

# SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES –Pequeno histórico

Por Nicoláo Jannuzzi

01/07/2003

A minha intenção é fazer um breve histórico do Sistema Internacional de Unidades a começar da atual situação (quais as unidades fundamentais) e a seguir entrar com um pequeno histórico. Tudo isto por causa de uma notícia publicada em jornal, onde se dizia que o quilograma padrão estava perdendo massa! E então como ficaria esse padrão?

Nos dias de hoje o Sistema Internacional de Medidas (SI) possui 7 padrões de unidades: o metro (m), o quilograma (kg), o segundo (s), o ampere (A), o kelvin (K), a candela (cd) e o mole (mol) assim definidos:

- o metro é o comprimento da trajetória percorrida pela luz, no vácuo, durante o intervalo de tempo de  $1/299792458$  de segundo.
- o quilograma é a massa do protótipo de platina e irídio, sancionada pela Conferencia Geral de Pesos e Medidas (CGPM), realizada em 1889 em Paris, e que está depositada no Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM)
- o segundo é a duração de 9 192 631 770 períodos de radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133
- o ampere é a corrente constante que se mantida em dois fios condutores retilíneos e paralelos de comprimento infinito, de secção reta desprezível, e colocados a 1 metro de distancia no vácuo, produziria entre os condutores uma força igual ao  $2 \times 10^{-7}$  newtons por metro
- o kelvin é a fração  $1/273,16$  da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água
- a candela<sup>1</sup> é a intensidade luminosa, numa dada direção, de uma fonte que emite raios monocromáticos de 540,1012 hertz de frequência e cuja intensidade energética naquela direção é de  $1/683$  watt por estero-radiano.
- o mole<sup>2</sup> é a quantidade de matéria de um sistema que contenha tantas entidades elementares quanto são os átomos existentes em 0,012 quilogramas de carbono 12.

É importante frisar que ao se definir o metro e o ampere foram fixadas a velocidade da luz como 299 792,458 metros por segundo e a permeabilidade do vácuo em  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m. Estas duas constantes são exatas.

## Porque um Sistema Internacional de Unidades?

Medir é um ato que fazemos a cada instante, mas uma medida científica, técnica ou comercial exige unidades bem definidas para ser possível o confronto de medidas. Nos dias de hoje com o aumento e a competição no comércio internacional tornou-se necessário a informação precisa da qualidade dos produtos exportados/importados e normas específicas – ISO 9000, por exemplo – passaram a regulamentar o setor. Os países devem ter sistemas que permitam saber se os objetos fabricados/importados estão dentro dos padrões citados ou das qualidades alegadas e para isso é necessário que existam padrões de unidades e métodos que permitam comprova-las.

Uma das maneiras dos países atuarem nesta área é através de seus Laboratórios Nacionais (LN) que devem possuir padrões de medidas – não só as citadas acima mas várias outras derivadas. Por sua vez os vários LN se relacionam a um laboratório central, no caso, o Bureau Internationale de Poids et Mesures (BIPM) para manter globalmente um sistema coerente. Associações entre países existem para troca mais

<sup>1</sup> A luz sendo uma radiação eletromagnética poderia ser medida em termos de energia, porém o sentido humano da visão requer uma unidade de medida que melhor se adapte a ele.

<sup>2</sup> Quando o mol é usado, as partículas elementares devem ser especificadas podendo ser moléculas, átomos, íons, elétrons, outras partículas ou grupos especificados de partículas.

freqüente de informações<sup>3</sup> Com o progresso da ciência os padrões “artefatos físicos” diminuíram com o passar dos anos. Atualmente só existe um artefato padrão: o de massa, que está com seus dias contados, há muitos anos.

