



Comprimento metro m
Massa quilograma kg
Tempo segundo s

AS UNIDADES FUNDAMENTAIS DO SISTEMA INTERNACIONAL

Temperatura termodinâmica kelvin K

Intensidade de corrente eléctrica ampere A
(SI)

- ASPECTOS HISTÓRICOS E TÉCNICOS -

Quantidade de matéria mole mol

Intensidade luminosa candela cd

Alcino Nunes Martins

ca

AS UNIDADES FUNDAMENTAIS
DO
SISTEMA INTERNACIONAL (SI)
– ASPECTOS HISTÓRICOS E TÉCNICOS –

Ficha Técnica

EDIÇÃO

Conselho Directivo do ISEL

Rua Conselheiro Emídio Navarro, nº 1 1949-049 Lisboa

Telefone: 218 317 000 Fax: 218 317 001

E-mail: conselhodirectivo@sa.isel.ipl.pt

AUTOR

Alcino Nunes Martins

PREFÁCIO

Professora Doutora Maria Helena Cardoso

CAPA

Pedro Catarino

LxCapa

FOTOLITOS, MONTAGEM, IMPRESSÃO E ACABAMENTO

VEMP, Atelier Gráfico, Lda

Telefone: 213 844 553 Fax: 213 844 555

TIRAGEM

1000 Exemplares

DATA

Março 2002

AS UNIDADES FUNDAMENTAIS
DO
SISTEMA INTERNACIONAL (SI)

– ASPECTOS HISTÓRICOS E TÉCNICOS –

Alcino Nunes Martins

Professor Coordenador (aposentado)
do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa - ISEL

MARÇO DE 2002

À Maria Cecília, minha mulher, e aos meus filhos:

*à memória do Jorge Abel
à Maria da Conceição
e ao Paulo José*

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer ao Conselho Directivo do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa a oportunidade de publicação deste trabalho, integrado nas comemorações dos 150 anos do IIL/ISEL, do qual faço parte em memória e coração desde há algumas décadas. Uma palavra especial para o Professor Doutor José Carlos Quadrado e para a equipa que lidera no Gabinete de Informação e Imagem, pela sempre amável disponibilidade demonstrada durante os trabalhos de edição do livro.

Também não posso deixar de salientar todo o inestimável apoio e incentivo que recebi da Professora Doutora Maria Helena Cardoso ao longo dos anos da feitura deste trabalho, especialmente em determinada fase do percurso, em que, por razões muito pessoais, tinha já posto de lado a ideia de o concluir. Ainda um agradecimento pela sua preciosa coordenação da equipa de colegas do ISEL que apoiou a fase final das provas, através de conselhos e sugestões de muito apreço. A saber:

Professor Doutor António Jorge Silvestre
Professora Doutora Catarina Rosa Leal
Professora Doutora Carla Maria Costa
Professor Doutor João Carlos Pires da Palma
Professora Doutora Maria Filomena Bento
Professora Maria Susana Marreiros,

E, por último, não posso esquecer o entusiasmo com que o meu filho Paulo e o colega José Gomes, docentes do DECivil do ISEL encararam este livro; o primeiro porque acompanhou todo o percurso do mesmo, ocupando-se em especial da concretização da ideia, auxiliando-me nas várias fases intermédias, principalmente como perito – que não sou – no manejo do computador, o segundo, pela útil colaboração prestada, especialmente na recolha de elementos de informação.

A todos um muito obrigado.

PREFÁCIO

Quando se começa a leccionar Física ou Engenharia no ensino superior, o primeiro problema que nos surge é o de constatar que muitos alunos não possuem alguns dos conhecimentos que é suposto terem adquirido no ensino secundário. E, logo na primeira aula, ao descobrirmos, com espanto, que não conhecem certas unidades do Sistema Internacional, elaboramos listagens e procuramos livros que sejam rigorosos, actualizados e simultaneamente aliciantes para os informar. Verifica-se então que essa busca não é tarefa fácil porque, talvez devido à vastidão de campos da Física que o tema toca, poucos autores o trataram.

Não sei se foram estas circunstâncias que levaram o Eng^o Alcino Martins a lançar-se num trabalho didático que modestamente intitulou “Algumas reflexões sobre as unidades do S.I.”, que elaborou para os seus alunos do ISEL e que está na origem do presente livro. Quando, por volta de 1988/89 mo mostrou, mesmo sem os capítulos sobre o kelvin, a mole e a candela, fiquei com o meu problema da literatura em português sobre o S.I. resolvido. E mais tarde, em 1990, tive ainda a sorte de ouvir o Eng^o Alcino Martins apresentar as curiosidades do seu estudo - as mais interessantes do ponto de vista científico e histórico - em duas sessões muito concorridas de um Seminário que realizou no Centro de Física do ISEL.

Segundo os alunos daquela época, o que tornava o Eng^o Alcino Martins “o melhor professor do Curso de Energia e Sistemas de Potência” do ISEL, era o interesse que ele despertava nas suas aulas de Tecnologia de Materiais Eléctricos I e II, ou de Mecânica e Resistência dos Materiais, por aliar uma grande cultura em História da Ciência a um grande saber e experiência nas matérias que leccionava. Os seus alunos ainda hoje recordam as peripécias históricas engraçadas do tempo dos gregos ou outros, que ele lhes contava para ilustrar um conceito ou maçuda definição. Divertiam-se, compreendiam o conceito e, simultaneamente, nunca mais o esqueciam.

Para sorte de todos os que gostamos de Ciência, é extraordinário que, depois de se ter aposentado em 1991, o Eng^o Alcino Martins tenha continuado a sua aturada pesquisa e nos tenha presenteado agora com o trabalho concluído. Já não é apenas um bom livro para recomendar aos alunos, pois a obra acabada é um óptimo e utilíssimo livro de referência para professores. O livro envolveu uma trabalhosa pesquisa histórica e levou o

autor a abordar campos tão vastos como a Mecânica Newtoniana, a Mecânica Relativista, a Mecânica Quântica, o Electromagnetismo, a Física Atómica, a Ciência dos Materiais, a Termodinâmica, a Óptica, a Química Física, a Química Inorgânica e a Astronomia. Será uma pequena coisa aos 81 anos?

Olhando para o seu curriculum, vejo que toda a vida gostou genuinamente de estudar, pesquisar, ensinar e de traduzir as suas investigações em trabalhos concretos e úteis que sempre concluiu. Foi um daqueles professores que soube motivar os alunos para o estudo, usando a experiência da sua prática profissional como Engenheiro, alicerçada num profundo e constante estudo da teoria. Podemos defini-lo como um excepcional Professor e Engenheiro Electrotécnico, um estudioso da Física e de uma invejável juventude.

Lisboa, 28 de Fevereiro de 2002

Maria Helena Cardoso
(Representante da Área Científica de Física do ISEL)

ta,
, a
rá

de
, e
ura
da
nal
vel

NOTAS DO AUTOR

Nos últimos anos de docência no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, redigimos, para uso dos alunos, um pequeno memorando sobre as unidades fundamentais do Sistema Internacional – as unidades de base –, tendo em vista, principalmente, a correcção da escrita das ditas unidades, seus múltiplos e seus submúltiplos. Esse escasso conjunto de menos de meia dúzia de páginas foi sendo gradualmente alargado, de forma a incluir referência aos sistemas de unidades primitivos e sua evolução, como também às instituições nacionais e internacionais responsáveis, não só pela manutenção e conservação dos padrões das unidades, como pelos aspectos científicos – e até legais – envolvidos. Posteriormente, e com a intenção de justificar a evolução sofrida ao longo dos anos pelas definições das unidades fundamentais, foi, cada uma delas, objecto de um estudo separado, incluindo o historial dessa evolução bem como das razões que lhe deram origem.

Em resumo, e por outras palavras, o presente trabalho pode, em verdade, ser considerado como uma visita guiada – desde as fundações – ao complexo edifício representado pelo Sistema Internacional de Unidades.

É este, em suma, o conteúdo do trabalho que se segue, realizado na convicção de que o conhecimento aprofundado do Sistema e das suas convenções é, para os estudiosos da Engenharia, um complemento útil e conveniente, tanto na interpretação de textos como na realização de aplicações em qualquer dos ramos do conhecimento técnico-científico.

