dos elementos da Tabela Periódica e que possuem um único elétron na sua camada externa (elétron de valência).

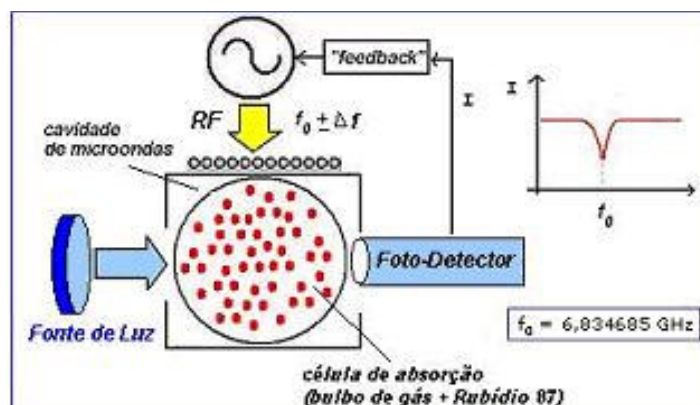


Figura 41 - Princípio de funcionamento de um padrão de frequência de rubídio

A partir de um oscilador a quartzo, em geral, de 5 MHz ou 10 MHz chamado de freqüência da base de tempo – *Time Base Frequency*), obtém-se, através de circuitos apropriados, um sinal de alta freqüência (RF, na figura 41), apresentando variação Δf em torno da freqüência f_0 que corresponde a uma determinada transição atômica hiperfina do Rubídio 87. A estimulação do vapor de rubídio existente no tubo (bulbo de gás + ^{87}Rb), por este sinal, faz com que átomos de rubídio adquiram um novo estado energético que provoca absorção da luz incidente no bulbo e diminuição da corrente de saída do foto-detector. Esta característica de funcionamento permite que, através de uma realimentação (*feedback*) para o oscilador a quartzo, controle-se a freqüência RF. Tendo em vista que a freqüência de transição atômica hiperfina do Rubídio 87 é uma característica intrínseca deste material, obtém-se elevada exatidão e estabilidade da Freqüência da Base de Tempo.

Os Padrões de Rubídio são os equipamentos mais baratos do grupo de osciladores atômicos e apresentam um desempenho muito melhor que os osciladores a quartzo, e custam muito menos que os Padrões de Césio.

Quanto ao Padrão de Maser de Hidrogênio, o nome Maser é o acrônimo de *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* e este padrão está baseado na freqüência de ressonância do átomo de hidrogênio que é 1.420.405.752 Hz.

O maser de hidrogênio é o mais complexo e caro dispositivo de geração de freqüência comercialmente disponível, custando da ordem de USD 200.000,00 ou mais. São poucos os masers de hidrogênio disponíveis e a maioria encontra-se em laboratórios de padrões nacionais ou em observatórios.

Há dois tipos de maser de hidrogênio:

- a) O primeiro tipo é o Maser Ativo: ele opera com um oscilador de microondas auto-sustentável (oscila espontaneamente) na freqüência atômica hiperfina do hidrogênio e o oscilador a quartzo é *phase-locked* à esta oscilação, sendo o sinal de saída obtido mais diretamente da freqüência de ressonância do hidrogênio. A figura 42 ilustra a estrutura básica deste padrão:

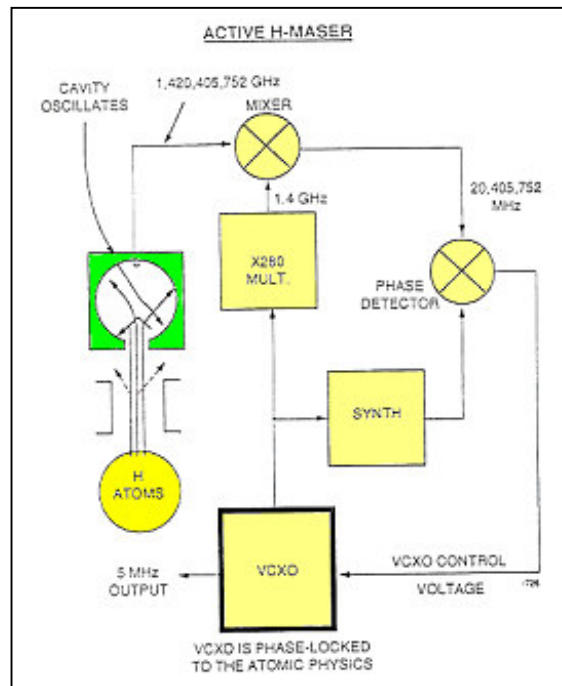


Figura 42 - Maser Ativo de Hidrogênio: diagrama de blocos (Ball-Efratom, 1993)