## Breve Histórico

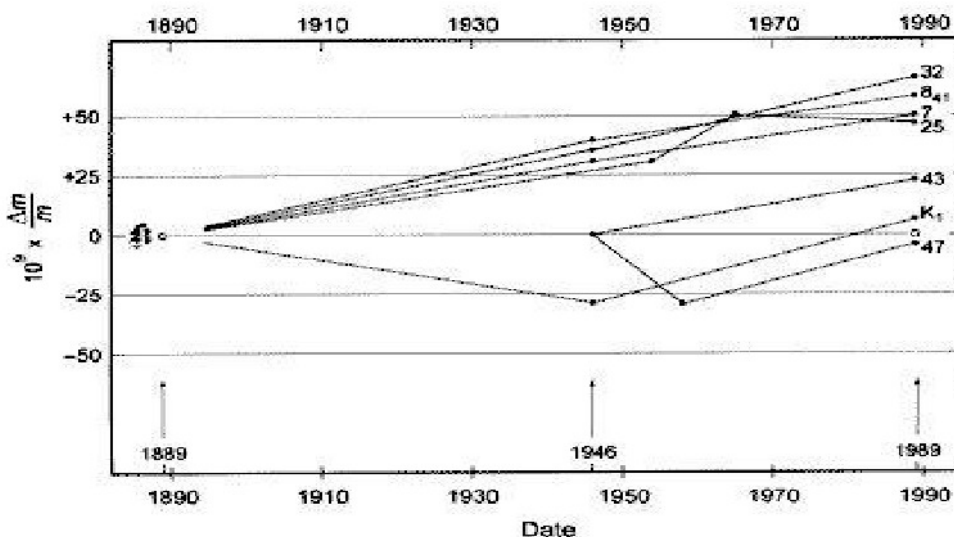
A origem do sistema métrico decimal ocorreu na época da Revolução Francesa: em 22 de junho de 1799 foram colocados nos Archives de la Republique, em Paris, os padrões “metro” e “quilograma” (confeccionados em platina). Esse foi o passo inicial para o desenvolvimento de um sistema coerente de unidades que deveria facilitar o comércio entre os povos e aumentar o intercâmbio científico. Ficava complicado confrontar resultados obtidos por cientistas ingleses, franceses e alemães, por exemplo.

No plano internacional a Convenção do metro em 20 de maio de 1875 instituiu o Bureau Internationale de Poids et Mesures (BIPM), na França, que passou a guardar os padrões de então e a fornecer cópias dos mesmos aos diversos países. Os protótipos do metro e do quilograma passaram a ser feitos de uma liga de platina e irídio(10%) em razão de sua melhor conservação. Quatro das seis copias oficiais do quilograma foram feitas nessa ocasião. Desde 1880 o BIPM fabricou mais de 80 protótipos de 1 quilograma em liga de platina e irídio(10%).

O metro foi inicialmente definido como o comprimento da milionésima parte de  $\frac{1}{4}$  do meridiano terrestre que passa por Paris e o quilograma à massa de um decímetro cúbico de água. Mas logo se constatou que a definição do metro não correspondia à sua definição. Manteve-se o padrão e o metro passou a ser, por definição, aquela unidade depositada no BIPM.

O Sistema de Unidades é dinâmico, modificado pelo avanço da ciência, trocando o padrão, se necessário, procurando a melhor definição. Só para exemplificar, a partir da 1ª. CGPM (1927) o metro foi definido como a “distância a 0° C entre dois traços (os definidores do comprimento do metro) estando a barra apoiada em dois cilindros de ao menos um centímetro de diâmetro colocados num plano horizontal e distando 571mm entre si e à pressão atmosférica padrão”. Já em 1960 a CGPM vai definir o metro em função do comprimento de onda de uma radiação do kriptonio-86 e em 1983 a CGPM o definiu em função da velocidade da luz. Notem que o padrão físico continuou o mesmo, o que variou foi o modo de defini-lo e com isto a possibilidade de cada LN ter/construir o seu próprio padrão. O metro padrão do BIPM passou a ser um objeto histórico e este parece ser o caminho de todos os padrões.

A notícia de que o padrão quilograma estava perdendo massa, isto é, estava ficando menor, estava relacionado com o fato de um dos padrões de massa do NIST apresentar esta ocorrência: o NIST possui 4 padrões de massa e regularmente são feitas medidas de suas massas comparando-as entre si (medidas efetuadas com precisão de 2 microgramas).