ÍNDICE

PREFÁCIO	IX
NOTAS DO AUTOR	XI
ÍNDICE	XIII
1 A CONFERÊNCIA GERAL DE PESOS E MEDIDAS	1
2 ORGANISMOS RESPONSÁVEIS	7
2.1 - ORGANISMOS INTERNACIONAIS	7
2.2 - ORGANISMOS EUROPEUS	8
2.3 - ORGANISMOS NACIONAIS	10
2.4 - LEGISLAÇÃO NACIONAL	13
2.5 - METROLOGIA PRIMÁRIA NACIONAL	16
3 PRIMEIROS SISTEMAS DE UNIDADES	19
3.1 - DEFINIÇÕES	19
3.2 - SISTEMAS DE UNIDADES	20
4 O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)	31
4.1 - ANTECEDENTES	31
4.2 - UNIDADES SI	32
4.3 - MÚLTIPLOS E SUBMÚLTIPLOS	35

4.4 - ESCRITA DE NOMES E DE SÍMBOLOS DAS UNIDADES	36
4.5 - GRANDEZAS, SÍMBOLOS E DIMENSÕES	38
4.6 - DEFINIÇÕES DAS UNIDADES	39
4.7 - UNIDADES NÃO PERTENCENTES AO SI	43
5 O METRO	47
5.1 - PRIMITIVAS REPRESENTAÇÕES	47
5.2 - AS IMPERFEIÇÕES DO METRO	49
5.3 - INSTRUMENTOS DE COMPARAÇÃO	50
5.4 - O METRO DE 1960	51
5.5 - O METRO DE 1983	58
6 O QUILOGRAMA	67
6.1 - ANTECEDENTES	67
6.2 - A CONSERVAÇÃO DE UM PADRÃO	68
6.3 - CONTIGÊNCIAS CURIOSAS	70
6.4 - BALANÇAS	71
6.5 - GRAVÍMETROS	72
7 O SEGUNDO	75
7.1 - UM POUCO DE ASTRONOMIA	75
7.2 - CALENDÁRIOS E ERAS	82
7.3 - INSTRUMENTOS PARA MEDIR O TEMPO	86
7.4 - OS DIVERSOS TEMPOS	92
8 O AMPERE (O VOLT, O FARAD E O OHM)	105
8.1 - OS PRIMITIVOS AMPERES	106
8.2 - O AMPERE DE 1948	107

ÍNDICE

36	8.3 - MEDIÇÃO ABSOLUTA DE OUTRAS GRANDEZAS ELÉCTRICAS	110
38		
39	9 A MOLE	145
43	9.1 - PERÍODO DE 1700 A 1900	147
47	9.2 - PERÍODO DE 1900/1961	148
47	9.3 - DEPOIS DE 1961	149
49	9.4 - DE 1971 EM DIANTE	150
50	10 O KELVIN	153
51	10.1 - RESENHA HISTÓRICA	153
58	10.2 - ESCALAS TERMOMÉTRICAS	154
67	10.3 - TERMÓMETROS	158
67	10.4 - ESCALAS INTERNACIONAIS DE TEMPERATURA	193
68	11 A CANDELA	205
70	11.1 - A VELA INTERNACIONAL	206
71	11.2 - A VELA NOVA	206
72	11.3 - A CANDELA (1948)	207
75	11.4 - ORGANISMOS SUPERINTENDENTES	207
75	11.5 - ASPECTOS QUANTITATIVOS (Fotometria - Radiometria)	208
82	11.6 - EQUIPAMENTOS DE MEDIDA	215
86	11.7 - ACÇÃO DOS LABORATÓRIOS NACIONAIS	222
92	11.8 - ACÇÃO DO BIPM	226
105	11.9 - A CANDELA DE 1979	227
106	BIBLIOGRAFIA	
107		

A CONFERÊNCIA GERAL DE PESOS E MEDIDAS

A necessidade de medir grandeza físicas tem sido uma constante na história da civilização. Já nos tempos bíblicos e em relação a um dilúvio, que se acredita ter ocorrido há cerca de oito mil anos no Oriente Médio, a arca que durante a catástrofe acolheu os sobreviventes, tem as dimensões assinaladas, nos relatos do acontecimento.

Passando por sobre as antigas civilizações, cada uma das quais fez um maior ou menor uso da medida, não só para fins de comércio como para definir limites à propriedade agrícola, vamos encontrar na civilização romana, padrões de comprimento baseados nas dimensões médias do corpo humano: o *pé* para medir comprimentos, a *ânfora*, que valia um pé cúbico, para medir capacidades e a quantidade de água que enchia a *ânfora* para definir a unidade de massa.

Mais tarde, na Idade Média em 789, o imperador Carlos Magno, fez publicar legislação unificando as medidas em todo o império. Porém, a sua morte e o desmembramento subsequente do próprio império, goraram tal desígnio.

Em Portugal, no reinado de D. Pedro I, as cortes de Elvas de 1361, e no reinado de D. Sebastião a Lei de Almeirim, de 26 de Janeiro de 1575, regularam pesos e medidas no País.

Em meados do século XVIII, na Europa, com o início da revolução industrial, a preocupação da unificação das medidas acentuou-se. Nessa altura, acontecia ainda que medidas com a mesma designação (*pé*, *braça*, *toeza*), tinham valores diferentes de região para região. Na própria França havia várias *toezas*, enquanto que o *pé* francês diferia em cerca de 6% do *pé* inglês.

A unidade mais importante era, naturalmente, a de comprimento, que servia de base às unidades de área, de volume e de massa.

Entre as primeiras sugestões para a escolha de uma unidade de comprimento, figuram a do astrónomo francês Mouton (1670) e a do inglês Huyghens (1673), – este

apoiado pela Royal Society of London – e consistiam tanto uma como a outra, na escolha do comprimento do pêndulo cujo período da oscilação simples é de um segundo. É um valor próximo do comprimento do actual *metro*, mas que depende, pelo menos, da aceleração local da gravidade.

Mais tarde, em França, o assunto foi retomado por Talleyrand (1790) que dirigiu à Assembleia Nacional Constituinte uma proposta idêntica à de Huyghens; todavia, quando submetida à Academia das Ciências foi, obviamente, recusada em favor de uma outra que atribuía ao *metro* (já assim se designava a unidade de comprimento, mesmo antes de estar estabelecida), o comprimento da décima milionésima parte do quarto do meridiano terrestre.

Para concretizar esta definição do metro foi, por essa época, criado em França um organismo de carácter temporário, denominado Agência de Pesos e Medidas, o qual, face à urgência da situação, fez aprovar por lei de 1 de Agosto de 1793 um sistema métrico provisório que baseava o metro no comprimento do meridiano, obtido cerca de cinquenta anos antes. Para divulgar a nova unidade (provisória), indo ao encontro das necessidades do comércio em geral, foram construídas e distribuídas por vários locais de Paris (1796/1797) dezasseis placas de mármore tendo gravada a linha representativa do metro, dividida em dez decímetros, um dos quais era ainda subdividido em dez centímetros. Destas placas, que foram de extrema utilidade naquele tempo, resta hoje uma única, na Praça Vendôme.

Entretanto, e com vista a uma definição mais rigorosa do *metro*, decorriam os trabalhos de Pierre Méchain e Jean-Baptiste Delambre que entre 1792 e 1798 fizeram medições da distância entre Dunquerque e Barcelona, cidades situadas ambas no mesmo meridiano. O valor obtido, conjugado com a medição, pela Astronomia, da diferença de latitudes entre os pontos extremos da distância medida, forneceu por meio de uma proporção simples, o comprimento a atribuir à décima milionésima parte do quarto do meridiano terrestre.

Esse comprimento foi depois materializado na forma de uma vara de platina, com secção rectangular de 25,3 mm × 4 mm, cuja distância entre topos, à temperatura do gelo fundente, representava o *metro*. Este foi designado por Metro dos Arquivos e depositado nos Arquivos da República, em Paris, no dia 22 de Junho de 1799, juntamente com o Quilograma dos Arquivos, um cilindro, também de platina, com cerca de 39 mm, tanto de diâmetro como de altura. A esta relação diâmetro/altura corresponde, para um dado volume cilíndrico, a superfície exterior mínima. A importância desta condição resulta do facto de a humidade e as poeiras na superfície poderem influenciar a massa real do padrão. Este cilindro, devia, segundo lei da Assembleia Nacional francesa (10 de Dezembro de 1799), materializar a massa do decímetro cúbico de água à temperatura da sua densidade máxima (4,1 °C).

Embora só nesta data o Metro dos Arquivos e o Quilograma dos Arquivos tenham sido considerados como padrões representativos, já em 7 de Abril de 1795 o Sistema Métrico fora legalizado em França. Porém, em virtude de decisões contraditórias, sobretudo nos primeiros tempos, só em 1 de Janeiro de 1840 foi definitivamente aceite. Entretanto, diversos países, a começar pela Bélgica, Holanda e Luxemburgo foram

sucessivamente adoptando o Sistema Métrico, de forma que em 1860 já eram em número de catorze (Portugal incluído).