- b) o segundo tipo é o Maser Passivo: neste padrão atômico, as funções atômicas são basicamente as mesmas do maser de hidrogênio ativo, exceto que a cavidade não mantém oscilação auto-sustentada e ele “amarra” a freqüência do oscilador de quartzo à referência atômica, de maneira análoga ao que ocorre nos padrões de rubídio e de césio. A figura 43 ilustra a estrutura básica deste padrão:

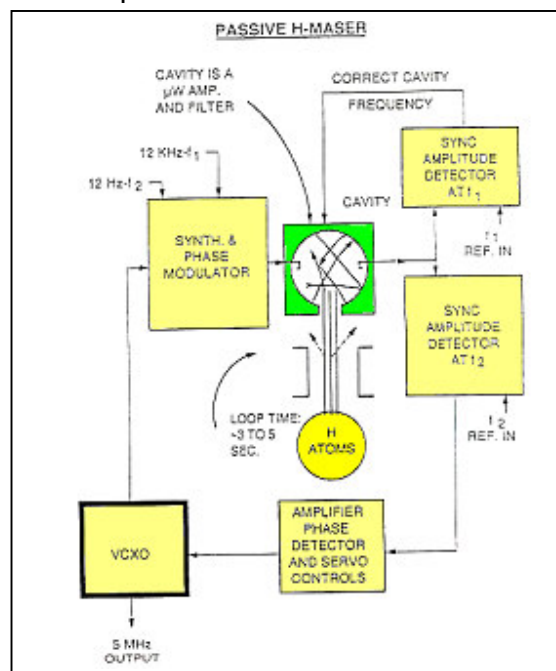


Figura 43 - Maser Passivo de Hidrogênio: diagrama de blocos (Ball-Efratom, 1993)

Estes dois tipos de maser de hidrogênio seguem os seguintes princípios:

A molécula de Hidrogênio vindo de uma fonte pura de Hidrogênio é primeiramente dissociada por uma descarga elétrica e colimada num feixe.

O feixe passa por um campo magnético que descarta átomos de um determinado nível energético hiperfino e deixa passar átomos de outro nível energético hiperfino.

Os átomos selecionados são dirigidos para um bulbo localizado em uma cavidade de microondas (RF), onde ocorre a interação com o campo de microondas, na freqüência de ressonância (1,4... GHZ).

O bulbo é projetado para permitir tempos de interação extremamente longos de átomos e o campo de microondas, cobrindo-se as paredes a fim de reduzir perturbações dos átomos por choques com as paredes.

A interação com o campo de microondas induz os átomos de hidrogênio para o estado energético selecionado e depois fazer a transição para o estado mais baixo, irradiando então energia para o campo.

No maser ativo, as oscilações maser se auto-sustentam quando a densidade de átomos no bulbo é tal que as transições resultantes induzidas irradiam energia coerente suficiente para superar perdas da cavidade.

No maser de hidrogênio “passivo”, as funções atômicas são virtualmente as mesmas do “ativo”, exceto que a cavidade não sustenta auto-oscilação e apresenta, funcionalmente, características análogas aos padrões de Cs e Rb. O VCXO é *frequency-locked* e não *phase-locked*.

Sobre os padrões de césio, devemos ressaltar que:

O padrão de césio é, pela própria definição de segundo, o padrão primário de TF.

A escala de tempo UTC (*Coordinated Universal Time*), que é adotada pela maior parte dos países, é gerada a partir de um conjunto de osciladores de césio, pertencentes a várias entidades de todo o mundo. Os osciladores de césio são a base da maioria dos modernos sistemas de TF. Os padrões comerciais de césio (*Cesium Beam Frequency Standard*) utilizam a chamada tecnologia de feixe de césio cujo funcionamento básico já foi descrito.