<sup>3</sup> Brasil [www.inmetro.gov.br](http://www.inmetro.gov.br); EEUU [www.nist.gov](http://www.nist.gov); Inglaterra [www.npl.co.uk](http://www.npl.co.uk); França [www.bipm.fr](http://www.bipm.fr); Alemanha [www.ptb.de](http://www.ptb.de) SIM- Sistema Interamericano de Metrologia [www.sim-metrologia.org.br](http://www.sim-metrologia.org.br)

### **Ilustração 1: Mass changes of the BIPM reference standards against the international prototype of the kilogram (similar drifts are observed for national prototypes).**

No gráfico acima (retirado do site do PTB) mostra medidas de vários padrões do BIPM em relação ao protótipo internacional realizadas durante 100 anos. Em geral está ocorrendo um aumento de massa em relação ao protótipo. Mas será que o protótipo está mantendo a sua massa? Este gráfico mostra claramente a necessidade de se pensar num outro padrão para a grandeza “massa”.

## **A Unidade de tempo**

Historicamente a unidade de tempo seguiu-se após o metro e o quilograma. O “segundo” foi definido em termos do movimento de rotação da Terra: era  $1/86400$  do dia solar médio e os observatórios astronômicos cuidavam dessa monitoração através de relógios de pêndulo ou de quartzo. Em 1960, a 11ª. CGPM adotou a definição dada pela União Astronômica Internacional que passou a ser baseada no “ano trópico” em lugar do dia solar médio. Mas nessa época já havia trabalhos experimentais que se utilizavam de freqüências de transições atômicas ou moleculares para a fixação da unidade de tempo: o movimento periódico que seria utilizado para definir o segundo foi radicalmente mudado (do pêndulo para uma transição atômica ou molecular). A 13ª. CGPM alterou a definição do segundo, e em 1997 foi adotado o relógio atômico do césio 133.

O trabalho envolvendo o relógio atômico partiu de idéias de Norman Ramsey – década de 40 - envolveu vários LN (ver NIST, NPL, PTB) e em 1989 3 físicos receberam o Premio Nobel pelos trabalhos relacionados com a unidade de tempo: N. Ramsey, Hans G. Dehmelt e Wolfgang Paul.

É interessante saber que o primeiro relógio de césio do NIST, o (NBS-1), construído em 1950 possuía uma incerteza de 10 ns/dia e o atual, o NIST-F1, possui incerteza de 0,1ns/dia ou seja de 1 segundo em cada 20 milhões de anos. Isto significou um avanço na tecnologia e a segurança nas várias etapas do funcionamento do relógio. Leia um pouco sobre a história do tempo em “A revolution in time keeping” no sítio <http://physics.nist.gov/GenInt/Time/time.html>.

Porque tanta precisão na unidade de tempo? Seria necessária? É preciso se lembrar que o segundo esteve inicialmente relacionado com a hipótese do movimento uniforme de rotação da Terra. Para isso foi feito uso de relógios de pêndulos/quartzo e havia dúvidas quanto a regularidade do funcionamento dos relógios e também quanto à hipótese do movimento uniforme de rotação da Terra (ou de ambos). Será que não teríamos um outro movimento oscilatório que pudesse ser utilizado, inclusive para mostrar que o movimento de rotação da Terra não é regular? Daí a busca de novos padrões para definir a unidade. Agora a unidade de tempo pode ser reproduzida em vários locais onde houver tecnologia apropriada e a precisão aparentemente absurda possibilita a fabricação de instrumentos onde o tempo pode ser medido em unidades menores que nano segundos, por exemplo. E a indústria que fabrica estes aparelhos precisa testar seus instrumentos para poder vendê-los e garantir os valores apresentados. Nos laboratórios reações extremamente rápidas são observadas. É bom ter em conta que os laboratórios sempre estarão à procura de resultados mais precisos das suas medidas e isto exige que os padrões sejam capazes de fornecer essa precisão. Pode suceder que no futuro se encontre fenômenos extremamente rápidos que necessitem maiores precisões dos relógios atômicos ou então uma nova forma de definir o segundo.