Em 1869 o governo francês convidou numerosos países a enviarem delegados a Paris, para formarem a Comissão Internacional do Metro. As reuniões prolongaram-se até ao ano seguinte e delas resultou o consenso de que o Metro dos Arquivos e o Quilograma dos Arquivos deveriam servir de referências para o fabrico de protótipos e de cópias, a distribuir pelos países membros.

Em 1872 a mesma Comissão, composta por delegados de trinta países, – entre os quais Portugal – confirmou a decisão anterior e finalmente, em 1875, foi assinada a Convenção do Metro. Esta Convenção criou o órgão máximo: a Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), formada por delegados dos estados membros da Convenção.

Nos campos técnico e científico surgiram então:

- o *Comité Internacional de Pesos e Medidas* (CIPM), constituído por representantes de organismos internacionais especializados, É este Comité que prepara e faz executar as decisões da CGPM. Para tal apoia-se nos pareceres de Comités Consultivos, assistidos por grupos de trabalho, fazendo, uns e outros, parte da orgânica da Convenção do Metro. Os Comités Consultivos foram sendo criados, ou estruturados, ao longo dos anos, conforme as necessidades, e são actualmente (1999) em número de dez, a saber:

- CCEM – Comité Consultivo para a Electricidade e o Magnetismo,
- CCPR – Comité Consultivo para a Fotometria e Radiometria
- CCT – Comité Consultivo para a Termometria
- CCL – Comité Consultivo para o Comprimento
- CCTF – Comité Consultivo para o Tempo e a Frequência
- CCRI – Comité Consultivo para Radiações Ionizantes
- CCU – Comité Consultivo para as Unidades
- CCM – Comité Consultivo para a Massa e Grandezas Relacionadas
- CCQM – Comité Consultivo para a Quantidade de Matéria
- CCAUV – Comité Consultivo para Acústica, Ultrasons e Vibrações.

- o *Bureau Internacional de Pesos e Medidas*, (BIPM). O BIPM é, principalmente, o laboratório central para inter-comparações de padrões nacionais. É também um centro internacional de propagação e desenvolvimento do Sistema Métrico. As suas atribuições principais são:

- estabelecer padrões fundamentais e escalas das principais grandezas físicas e conservar os protótipos internacionais,
- efectuar comparações de padrões nacionais e internacionais,
- assegurar a coordenação das técnicas de medida correspondentes,
- efectuar e coordenar as determinações das constantes físicas internacionais.

Em alguns países signatários da Convenção do Metro, foram também criados laboratórios nacionais, com funções idênticas às do BIPM, relativas ao estudo de novas técnicas de medida e à investigação, tanto fundamental como aplicada. Surgiram assim as seguintes instituições:

- LCIE - Laboratoire Central des Industries Electriques - França
- NPL - National Physical Laboratory - Grã-Bretanha
- N.B.S - National Bureau of Standards - E.U.A.- (posteriormente NIST)
- PTB - Physikalisch-Technische Bundesanstalt - Alemanha.
- IMM - Instituto de Metrologia Mendeleév - .U.R.S.S.
- ETL - Electrotechnical Laboratory - Japão.
- IEN - Istituto Elettrotecnico Nazionale - Itália

Portugal pertenceu ao primeiro grupo de países que assinaram a Convenção do Metro – pelo punho do seu delegado, o ministro plenipotenciário e par do Reino, José da Silva Mendes Leal –, mas desde então pouca colaboração tem dado à CGPM. Num relatório comemorativo do centenário do BIPM, publicado em 1975, há uma lista de nomes dos cento e dez membros que o CIPM teve até àquela data. Dela só constam dois portugueses: A. de Aguiar (1884 - 1887) e H. de Macédo (1887 - 1907), emparceirando com nomes ilustres, como G. Ferraris, D. Mendeleév, A. Michelson, P. Zeeman, L. de Broglie e outros.

As reuniões da CGPM sucederam-se a um ritmo de, aproximadamente, uma reunião de quatro em quatro anos, com algumas excepções, nomeadamente nos períodos das conflagrações mundiais. A 1ª CGPM reuniu em 1889, a 10ª reunião foi em 1954, a 20ª em 1995, e a 21ª aconteceu em Outubro de 1999.

No nosso País, e no âmbito das medidas eléctricas, a primeira manifestação de interesse estatal pela criação de um laboratório veio com a lei nº.122 de 26 de Maio de 1911 que criou o Laboratório Electrotécnico, junto da Administração Geral dos Correios e Telégrafos, *para nele se fazerem as verificações, ensaios e medidas de precisão e industriais que se julguem indispensáveis*. Assim funcionou até 1930, data em que foi extinto, por razões de ordem económica, e o seu equipamento foi dividido pelo Instituto Superior Técnico e pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. A parte que ficou no IST continuou a funcionar com a mesma designação de Laboratório Electrotécnico, com pessoal técnico dos Correios, e independente da Escola.

Em 1944 este laboratório foi incorporado na então criada Direcção-Geral dos Serviços Eléctricos, com a designação de Laboratório Central Electrotécnico (LCE).

Nas três décadas seguintes o LCE, dotado regularmente com verbas anuais adequadas, foi sendo equipado com excelente instrumentação, não obstante a impossibilidade de se dispor de mais espaço, dentro do IST, onde continuou instalado até fins de 1985, embora integrado legalmente no LNETI, a partir de 1977.

Durante aquelas décadas, além de manter a metrologia das grandezas eléctricas básicas e da electricidade em geral, deu também apoio à indústria electrotécnica, principalmente através de ensaios para determinação de características de matérias primas, nomeadamente condutores, isolantes e materiais magnéticos.

Como exemplo do grau de credibilidade que alcançou, pode referir-se que nele foram aferidos todos os dispositivos de contagem de energia instalados antes de 1970 nas subestações da rede eléctrica nacional, dispositivos esses que regulavam vultuosas transacções de energia entre produtores e distribuidores. Foi este o laboratório nacional que, no domínio das medidas eléctricas e até à referida data, mais se aproximou do espírito dos laboratórios estrangeiros mencionados.

Em 1973 entrou em declínio, provocado principalmente pela redução drástica das verbas que daí em diante lhe foram atribuídas. Não obstante, uma missão de peritos da UNIDO (Organismo das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial), que em 1978 visitou em Portugal todos os laboratórios científicos nacionais teve, no relatório final, palavras elogiosas para o laboratório em geral e, em especial, para a qualidade de algum equipamento.

O fim do LCE veio por diploma legal de 31-12-1977, que conduziu à sua integração no Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, LNETI. Em 1988 apenas restava em funções parte da metrologia das grandezas eléctricas básicas e uma pequena parcela da metrologia geral de electricidade; constituindo um dos vários Serviços, de um dos vários Departamentos, de um dos vários Institutos, que formavam o LNETI. No entanto, a partir desta data, novos horizontes se abriram ao laboratório, que mais tarde viria a ser designado por Laboratório de Metrologia Eléctrica, a referir adiante, em 2.5. .

Nos domínios de outras grandezas físicas, tais como comprimento, massa, força e temperatura, a conservação e manutenção de padrões foi desde início encargo, primeiro das autarquias locais e depois dos organismos que estiveram na origem do Instituto Português da Qualidade e, no que respeita às medidas de comprimento, ainda, do Instituto Geográfico e Cadastral. No que toca aos padrões de tempo, isto é à definição da hora legal, a tarefa foi cometida ao Observatório Astronómico Nacional, na Tapada da Ajuda. Porém, a partir da segunda metade da década de 80 o panorama da atribuição de competências, no âmbito das medidas em geral, sofreu alterações que adiante serão referidas.

AS UNIDADES FUNDAMENTAIS DO SISTEMA INTERNACIONAL
- ASPECTOS HISTÓRICOS E TÉCNICOS -

2

ORGANISMOS RESPONSÁVEIS

As responsabilidades, no âmbito das unidades de medida, cabem a organismos que actuam a vários níveis e com objectivos diferentes. Assim, alguns organismos actuam no plano internacional, outros no plano europeu e outros no plano nacional. No que respeita a funções, enquanto uns definem as unidades, outros estabelecem regulamentação, outros controlam a sua aplicação e outros, ainda, asseguram a normalização, tanto das unidades como dos padrões.

Foi já visto que o papel da CGPM é, como organismo responsável, através do BIPM, a definição das unidades e padrões das principais grandezas físicas. Ver-se-á de seguida como actuam os restantes organismos.

2.1 - ORGANISMOS INTERNACIONAIS

- Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML)

Enquanto que a CGPM se ocupa da metrologia científica, os aspectos práticos e legais, nomeadamente a definição dos princípios gerais da metrologia legal e o estudo de problemas de carácter legislativo com interesse internacional, são missões da OIML, criada em resultado de uma convenção reunida em Paris, em 12 de Outubro de 1955, e que agrupava vinte e três estados. Este organismo exerce a sua função por meio da publicação de recomendações internacionais.