A evolução da nossa capacidade de medir tempo nos leva a osciladores cada vez mais estáveis e o estado-da-arte em padrão primário de tempo e freqüência é:

O **Relógio Atômico de Césio do tipo Fonte** (em inglês: *Cesium Fountain Atomic Clock*; em francês: *Horloge Atomique à Fontaine au Césium*). Embora este padrão atômico utilize ressonador cuja freqüência de ressonância é dada pela transição hiperfina do átomo de césio, sua estrutura é totalmente diferente do padrão de césio comercial que já descrevemos. O padrão de césio do tipo fonte pertence à categoria de padrões atômicos que utilizam a chamada tecnologia *laser-cooled atoms* (átomos resfriados a laser). A figura 44 apresenta a estrutura física do padrão de césio tipo fonte do LNE-SYRTE:

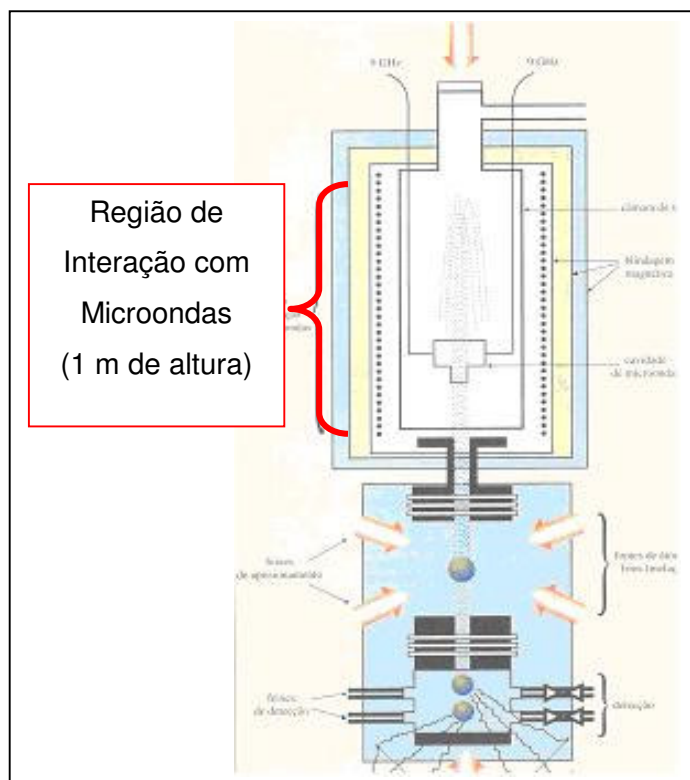


Figura 44 - Padrão de césio *Fontaine* do LNE-SYRTE (*Site LNE-Syrte*, 2006-2007)

Seu princípio de funcionamento está ilustrado na figura 45 e é o seguinte:

Inicialmente, os átomos de césio estão presentes, sob a forma gasosa, em uma câmara a vácuo. As bobinas e os “feixes de Lasers” têm a função de aprisionar uma centena de átomos de césio, formando uma “pequena bola” (aproximadamente 2 mm de diâmetro).