No Brasil há dois grupos experimentais que desenvolvem a tecnologia de medida de tempo (USP S. Carlos e UNICAMP) e de comprimento (USP S. Carlos)<sup>4</sup>.

Se você desejar saber a hora – baseada em relógio de césio – poderá acessar <http://pcdsh01on.br> que está no Observatório Nacional, no Rio de Janeiro. Este é um Laboratório Primário de Tempo e Freqüência e um dos Laboratórios delegados da Diretoria Metrologica e Científica do INMETRO. O INMETRO<sup>5</sup> é o LN brasileiro ([www.inmetro.gov.br](http://www.inmetro.gov.br)) O atual Sistema de Posicionamento Global (GPS) – sistema global de navegação por satélite também fornece o tempo para todo o globo com uma precisão necessária às suas necessidades

## **As Unidades Elétricas**

<sup>4</sup> Ver Revista de Física Aplicada e Instrumentação, Vol.15 pag1-14, 2002.

<sup>5</sup> O livro Padrões e Unidades de Medidas, Mauricio Frota e outros, Ed. Qualitmark, 1999 é importante por uma série de definições e as ligações entre o INMETRO e o BIPM e as unidades de modo geral.

Como foram introduzidas as unidades elétricas? Elas surgiram após a formulação da lei de Coulomb com a introdução da unidade de carga elétrica e do potencial (estat-coulomb e estat-volt). Com os trabalhos de Maxwell os problemas magnéticos e eletromagnéticos requeriam novas unidades e em 1874 através da Associação Britânica para o Progresso da Ciência (BAAS) foram introduzidas unidades dentro do sistema CGS (centímetro-grama-segundo), utilizando prefixos de micro até mega para expressar submúltiplos e múltiplos decimais das unidades. Uma das causas dos problemas que então surgiram foi a manutenção de unidades ligadas à eletrostática e outras aos fenômenos magnéticos e a constantes físicas dimensionais que apareciam nas leis desses fenômenos.

Com o manuseio surgiram problemas e em 1880 houve um acordo entre o BAAS e o International Electrical Congress de modo a aprovar um sistema coerente com as unidades práticas de resistência elétrica, força eletromotriz e corrente elétrica. Isto contornou o problema surgido com o uso de unidades cm-g-seg e o m-kg-seg. Foram introduzidas as unidades ohm para resistência elétrica, volt para força eletromotriz e o ampere para a corrente elétrica.

Para se ter uma idéia do problema que existia entre as unidades no sistemas CGS, BAAS e as unidades “práticas” abaixo estão as unidades de carga elétrica em cada um dos sistemas e as constantes de conversão:

$1 \text{esu} = 1/(3 \times 10^{10}) \text{ ab coulomb}$  ;  $\text{BAAS} = 1 \text{ abcoulomb} = 10 \text{ coulomb}$  ; “pratica” = 1 coulomb

Ao se passar de um sistema para outro havia constantes e unidades diferentes e a troca de informações ficava confusa. Esta situação vai ser resolvida quando a teoria eletromagnética de Maxwell estiver completa, testada e mais importante ainda, quando aceita pela comunidade como uma teoria respeitável. Em 1889 a 1ª. Conference Generale de Poids et Mesures (CGPM) sancionou o metro, o quilograma e o segundo. E em 1901 Giorgi mostrou ser possível aliar o sistema MKS (mecânico) com as “unidades elétricas práticas” adicionando uma única unidade de natureza elétrica como o ampere ou o ohm. Desta forma se conseguiu um sistema de unidades que funcionou durante algum tempo.

Finalmente em 1946 a CIPM aprovou o sistema metro-quilograma-segundo-ampère. E a unidade de corrente elétrica a partir de então a ser definida em termos de força entre fios elétricos que carregam a mesma corrente. E a permeabilidade do vácuo foi definida como  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$  (henry/m).