Em 1983, a Direcção-Geral da Qualidade fez traduzir, pela Comissão Técnica Portuguesa de Normalização de Metrologia (CT-62), um "Vocabulário de Metrologia Legal" da OIML, elaborado em conformidade com uma recomendação da III Conferencia

Internacional de Metrologia Legal e, em 1985, publicou o Vocabulário Internacional de Metrologia - V.I.M., reeditado em 1996.

A adesão de Portugal à OIML foi consignada no Decreto-Lei nº. 34/84 de 11 de Julho.

- Organização Internacional de Normalização - ISO

Esta organização foi criada em 1947 e agrupa 61 países, Portugal incluído desde 1949, e dedica-se à publicação de Normas Internacionais.

O Comité Técnico ISO/TC 12 "Grandezas, unidades, símbolos, factores e tabelas de conversão," elaborou a Norma ISO 31 que comporta catorze partes e que define: grandezas, unidades e símbolos em vários domínios técnicos. Publicou, também, a Norma ISO 1000, que contém as unidades do Sistema Internacional, bem como recomendações para o emprego de múltiplos e submúltiplos e ainda, a Norma ISO 9000 sobre padrões para laboratórios de ensaio e calibração.

- Comissão Electrotécnica Internacional - IEC

A IEC, que teve início numa comissão criada em 1904 pelo Congresso Internacional de Electricidade reunido em Saint Louis, nos E.U.A., produz, no plano internacional e no campo da Electrotecnia, publicações resultantes do trabalho de diversos Comités de Estudo, tendo cada um em vista a normalização num determinado grupo de assuntos afins. Um desses comités, com nº 50, produziu o Vocabulário Electrotécnico Internacional - VEI, que abarca praticamente todas as áreas de aplicação da Electrotecnia e, ainda, as da Matemática, Física e Química.

A IEC trabalha em estreita ligação com a ISO.

2.2 - ORGANISMOS EUROPEUS

- Conselho das Comunidades Europeias - CCE

No plano europeu, o CCE publica directivas visando a aproximação das legislações dos estados membros num certo número de domínios, entre os quais o das unidades de medida, mas tendo sempre em linha de conta as resoluções da CGPM.

A legislação europeia, em matéria de unidades, rege-se pelas directivas de 18 de Outubro de 1971 e de 27 de Julho de 1976.

O CCE actua através de dois organismos: o Comité Europeu de Normalização, CEN, e o Comité Europeu de Normalização Electrotécnica, CENLEC.

- EUROMET

Os Institutos Nacionais de Metrologia (NMIs) dos diversos países têm procurado formar associações regionais com outros NMIs geograficamente próximos, com a finalidade de partilhar o equipamento mais dispendioso, dar cooperação em investigação, facilitar a rastreabilidade, isto é, o reconhecimento da cadeia de padrões intervenientes sucessivos até atingir os do BIPM, etc. Essas organizações regionais da Metrologia são designadas pela sigla RMO e a EUROMET é precisamente a RMO europeia.

A EUROMET é uma organização cooperativa, formada entre organizações nacionais formalmente criada numa reunião em Madrid em 1987, com base no *Memorandum of Understanding – MOU* pelos países participantes e iniciou as actividades no princípio de 1988. A EUROMET sofreu alterações em 1998 e no fim de 1999 tinha 25 membros.

Os fins que a EUROMET visa são:

- encorajar a cooperação no desenvolvimento de padrões nacionais e de métodos-padrão de medida;
- otimizar o uso de recursos e de serviços;
- melhorar facilidades de medida e torná-las acessíveis a todos os membros.

Portugal, representado pelo I.P.Q., foi reconhecido como membro da EUROMET em 1997.

- European Accreditation Advisory Board – EA

São membros da EA organismos nacionais de acreditação, como tal reconhecidos, dos países membros da União Europeia e da EFTA. Desde 1989 e até 1997, no âmbito da acreditação e da certificação, existiam dois organismos europeus separados:

- European Accreditation of Certification - EAC
- European Co-operation for Accreditation of Laboratories – EAL

entidades que tinham em vista a comparação de certificações, no primeiro caso, e dos próprios laboratórios, no segundo.

No intuito de promover a garantia de uniformidade internacional, estes dois organismos tiveram uma primeira reunião em Viena, em Novembro de 1997, mas só depois de uma segunda reunião, em Londres em 1999, é que se formou a EA, cujas actividades compreendem:

- teste e calibração;
- inspecção;
- certificação de sistemas directivos;
- certificação de produtos;
- certificação de pessoal;
- verificação ambiental segundo a regulamentação de European Eco-Management e Audit Scheme (EMAS).

A EA é formada por dois comités, o **Comité 1 – Multilateral Agreements**, que desempenha, aproximadamente, as funções anteriormente afectas à EAC, e pelo **Comité 2 – Technical Activities**, que continua o trabalho da EAL.

2.3 - ORGANISMOS NACIONAIS

- Instituto Português da Qualidade - IPQ

A preocupação com as unidades de medida e com a qualidade dos produtos, sobretudo no ramo alimentar, está patente em legislação antiga, como por exemplo num decreto de 1859 que reorganizou o Ministério das Obras Públicas, Comércio e Indústria, no qual há referências a uma Inspeção Geral de Pesos e Medidas. Outro decreto, o nº 281 de 1886, respeitante a Serviços Agrícolas, divide o País em 12 regiões e cria um laboratório químico em cada região.

Em 1930 é criada a Inspeção Técnica das Indústrias e Comércio Agrícolas – ITICA e num decreto do ano seguinte, que lhe fixa as atribuições, há referência não só a laboratório próprio, como a *qualquer outro laboratório oficial, dependente dos Ministérios da Instrução ou do Interior*.

Em 1937 é criada a Inspeção Geral das Indústrias e Comércio Agrícolas – IGICA, com um “Laboratório Químico-Central”, que fora criado em 1901 com a designação de Laboratório Químico-Fiscal de Lisboa, transitando primeiro para a ITICA e depois para a IGICA, que possuía ainda um laboratório em cada uma das 9 (ao tempo) regiões agrícolas do País.

Em Junho de 1948 é reorganizada a IGICA, criando-se a Inspeção Geral dos Produtos Agrícolas e Industriais – IGPAI, para a qual são transferidas a 3ª Repartição da Direcção-Geral das Indústrias (Serviço de Pesos e Medidas) e a Comissão Técnica dos Métodos Químico-Analíticos. O Laboratório Químico-Central veio, em 1977, a ser integrado no LNETI.

Criada a IGPAI, foram-lhe atribuídas, através da Repartição de Normalização, diversas funções que incluíam a elaboração de Normas Portuguesas e a ligação com os organismos internacionais de normalização e de regulamentação (ISO, CEN e outros).

Simultaneamente, é criado dentro da IGPAI, o Conselho de Normalização, um órgão de consulta ao qual compete apreciar os Estudos de Normas que, depois de passarem pelas fases de Inquérito e de Norma Provisória, serão tornadas Normas Portuguesas.

Em 1950 surgiram as primeiras Comissões Técnicas encarregadas do estudo de normas nacionais e em 1952 foram publicadas as primeiras normas, com carácter provisório, só tornadas definitivas em 1960. De 1952 em diante, o labor meritório de um grande número de Comissões Técnicas traduziu-se no estudo e na publicação de alguns milhares de Normas Portuguesas.

Em 1952 foi ampliada a composição do Conselho de Normalização e foi publicado o Estatuto da Normalização Portuguesa. O diploma que criou o Estatuto criou também o

Centro de Normalização, presidido pelo Inspector Geral da IGPAI, com as funções de fornecer meios às Comissões Técnicas e de subsidiar a publicação do Boletim de Normalização. Foi extinto em 1986, quando da criação do Instituto Português da Qualidade.

Em 1977 foi extinta a IGPAI e criada a Direcção-Geral da Qualidade - DGQ que substituiu aquele organismo em tudo o que respeita a normalização, regulamentação e certificação.

Em 1986 o Decreto-Lei.nº 183/86 extinguiu a DGQ e criou o Instituto Português da Qualidade -IPQ para o qual transferiu a responsabilidade nacional sobre as actividades de Normalização, Certificação, Acreditação e também da Metrologia, esta última através do Laboratório Central de Metrologia - LCM criado nos anos noventa, no prolongamento de laboratórios anteriores.

- Laboratório de Metrologia Eléctrica - LME (INETI)

Por uma Lei de Julho de 1880 foi criada a Direcção-Geral dos Correios, Telégrafos e Faróis para, entre outras finalidades, *estudar a iluminação das costas e postos marítimos e fazer experiências sobre luz e electricidade* e, em 1886, foi criado nesta Direcção-Geral um laboratório e um museu. O Laboratório Electrotécnico surgiu em 1899 mas só para serviço interno.