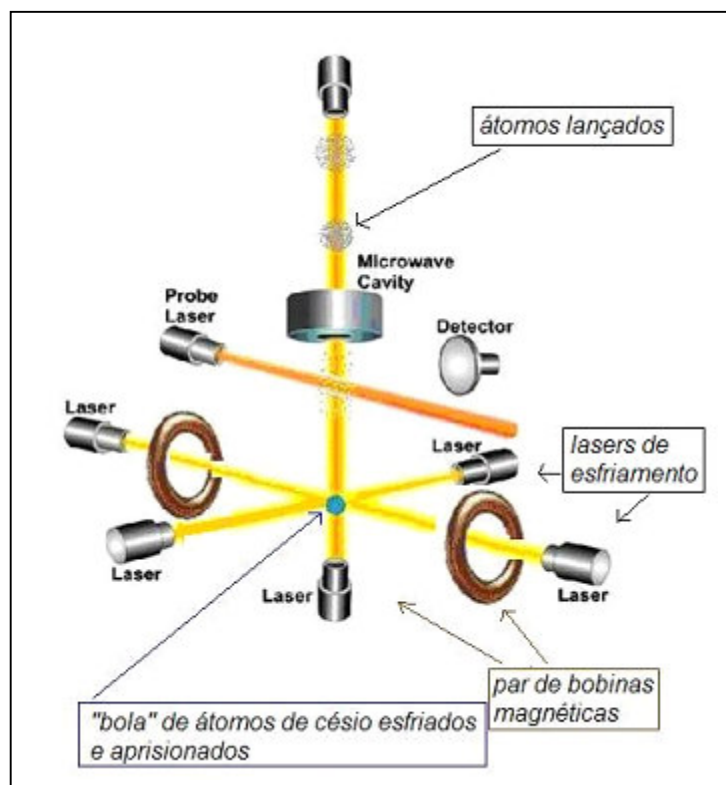


Figura 45 - Padrão de césio fonte: princípio de funcionamento (Site LNE-Syrte, 2006-2007)

Este mecanismo é chamado MOT = *Magneto-Optical Trap* = Armadilha Magneto-Óptica. Estes átomos “aprisionados” tiveram, por meio dos feixes de Lasers, sua energia cinética reduzida praticamente a zero e, por conseguinte, esta pequena “nuvem esférica” apresenta temperatura da ordem de $2 \mu\text{K}$; é o chamado “esfriamento a laser” (*laser cooled*). Após este aprisionamento e esfriamento, a “bola” de átomos é lançada “para o alto”, por meio dos lasers verticais, a uma velocidade em torno de 2 m/s . Antes de entrar na cavidade de microondas, energizados para o nível hiperfino superior desejado, por de meio de um estes átomos são laser de “bombeamento”, e entrarão na cavidade com o nível ($F=4$ do *Ground State* $6^2S_{1/2}$). Os átomos seguem o percurso vertical, análogo ao jato d’água de uma fonte vertical, passando pela cavidade de microondas duas vezes. Uma primeira vez ao subir, com redução de sua velocidade até parar, em aproximadamente $0,5 \text{ s}$, e depois cair verticalmente, por ação da força da gravidade, e passar pela segunda vez na cavidade de microondas. Estas duas passagens pela cavidade que é irradiada por um sinal de microondas na freqüência de ressonância de 9192631770 Hz faz com que a maioria dos átomos retornam no estado hiper-fino ($F=3$ do *Ground State* $6^2S_{1/2}$)

e são detectados. Esta detecção resulta, de forma análoga ao que vimos no padrão de freqüência comercial a feixe de césio, em uma corrente elétrica de saída que será máxima sempre que os átomos estiverem no estado desejado e que corresponde à freqüência de ressonância desejada e vai controlar o oscilador da “base de tempo” do padrão que por sua vez é quem serve de referência ao sinal de microondas, realimentando o circuito.

Comparando estes dois padrões de césio, temos:

a) Padrão de Freqüência a Feixe de Césio:

- átomos aquecidos em torno de 350 K;
- átomos lançados horizontalmente a, aproximadamente, 250 m/s;
- átomos encontram-se entre os 2 estados energéticos e são separados por meio de magnetos, entrando na cavidade só os desejados e desprezando os demais;
- o tempo em que passam pela cavidade (tempo de interrogação) é de cerca de 0,005 s;
- feixe de átomos e, por conseguinte a corrente de saída do tubo de césio, é contínuo.

b) Padrão de Freqüência de Césio Fonte:

- átomos “frios” (2 μ K) e lentos, “esfriados” por feixes de lasers;
- átomos lançados verticalmente a, aproximadamente, entre 2 e 3 m/s;
- os átomos são todos colocados no estado energético desejado, por meio de um laser de “bombeamento”, e todos vão para a cavidade;
- o tempo em que passam pela cavidade (tempo de interrogação) é de 0,5 s;
- o fluxo de átomos, em virtude do princípio do “tipo fonte”, é pulsado e, por conseguinte, também a corrente de saída;

Estas diferenças garantem que o padrão de césio tipo fonte tenha uma melhor exatidão e estabilidade que o padrão de feixe de césio.

A desvantagem funcional do circuito tipo fonte é o fato de ser pulsado e, dessa forma, o oscilador da base de tempo não recebe continuamente o sinal realimentado de controle. Outro ponto é que o Padrão de Freqüência de Césio Fonte tem grandes dimensões (só a parte do tubo com interação de microondas tem em torno de 1 m de comprimento). Atualmente, estão restritos a laboratórios nacionais e de pesquisa.