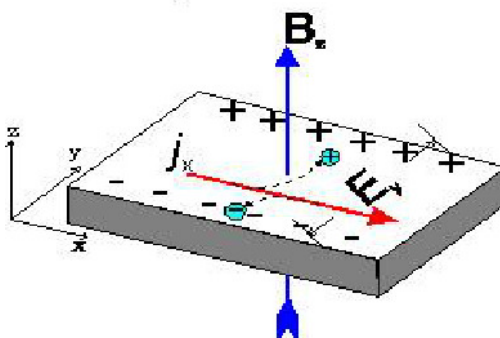
## Novos padrões elétricos?

Há vários anos uma série de trabalhos mostram a possibilidade de se definir o volt e o ohm em termos das constantes físicas fundamentais “e” (carga do elétron) e “h” (constante de Planck) Isto ocorreu em virtude de fenômenos quânticos envolvendo a física do estado sólido (efeitos Josephson e Hall).

**VOLT** - A junção Josephson é formada por dois supercondutores separados por uma barreira isolante de modo que normalmente os elétrons não fluem através dela. À temperatura do hélio líquido (4,2 K) haverá condução elétrica ( corrente de Josephson) se uma radiação de frequência  $f$  estiver presente. Esse transporte de elétrons é chamado de tunelamento Josephson e a diferença de potencial entre os supercondutores é dada pela expressão  $V_n = nf (h/2e)$ , onde  $n$  é um numero inteiro (1,2,..), “h” e “e”, respectivamente a constante de Planck e a carga do elétron. Em janeiro de 1990 foi adotada para a frequência  $f$  o valor de 483597,9 GHz/V e deste modo para  $n=1$ ,  $V_1= 1 \text{ microvolt}$ .

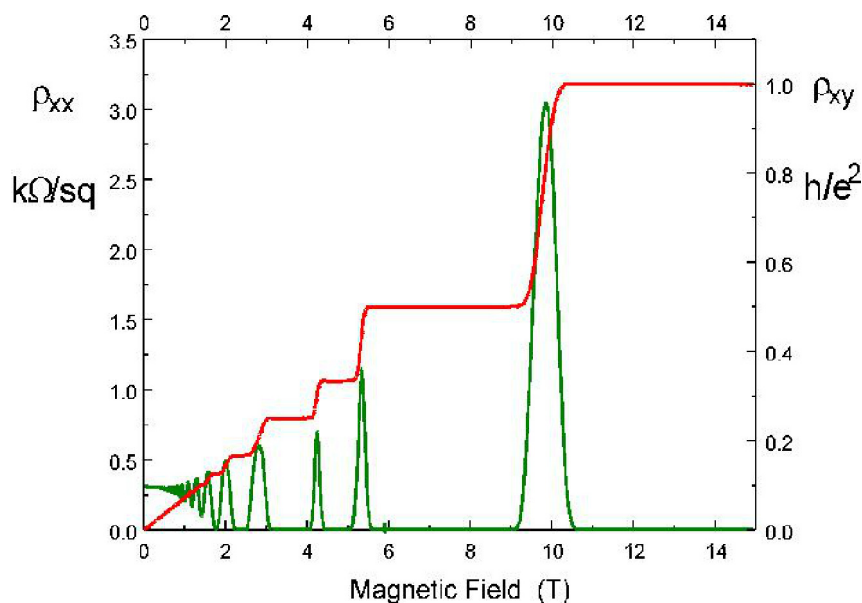
Padrões de diferença de potencial baseados nas junções Josephson (por ex. Nb-MoSi<sub>2</sub>-Nb) podem ser ligados em séries em circuitos integrados que fornecem, com alta precisão, de 1 a 10 volts. É interessante ver os sites dos LN mais importantes para se ter uma maior visão dos desenvolvimentos na área, inclusive atendimentos às indústrias.