Em 1903 foi publicado o primeiro Regulamento sobre Instalações Eléctricas, pela Inspecção-Geral dos Telégrafos e Indústrias Eléctricas (IGTIE), no qual se reconhecia a necessidade da existência de um laboratório específico. Tal só veio a acontecer em 1911, com o Laboratório Electrotécnico da Administração Geral dos Correios e Telégrafos, antecessor do Laboratório Central Electrotécnico - LCE, já referido no capítulo anterior.

Em 1977 o laboratório foi integrado no LNETI (mais tarde INETI) e através dum Protocolo de Cooperação Técnica assinado com o IPQ em 1988 - e revisto em 1998 - deu-se início a uma renovação do equipamento e, simultaneamente, a contactos com o BIPM no sentido de passarem a ser aferidos regularmente alguns padrões de grandezas eléctricas. Igualmente com o PTB alemão tem havido actividades metrológicas bilaterais. De salientar, o interesse patente do INETI na actividade da Metrologia, que foi recentemente seleccionada como um dos domínios de especialização tecnológica deste organismo.

- Comissão Electrotécnica Portuguesa - CEP

A CEP iniciou a sua actividade em 23 de Setembro de 1929, com a publicação da Portaria nº 6 409, cuja finalidade era *aprovar as regras estabelecidas pela Comissão Electrotécnica Internacional, e fazer publicar no Diário do Governo o relatório respectivo, devendo de futuro ser adoptadas em todas as escolas, documentos e publicações oficiais a ortografia, símbolos e notações propostas por essa Comissão.*

Mais tarde, em 1946, o Decreto-Lei nº. 35 543 reorganizou-a, ficando a funcionar junto da Direcção-Geral dos Serviços Eléctricos - DGSE, e alargou a sua composição,

passando a ser presidida *por um engenheiro electrotécnico da livre escolha do Secretário de Estado da Indústria* e por mais doze vogais, representativos das escolas superiores de Electrotecnia e de diversos departamentos estatais, incluída a IGPAI.

Em 1963 houve um acordo entre a IGPAI e a CEP relativo às Normas Portuguesas sobre assuntos de Electrotecnia, estabelecendo-se que os estudos dessas Normas elaborados pela Repartição de Normalização, as Normas em fase de inquérito, as Normas Provisórias sujeitas a crítica, ou ainda as Normas definitivas quando da sua revisão, seriam enviadas à CEP antes de serem presentes ao Conselho de Normalização.

Em 1978, com a extinção da DGSE e a integração das suas competências na Direcção-Geral da Energia, passou, por Despacho Normativo, a CEP a funcionar em ligação com as DGQ e DGE.

- Instituto Electrotécnico Português - IEP

O IEP é um organismo de direito privado e de utilidade pública administrativa, sem fins lucrativos e tem sede na periferia do Porto. Foram seus fundadores em 1983, sob tutela da DGQ, a ANIMEE, (Associação Nacional dos Industriais de Material Eléctrico e Electrónico), a EDP e os CTT.

Destina-se a prestar serviços nas áreas de normalização, do controlo de qualidade, da certificação, da metrologia e do desenvolvimento e inovação científicas e tecnológicas. Possui um laboratório de metrologia de electricidade, além de outros laboratórios para ensaio de equipamento eléctrico diverso.

No âmbito do SNGQ – Sistema Nacional de Gestão da Qualidade, foi designado “Organismo de Normalização Sectorial” em 1986 e “Organismo de Certificação” em 1990.

- Outros Organismos

Entre os organismos nacionais com laboratórios de Metrologia, além dos já mencionados, contam-se: o **Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC** com laboratório de acústica, o **Instituto Tecnológico e Nuclear – ITN**, que mede radiações ionizantes e o **Centro de Ciência e Tecnologia Ópticas – CETO**, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, com actividade na óptica. Além destes, existem ainda diversos laboratórios, em empresas industriais, orientados para áreas metrológicas de interesse próprio.

Durante anos, a manutenção dos padrões e dos métodos padrão nacionais para reproduzir as unidades de medida, foi assegurada apenas pelo já referido Laboratório Central Electrotécnico e pelos laboratórios adstritos ao IPQ e seus antecessores. No entanto, a nova orientação da legislação, que em 1983 criou o Sistema Nacional de Gestão de Qualidade – SNGQ, e em 1993 o Sistema Português de Qualidade, permite a agentes

económicos e sociais, não estatais, devidamente credenciados, levarem a efeito acções em domínios como a Metrologia e a Normalização, contribuindo assim para que possam ficar cobertos todos os domínios da Metrologia.

2.4 - LEGISLAÇÃO NACIONAL

Em Portugal, nos domínios da regulamentação e da normalização das unidades de medida, podem referir-se, por ordem cronológica, diversas disposições que, obviamente, serão encabeçadas pela já citada lei do tempo de D. Sebastião. Todavia existem referências históricas anteriores, focando diversas medidas de uso comum e também o seu relacionamento. É, por exemplo, o caso da "Crónica de Portugal" mandada fazer por D. Duarte, em 1419, a qual, a propósito da conquista de Santarém aos mouros e para dar uma ideia da extensão das vastas áreas de cultivo que rodeavam a cidade, desce ao pormenor de explicar que uma *légua de terra* tinha três *milhas*, cada *milha* com mil *passos* e cada *passo* com cinco *pés*.

Outro exemplo: No castelo de Sortelha (conc. de Sabugal), construído em 1228, na parte exterior da muralha, junto a uma das portas, estão gravados na pedra dois traços horizontais, representando, um a *vara* (cinco *palmas* ou seja, cerca de 1,10 m) e outro o *côvado* (do osso cúbito - distância média do cotovelo à ponta do dedo médio, cerca de 0,66 m, ou ainda, três *palmas*).

Além das disposições atrás referidas, relacionadas com as cortes de Elvas de 1361 e com a Lei de Almeirim de 1575, de entre a principal legislação nacional, sobre unidades pode destacar-se::

- Diploma de 1814 que introduziu no País o Sistema Métrico, e adaptou as unidades de medida da lei atrás referida, que ainda subsistiam, às dimensões do Sistema Métrico. Algumas destas medidas, assim adaptadas, conservaram-se em uso até há bem poucas dezenas de anos, tais como: a arroba, o almude e o alqueire;
- Decreto de 13 de Dezembro de 1852 tornando obrigatória a adopção do sistema métrico;
- Lei de 19 de Abril de 1876 que ratifica a Convenção do Metro, entretanto assinada em Paris em 20 de Maio de 1875;
- Diploma de 19 de Abril de 1911 determinando que os padrões legais das unidades de comprimento e de massa sejam os respectivos protótipos, ambos com o número 10, aprovados na 1ª. CGPM, em 1889 e atribuídos a Portugal;
- Diploma de 20 de Abril de 1911 estabelecendo o quadro das medidas legais;

- Lei n.º 1850 de 5 de Março de 1926, que aprova a Convenção Internacional, com as alterações aprovadas na 6.ª CGPM em 1921;
- Portaria n.º 6 409 de 23 de Setembro de 1929, que aprova uma listagem das unidades da Electricidade e da Física em geral, e das respectivas grandezas, com os seus símbolos, formas de escrita e de pronúncia, tal como foram aprovadas nos Congressos de Paris de 1881 e 1889 e, de Chicago de 1893.

Depois de um grande interregno, durante o qual foi publicada legislação específica relativa a assuntos diversos, foi preciso esperar por 1983 para haver de novo legislação importante no campo da Metrologia:

- Decreto-Lei n.º 165/83 de 27 de Abril. Este diploma permitiu a adopção, como normas portuguesas, das normas europeias do, CEN e do CENLEC, e das internacionais da ISO e da IEC, colmatando assim uma grave situação, que até então existiu: a falta de normas portuguesas em muitos domínios. Estabelece ainda as bases fundamentais para a definição da política da qualidade e institucionaliza o Sistema Nacional de Gestão da Qualidade - SNGQ, com os seus instrumentos fundamentais: Normalização, Metrologia e Qualificação/Certificação.

O SNGQ é constituído por:

- I - Sistema Nacional de Gestão de Qualidade
- II - Conselho Nacional de Qualidade
- III - Centro de Normalização
- IV - Subsistema Nacional de Metrologia
- V - Subsistema Nacional de Normalização
- VI - Subsistema Nacional de Qualidade

O SNGQ foi concebido numa perspectiva descentralizadora, tendo sido incentivados à participação todos os agentes económicos e sociais interessados, ficando, em última análise, o IPQ com o papel de “garante” do Sistema. Isto traduziu-se, em concreto, por uma distribuição de tarefas, no âmbito da Metrologia, da Normalização e da Qualificação; bastando para tal que os organismos pretendentes se inscrevessem no SNGQ e vissem a sua candidatura aprovada. Para o efeito há Normas específicas da ISO.

No final de 1990 já se encontravam qualificados sete laboratórios não estatais, em diversas áreas da Metrologia. A partir de 1997 a competência para qualificação e certificação de laboratórios, que era feita pelo IPQ, foi transferida para a então criada Associação Portuguesa de Certificação – APCER, por sua vez, membro da IQNet, uma rede internacional para a qualidade. O Decreto-Lei n.º 165/83 foi revogado por outro Decreto-Lei, o n.º 234/93 de 2 de Julho, que em termos práticos o veio substituir;

ORGANISMOS RESPONSÁVEIS

- l, com
- m das
- s, com
- ovadas
- ecífica
- slação
- como
- e das
- ue até
- belece
- lade e
- om os
- a e
- o sido
- ssados,
- na. Isto
- rito da
- que os
- lidatura
- estatais,
- a para
- isferida
- por sua
- eto-Lei
- que em
- Decreto-Lei n.º 202/83 de 19 de Maio reformulando e adaptando diversas leis, algumas com origem ainda no século XIX. Pode considerar-se como a Lei das Bases Gerais da Metrologia. Foi substituído pelo Decreto-Lei n.º 291/90;
 - Decreto-Lei n.º 427/83, de 7 de Dezembro, que actualiza o sistema legal de unidades de medida: o Sistema Internacional. São actualizadas as definições das unidades de base do SI, em especial do metro, de acordo com as decisões da 17ª CGPM (1983);
 - Decreto-Lei n.º 34/84, de 11 de Julho, que estabelece a adesão de Portugal à OIML, Organização Internacional de Metrologia Legal;
 - Decreto -Lei n.º 320/84, de 1 de Outubro, com correcções ao Anexo do Decreto-Lei n.º 427/83;
 - Declaração publicada no Diário da República n.º 278, de 30/11/84, com novas correcções ao Anexo do Decreto-Lei n.º 427/83 publicado com o Decreto-Lei n.º 320/84;
 - Declaração publicada no Diário da República n.º 49, de 28/02/85, com mais correcções ao Anexo do Decreto-Lei n.º 320/84, constituindo uma nova publicação e da Declaração de 30/11/84;
 - Decreto-Lei n.º 183/86, de 12 de Julho, que criou o Instituto Português da Qualidade - IPQ;
 - Decreto-Lei n.º 222/88, de 28 de Junho, autorizou a utilização da grandeza "bar" (10^5 Pa) na graduação dos manómetros para medir pressão de pneumáticos;
 - Decreto-Lei n.º 223/88, de 28 de Junho, autorizou, nos domínios da medição da pressão arterial e outras, o uso do milímetro de mercúrio, com o valor de 133,322 Pa;
 - Decreto-Lei n.º 291/90, de 20 de Setembro, revogou o Decreto-Lei n.º 202/83 e, embora mantendo a mesma filosofia, adaptou-o à legislação comunitária. Estabelece o novo regime do Controlo Metrológico;
 - Decreto-Lei n.º 234/93 de 2 de Julho, que revogou o Decreto-Lei n.º 165/83 de 27 de Abril, actualizando-o *por forma a contemplar melhor o actual enquadramento e as alterações institucionais entretanto verificadas e*, substituindo a designação de Sistema Nacional de Gestão de Qualidade (SNGQ) por Sistema Português de Qualidade (SPQ). O SPQ está organizado em três subsistemas: da Normalização, da Qualificação e da Metrologia e é constituído pelo Conselho Nacional da Qualidade (CNQ), pelo Instituto Português da

Qualidade (IPQ), e pelas entidades creditadas no âmbito dos Subsistemas, da Normalização, da Qualificação e da Metrologia.

O CNQ é presidido pelo Ministro da Indústria e Energia, tem como primeiro vice-presidente o presidente do IPQ, e membros representantes da Administração Pública (Ministérios e Regiões Autónomas), das organizações associativas dos assuntos económicos, dos trabalhadores, e das Autarquias, bem como do ensino superior e das entidades integradas no SPQ.

O Subsistema da Metrologia, que mais tem a ver com o presente trabalho, é gerido pelo IPQ com a colaboração de outros laboratórios primários de metrologia, creditados, os quais devem cumprir o estabelecido nas directivas do CNQ aplicáveis.

- Decreto-Lei n.º 238/94, de 19 de Setembro, legalizou para todo o País o Sistema Internacional de Unidades (SI) e incluiu as alterações entretanto havidas. Definiu os domínios (económico, saúde, segurança pública e operações de natureza administrativa) onde o diploma se aplicava, admitindo que nos domínios da navegação marítima e aérea e do transporte por via férrea, fossem usadas as unidades previstas por convenções internacionais que vinculavam o País ou a Comunidade Europeia. Incluiu regras de escrita e, curiosamente, estabeleceu penalizações pecuniárias para quem utilizasse unidades de medida não autorizadas. Este diploma constituiu como que uma revisão do esquema do SI aprovado pela CGPM até à data e revogou os Decretos-Leis n.ºs 427/83, 320/84, 222/88 e 223/88.

2.5 - METROLOGIA PRIMÁRIA NACIONAL

O Decreto-Lei que aprovou o SPQ, no seu Art.º 19º respeitante ao Subsistema da Metrologia, especifica que o Subsistema visa *a manutenção e o desenvolvimento dos padrões metrológicos nacionais*. O artigo seguinte esclarece que *a elaboração dos padrões primários das unidades de medida é da responsabilidade do IPQ, mas pode ser delegada noutras entidades do Subsistema mediante acordo celebrado com o IPQ*.

Da aplicação destas directivas resultou a formação de uma rede nacional de Laboratório Primários, vocacionados para a Metrologia Científica ou Fundamental com a seguinte composição:

- Laboratório Central de Metrologia – LCM (IPQ)

O LCM é composto por vários laboratórios que realizam os padrões de: Comprimento, Massa, Tempo, Quantidade de Matéria e Temperatura Termodinâmica. É detentor do padrão nacional de massa, o Protótipo Internacional com o n.º 69 que substituiu, entretanto, o n.º 10 já referido. Além destas grandezas o LCM desenvolve

ainda outras áreas, como: densidade, força, frequência, gases de referência, humidade relativa, medições angulares, volume e viscosidade.

- Laboratório de Metrologia Eléctrica – LME (INETI)

O LME tem por missão essencial a manutenção das unidades eléctricas de grandezas contínuas e de grandezas alternadas de baixa frequência (até 1 MHz). Para tal há calibrações regulares de um conjunto de pilhas Weston, por meio de comparações bilaterais com o BIPM através de uma referência Zenner e, ainda, comparações de resistências de 1 Ω e de 10 k Ω .

A transferência AC/DC é assegurada por termo conversores de corrente e de tensão, sendo a precisão mantida por comparações bilaterais com o PTB (Alemanha). O LME realiza ainda medições de impedâncias e tem em projecto o desenvolvimento da área de potência e energia, para além da bancada existente para aferição de contadores.

- Laboratório Primário de Metrologia Acústica – LPMA (LNEC)

De criação recente no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, o LPMA dedica-se à Audiometria de sons puros, tanto por condução aérea como por condução óssea. Actua de acordo com recomendações da Organização Internacional de Metrologia Legal – OIML, que especificam os ensaios para aprovação de equipamento de Audiometria; os ensaios visam a frequência dos sinais emitidos nos audiómetros, a distorção harmónica da onda e a exactidão do nível sonoro.

- Instituto Tecnológico e Nuclear – ITN

O ITN é um laboratório com origem na antiga Junta de Energia Nuclear e tem por função a manutenção dos padrões das radiações ionizantes. A detecção e medida destas radiações são tarefas extremamente importantes na defesa da vida humana.

- Centro de Ciência e Tecnologia Ópticas – CETO (FEUP)

O interesse da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pela Metrologia Óptica foi incrementado em 1977 e, após várias etapas intermédias, culminou em 1993 na criação do **CETO**. A sua actividade estende-se pelas áreas de: Radiometria, Fotometria, Espectrofotometria, Colorimetria, Fibras Ópticas, Formação de Imagens e Óptica Ondulatória.

Nota – Uma informação mais completa sobre a génese e sobre as capacidades dos Laboratórios Primários referidos, pode ser encontrada na Bibliografia.