**OHM** - O efeito Hall foi descoberto há mais de 100 anos por E. H. Hall e está ligado à diferença de potencial que é criada nas laterais de uma barra metálica por onde passa uma corrente elétrica; a barra está colocada num campo magnético de modo que a direção da corrente elétrica é perpendicular ao campo magnético (ver desenho). Devido à lei de Lorentz os elétrons são desviados para um dos lados da barra e aparece uma tensão  $V_h$  quando o sistema entra em



equilíbrio. Esta tensão dividida pela corrente é a resistência Hall que aumenta linearmente com o campo magnético.

Em 1985 [Klaus von Klitzing](#) recebeu o Premio Nobel pela descoberta do efeito Hall quântico trabalhando com semicondutores a baixas temperaturas: uma série de degraus apareciam no valor da resistência Hall,



em lugar de uma função contínua. E o que era mais interessante era que o valor dessa resistência era quantizada em termos de  $(h/e^2)/n$  onde  $n$  é um número inteiro. O gráfico mostra o efeito Hall quântico numa heterojunção de

GaAs-GaAlAs à temperatura de 0,30 mK

Os platôs aparecem também a 4,2 K mas são menos pronunciados. Gráficos são do <http://www.warwick.ac.uk/~phsbn/qhe.htm>

O efeito Hall quântico

fornece um padrão de resistência elétrica. No caso de  $n=1$  a resistência é de 25.813 ohm (ou 1 klitzing)

O que estes dois fenômenos mostram é que será possível um laboratório ter o padrão de resistência (ou de força eletromotriz) em lugar do padrão de corrente. E como ficarão no futuro as grandezas padrões? Mas uma coisa é fundamental: a necessidade de comparação de medidas entre os vários laboratórios, sem o que voltaremos ao século XVIII.

## Laboratórios Nacionais

Cada país possui o seu Laboratório Nacional (LN) que possui os padrões das unidades que devem servir para calibrar, internamente, outros padrões e que podem ser transferidos para outros laboratórios/indústrias. Assim os EEUU possuem o NIST (National Institute of Standard Technology), a Inglaterra o NPL (National Physics Laboratory), a Alemanha o PTB e aqui no Brasil o Inmetro. A visita através da internet aos LN mais importantes mostram atividades bastante distintas indo desde o controle contínuo da calibração de seus padrões até ao estudo de substituições de grandezas.

Os padrões primários calibram outros padrões, de menor precisão, mas mais adequados às necessidades: não se calibra um relógio de pulso com um relógio atômico nem um paquímetro com o metro padrão. Para esses casos há padrões com menor precisão mas sempre referidos a outros mais precisos até se atingir o padrão maior.

Abandonar um padrão físico e se ajustar a uma lei que possibilite um novo patamar de padrão requer a utilização de uma constante física como a velocidade da luz, o número de Avogadro, a constante de Rydberg, etc. E essas constantes são conhecidas com grande precisão e são resultado de ajustes como está muito bem exposto no artigo do Physics Today<sup>6</sup>. Este método tem vantagem de possibilitar a sua execução em laboratórios equipados e sem a necessidade de se criar artefatos

Enquanto a massa era medida com precisão de décimos ou centésimos de grama em 1 quilograma o padrão de massa era mesmo um "padrão", mas quando essa precisão da medida passou para micrograma

<sup>6</sup> Physics Today March 2001 vol 54, P.J. Mohr and B.N. Taylor, disponibilizado em //physics.nist.gov/constants. Trabalho sobre Valores Recomendados para as Constantes Físicas de 1986 está em //physics.nist.gov/cuu. Os dados de 2000 estão publicados no Rev.Mod.Phys.vol 72,351-495.



se percebeu que o padrão de massa (artefato) não poderia continuar a ser utilizado. Era essencial a sua mudança.

Dentro dessa linha padrões baseados nas constantes físicas fundamentais a Revista Science, 300,1929 – 1932, (2003) publicou o trabalho “ Primary electronic thermometry using the shot noise of a tunnel junction” (Spietz, L., Lehnert, K..W., Siddiqi, I e Schoelkopf, R.J.) que apresenta um termômetro primário construído para medidas de 0,01K até a temperatura ambiente e cuja leitura depende somente de constantes físicas fundamentais. .