PRIMEIROS SISTEMAS DE UNIDADES

3.1 - DEFINIÇÕES

No estudo dos diferentes sistemas de unidades e do relacionamento entre eles, bem como do relacionamento das unidades dentro de um sistema, torna-se necessário utilizar vocábulos cujo significado preciso nem sempre é tido em conta. Daí a inclusão de algumas definições consideradas importantes.

Grandeza, Unidade Característica própria de um corpo ou de um fenómeno, susceptível de aumentar ou diminuir e que pode ser determinada por comparação com outra grandeza da mesma espécie, escolhida convencionalmente e designada por unidade de medida da grandeza.

Metrologia Ciência que abrange um vasto leque de questões relacionadas com a medida das grandezas, tais como: unidades, métodos de medida, adestramento de pessoal, etc. Subdivide-se em vários níveis: metrologia científica ou de base; metrologia industrial; e, metrologia legal, cada um com os seus objectivos próprios.

Padrão Instrumento de medida que serve para materializar uma grandeza determinada ou, eventualmente, um dos seus múltiplos ou submúltiplos. Tem por fim conservar, e mesmo reproduzir, a unidade da grandeza.

Símbolos Letras (uma, duas ou três) que, por convenção, permitem representar uma grandeza ou uma unidade, de forma simples. Há regras precisas para a escrita dos símbolos.

Sistema de grandezas Conjunto de grandezas definidas a partir de um número determinado de grandezas escolhidas, com vista a uma aplicação, quer num domínio particular da ciência ou da técnica, quer para aplicação generalizada.

Grandeza de base Grandeza que num sistema é considerada independente e é escolhida como fundamento do sistema. Ex.: comprimento, massa, tempo.

Grandeza derivada Grandeza que num sistema pode ser definida a partir das grandezas de base. Ex.: energia, aceleração.

Dimensão duma grandeza É a expressão da grandeza por meio do produto de grandezas de base do sistema, afectadas de expoentes dimensionais. Ex.: dimensão da velocidade $L.T^{-1}$

Sistema de unidades Conjunto de unidades, correspondendo a um sistema de grandezas.

Unidades e sistemas coerentes Unidade coerente é a que se exprime em função das unidades de base por uma fórmula cujo coeficiente numérico é a unidade.
Ex.: o newton $N = m.kg.s^{-2}$. Um sistema diz-se coerente se as suas unidades o são.

Unidade de base Unidade correspondente a uma grandeza de base de um sistema
Ex.: metro, segundo.

Unidade derivada Unidade definida a partir das unidades base. Ex.: metro quadrado, joule, hertz.

3.2 - SISTEMAS DE UNIDADES

O primeiro sistema de unidades baseado no metro surgiu em França, a 1 de Agosto de 1793, com uma lei que criou o organismo de carácter temporário já referido "Agência de Pesos e Medidas". É, pois, anterior à aprovação definitiva do Metro dos Arquivos. No entanto, viu-se desde logo que, no campo científico, as dimensões escolhidas para as unidades principais não estavam adequadas às aplicações da Física. Isso levou à criação de outros sistemas, todos derivados do metro, que tiveram a sua época e dos quais, uma ou outras unidades são por vezes ainda referidas. Segue-se um resumo dos mais importantes.

3.2.1 - Sistema Métrico (original)

Foi estabelecido em França, por lei de 1 de Agosto de 1793. Tinha apenas quatro unidades e só uma delas, o metro, era unidade de base. As restantes eram unidades derivadas.

— comprimento	o metro
— superfície	o are (100 m ²)
— volume	o litro e o estere (1 m ³)
— massa	o grama (massa de 1 cm ³ de água)

3.2.2 - Sistemas C.G.S.

As descobertas científicas que se deram no século XIX, sobretudo no domínio da electricidade e do magnetismo, trouxeram a necessidade de novas unidades, mais adequadas às quantidades envolvidas nas experiências.

Entre 1820 e 1850 Gauss e, um pouco mais tarde Weber, conceberam, cada um, o seu sistema coerente, ambos baseados no milímetro, no miligrama e no segundo. O sistema original de Gauss foi idealizado com vista a experiências de Física em geral, enquanto que o de Weber tinha em vista o magnetismo.

Em 1863, a Associação Britânica para o Avanço das Ciências, nomeou uma comissão que incluía personalidades como Maxwell, Thompson e Siemens, com a missão de estudar as unidades eléctricas. O primeiro resultado do trabalho desta comissão consistiu na proposta de um sistema de unidades baseado no metro, no grama e no segundo. Porém, pouco depois, em 1873, foi resolvido substituir o metro pelo centímetro e surgiu assim o sistema que ficou conhecido pelas iniciais C.G.S., e que rapidamente se expandiu por todos os ramos da Física.

Nos sistemas iniciais criados por Gauss e por Weber foram substituídas as unidades fundamentais pelas do sistema C.G.S., e originaram-se os sistemas: C.G.S. electrostático (ESCGS) e C.G.S. electromagnético (EMCGS); o primeiro, definindo a unidade de carga eléctrica a partir da lei de Coulomb e, o segundo, deduzindo a unidade de massa magnética a partir da lei do mesmo nome, para o magnetismo. Desta unidade de massa magnética se derivaram, sucessivamente, unidades de campo magnético, fluxo magnético, intensidade de corrente, diferença de potencial e resistência. Estas unidades formam com as unidades mecânicas um conjunto bastante coerente e, se bem que algumas delas fossem demasiado pequenas para usos industriais, o (EMCGS) foi sistema que maior interesse despertou nos congressos internacionais e, nele se vieram a basear futuros sistemas.

Entre os sistemas que tiveram por bases o centímetro, o grama e o segundo contam-se ainda o sistema, chamado, de Gauss e uma variante dele, o sistema de Heaviside-Lorentz, adiante referidos.

É importante salientar, ter sido nas reuniões da comissão que criou o sistema C.G.S., liderada, como se disse, por Maxwell e por Thompson, que surgiu a designação de *medida absoluta* e de *sistema absoluto*. No relatório da reunião de 1863 da Associação

Britânica pode ler-se: *A palavra "absoluto" é empregada em oposição a "relativo" e não implica que a medida seja feita com precisão ou que a unidade empregada seja realizada com perfeição, mas somente que a medida, em vez de ser simples comparação com uma quantidade arbitrária da mesma espécie, seja feita por referência a determinadas unidades fundamentais de outras espécies, consideradas como tal.*

Um exemplo de uma medição absoluta pode ser aduzido da aplicação das leis fundamentais da Electrostática ao cálculo da força atractiva entre armaduras de um condensador, quando carregado, em função das dimensões do condensador e da diferença de potencial. Se a força atractiva puder ser medida, a expressão analítica obtida, a partir das leis atrás referidas, permite conhecer a diferença de potencial, com base no valor da força e nas dimensões do condensador. Trata-se efectivamente de uma medição absoluta da diferença de potencial.

3.2.3 - Sistema M.Kp.S.

Foi adoptado na indústria mecânica e é baseado no metro, no quilograma-força e no segundo. Embora nos últimos anos se verifique tendência para o deixar de utilizar, nos catálogos de maquinaria, ainda surge por vezes referência a unidades deste sistema, como o cavalo-vapor (75 Kp.m/s). É um sistema incoerente, que se não liga a nenhum outro sistema de unidades, tanto eléctrico como calorífico, pelo que tende a desaparecer.

3.2.4 - Sistema Prático (Eléctrico)

Desde 1851, ano em que Weber, na Alemanha, conseguiu realizar a medição absoluta da resistência eléctrica, que a Associação Britânica para o Avanço das Ciências vinha recomendando a medida absoluta das grandezas em geral e, em especial, da força electromotriz e da intensidade de corrente. Ao tempo, poucos laboratórios estariam habilitados para esse tipo de trabalho; porém, antes de 1880, para uso dos electricistas industriais existiam já padrões de intensidade de corrente e de resistência, tais como:

- a corrente que depositava, por electrólise da solução de um sal de prata, 1 mg de prata por segundo, no cátodo, e que constituía o padrão para a intensidade de corrente;
- a resistência de uma coluna de mercúrio com 1 mm² de secção e 1 m de comprimento, que servia como padrão para a resistência.

Estas unidades, de certo modo arbitrárias, concebidas pelos próprios electricistas de acordo com as suas necessidades, e não por razões de ordem científica, estavam algo afastadas de certos múltiplos das unidades EMCGS correspondentes, apresentando diferenças de 12% para a intensidade de corrente e de 6% para a resistência.

Na sequência do papel importante desempenhado pela Associação Britânica para o Avanço das Ciências é justo assinalar a acção desempenhada pelo Congresso Internacional de Electricidade, que chegou a reunir 250 delegados de 28 países, nas diversas sessões que realizou entre 1881 e 1904.