## Substituição do padrão “massa”

Mas afinal como substituir o quilograma padrão? Há, nos últimos 20 anos, trabalhos em várias direções, inclusive na substituição do material a ser utilizado (em lugar da liga Pt-Ir, o Si, Au ou C).

Quais os caminhos para definição do padrão quilograma? Nos sites <http://www.npl.co.uk/mass/faqs/kilogram.html> , [www.ptb.de/em/org/1/11/111/ionenex.htm](http://www.ptb.de/em/org/1/11/111/ionenex.htm) e <http://physics.csufresno.edu/wassign/phys4a/hall/Kilogram.htm> (acessados dia 08/7/03)

são apresentados 4 caminhos atualmente estudados para o novo padrão de massa. Resumidamente: a balança elétrica (watt-balance), a levitação de um metal supercondutor, o número de Avogadro, e a acumulação de íons.

1- Balança elétrica A balança elétrica procura redefinir o quilograma através de medidas de potência elétrica (watt –joule/segundo) e de potência mecânica (força e velocidade). Qual a potência elétrica necessária para manter um quilograma de massa em equilíbrio? A potência elétrica será expressa em função da carga do elétron, constante de Planck e o segundo enquanto a potência mecânica será expressa em função de massa, aceleração da gravidade e tempo. Aqui surge um problema que não é muito tranquilo: a medida de g (local) com a precisão necessária. Ela é constante e não dependerá de alterações na crosta terrestre local (terremoto, marés)? Quatro grandes laboratórios trabalham neste projeto: o NPL na Inglaterra, o NIST nos Estados Unidos, o METAS na Suíça e o BNM-LNE na França. Se este método der resultados teremos a massa definida em termos de “e” e “h”.

2 – É outro modo de se igualar as potências elétrica e mecânica. Um supercondutor é mantido suspenso num campo magnético gerado por uma bobina supercondutora (elimina o efeito resistivo da corrente elétrica). Aqui também aparece o problema da aceleração da gravidade.(NIST)

3- A utilização do número de Avogadro é outra tentativa para definir o quilograma através de um número fixo de átomos de silício. Este elemento é bastante conhecido e a tecnologia para produzir seus cristais é bem conhecida pois quase toda microeletrônica se baseia neste elemento. Procura-se construir uma esfera onde a sua massa  $m$  é dada por

$$m = \frac{M_m}{N_A} \times \frac{V}{V_0}$$

$M_m$  = massa molar do silício  $V$  = volume da esfera

$N_A$  = Número de Avogadro  $v_0$  = volume de um átomo de silício

Há o problema dos isótopos do silício, mas vamos deixar este item de lado, pois poderá de alguma forma ser minimizado; o volume da esfera poderá ser determinado por interferometria e  $v_0$  o volume ocupado por um átomo pode ser medido por raio-x. Para esta definição é necessário conhecer o número de Avogadro: notem que esse valor poderá ser obtido se  $m$ , a massa da esfera, o for. Desta maneira este programa poderá “contar” o número de Avogadro e em seguida ser usado para definir o padrão de massa.. Além dos isótopos e do próprio crescimento da esfera há o problema do de impedir o crescimento de uma camada de óxido na superfície da esfera.

4- O quarto método apresentado é o da acumulação de íons. A idéia do experimento é que hoje se pode obter correntes altamente constantes, resultantes do transporte de íons de ouro. Num tempo  $t$  uma carga pode ser transportada e se os íons forem depositados numa balança temos a possibilidade de conectar o

quilograma com uma massa conhecida (ou número de átomos de ouro). O problema dos isótopos parece estar resolvido passando o feixe de íons num campo magnético (PTB).

Todos estes métodos devem levar em consideração que a massa deve ser determinada no vácuo e outro dado importante é que o custo do equipamento deve ser razoável para que o maior número de LN possam fazer uso do método.