O Congresso, reunido pela primeira vez em Paris, destinava-se a dar consagração internacional às propostas saídas da comissão da Associação Britânica e, simultaneamente, a definir e a uniformizar os sistemas de unidades.

A reunião de 1903, conhecida por Congresso de Chicago, por ter ocorrido nesta cidade, foi uma das mais importantes. Como unidades do Sistema Prático foram adoptados os múltiplos ou submúltiplos das unidades do Sistema EMCGS que se situavam mais próximos das unidades já em uso, ou seja,

- para a intensidade de corrente adoptou-se o ampere ($1 \text{ A} = 10^{-1} \text{ UEMCGS}$),
- para a resistência, o *ohm* ($1 \Omega = 10^9 \text{ UEMCGS}$).

Destas duas unidades derivaram as seguintes:

- o *volt*, para a diferença de potencial ($1 \text{ V} = 10^8 \text{ UEMCGS}$),
- o *coulomb*, para a carga eléctrica ($1 \text{ C} = 10^{-1} \text{ UEMCGS}$),
- o *farad*, para a capacidade ($1 \text{ F} = 10^{-9} \text{ UEMCGS}$).

Foram ainda definidos padrões do ampere, do ohm e do volt e consideradas essas definições como padrões legais. Nesta ordem de ideias, o ampere ficou definido como a corrente que depositava por electrólise de um sal de prata, 1,118 mg de prata (e não 1 mg) por segundo, e o ohm representado por uma coluna de mercúrio com o comprimento de 106,300 cm³, de secção constante, e contendo 14,4521 g de mercúrio (em vez 1 m de comprimento e 1 mm² de secção).

Foi também considerada como representação pratica do volt a fracção 1000/1434 da força electromotriz do elemento Latimer Clerk.

Estes valores, embora originassem unidades mais próximas das unidades absolutas, apresentavam, ainda, diferenças que, com o tempo, foram sendo detectadas.

É importante notar que na última Conferência Internacional, a de 1904 reunida em Saint Louis, foi lançada a ideia da formação de uma Comissão, que veio a ser o embrião da futura Comissão Electrotécnica Internacional - IEC.

Numa Conferência promovida em Londres em 1908, por essa incipiente Comissão, foi "precipitadamente" adoptado para fins legais o sistema que foi designado por Sistema Internacional de Unidades (não confundir com o actual SI), baseado na representação material das unidades do Sistema Prático e não na sua definição teórica, isto é; no ampere internacional e no ohm internacional, tal como foram definidos no Congresso de Chicago de 1903, e no volt internacional que passou a ser definido como a fracção 1/1,01830 da força electromotriz da pilha Weston.

A decisão, aceitável de início, foi desde cedo objecto de reparos, na medida em que iam sendo detectadas diferenças entre os padrões escolhidos e os respectivos valores teóricos; porém, só foi revista vinte e cinco anos depois, em 1933, na 8ª CGPM.

O Comité Consultivo de Electricidade assim o recomendou, e ficou previsto que em 1940 se faria a substituição das unidades internacionais por unidades absolutas. Porém, devido à conflagração mundial, isso só viria a acontecer em 1948 na 9ª CGPM.

A intervenção de 1933 foi possível pelo facto de na 6ª CGPM, em 1921, ter ficado decidido alargar a competência do BIPM ao campo das unidades eléctricas e, nessa ordem de ideias, ter sido criado, na sessão seguinte (7ª CGPM-1927), o Comité Consultivo de Electricidade, CCE.

Medições rigorosas, de comparação entre as unidades internacionais e as absolutas, especialmente de intensidade de corrente e de resistência, feitas nos principais laboratórios: BIPM, IEN, PTB, NPL, NBS, IMM e ETL, conduziram aos valores médios seguintes:

$$\begin{aligned} 1 \text{ ampere internacional} &= 0,999\ 85 \text{ amperes absolutos} \\ 1 \text{ ohm internacional} &= 1,000\ 49 \text{ ohms absolutos} \end{aligned}$$

A partir destes dois valores, e tendo em vista a relação analítica entre tensão, intensidade de corrente e resistência eléctricas, o Comité Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) estabeleceu em 1946 os seguintes factores básicos de conversão:

$$\begin{aligned} 1 \text{ ohm internacional} &= 1,000\ 49 \text{ ohms absolutos} \\ 1 \text{ volt internacional} &= 1,000\ 34 \text{ volts absolutos} \end{aligned}$$

Utilizando as fórmulas de relacionamento destas grandezas com as restantes, obtiveram-se ainda:

$$\begin{aligned} 1 \text{ coulomb internacional} &= 0,999\ 85 \text{ coulombs absolutos} \\ 1 \text{ henry internacional} &= 1,000\ 49 \text{ henrys absolutos} \\ 1 \text{ farad internacional} &= 0,999\ 51 \text{ farads absolutos} \\ 1 \text{ watt internacional} &= 1,000\ 19 \text{ watts absolutos} \end{aligned}$$

Esta informação era importante, porque tanto as resistências padrão, como os condensadores padrão, pontes e outro equipamento de precisão fabricados antes de 1948, vinham expressos em unidades internacionais e tiveram que ser corrigidos para as novas unidades.

As experiências de comparação entre as unidades internacionais e as absolutas foram realizadas, conforme se referiu, sobre o ohm e sobre o ampere; porém, quando se estabeleceram os factores básicos de conversão, figurou o volt em vez do ampere. Isso deveu-se à circunstância de o volt – materializado na pilha Weston, bem como o padrão do ohm, serem facilmente transportáveis e, desse modo, facilitarem as comparações internacionais.

3.2.5 - Sistema Giorgi (MKSA)

Em meados do século XIX as teorias mecanicistas pretendiam resolver todos os problemas científicos, por meio da sua tradução em conceitos mecânicos. Isso levou Maxwell a supor que com o sistema CGS as grandezas do Electromagnetismo, quer nas relações entre si, quer nas relações com as grandezas mecânicas, pudessem ser traduzidas pelo mesmo sistema de unidades base: o centímetro, o grama e o segundo.

Surgiram porém, inconvenientes de dois tipos: algumas unidades derivadas, ou eram extremamente grandes ou extremamente pequenas, face às necessidades da prática e, por outro lado, a expressão dimensional de outras unidades vinha distorcida. Por exemplo, a resistência eléctrica, no sistema EMCGS, era expressa em centímetros por segundo e a capacidade, no sistema ESCGS, era expressa em centímetros.

Por volta de 1901, o físico italiano G. Giorgi propôs uma alteração nas unidades de base do sistema CGS, de modo a resolver a questão das unidades com duplo significado. Assim, surgiu o sistema Giorgi (MKSA). Giorgi admitia que um sistema com base em unidades de comprimento, de massa e de tempo, seria próprio para exprimir apenas as relações entre as grandezas mecânicas e o tempo. Quando se pretendesse estender o sistema a outros ramos da Física, teria que se acrescentar, por cada ramo diferente, uma nova unidade de base. No que respeita às relações entre a mecânica, a electricidade e o magnetismo o sistema proposto por Giorgi tinha como unidades de base:

- 1 - o Metro Internacional, conservado pelo BIPM;
- 2 - o Quilograma Internacional, conservado pelo BIPM;
- 3 - o segundo, do tempo solar médio, tal como era definido pela União Astronómica Internacional;
- 4 - uma unidade electromagnética internacional, a escolher posteriormente.

Em 1935 esta proposta foi oficialmente aprovada (por unanimidade) pela Comissão Electrotécnica Internacional (IEC), na reunião de Bruxelas, mas sobre a escolha da quarta unidade houve muita controvérsia; só ao cabo de vários anos de reuniões e de discussões no Conselho Consultivo de Electricidade, foi escolhido o ampere, aliás, contra a opinião do próprio Giorgi, que preferia o ohm.

Convém recordar que em 1935, data da aprovação da proposta, ainda não estava tão generalizada a ideia da substituição das unidades eléctricas internacionais pelas absolutas; porém, quando em 1948 o sistema Giorgi, com a designação MKSA foi aprovado pela 9ª CGPM, foi-o já com o ampere absoluto, como quarta unidade de base e com a seguinte definição:

"o ampere é a intensidade de uma corrente constante que, mantida em dois condutores paralelos, rectilíneos, de comprimento infinito, de secção circular desprezável e colocados à distância de 1 metro um do outro no vazio, produziria entre estes condutores uma força igual a 2×10^{-7} N por metro de comprimento."

Antes de ser feita referência ao Sistema Internacional, actualmente em uso, e da que ele integrou praticamente, o sistema MKSA, parece conveniente fazer uma análise comparativa, deste com os sistemas anteriores, entre os quais o ESCGS e o EMCGS. O primeiro baseia-se na conhecida lei de Coulomb, da Electrostática e, o segundo, na lei de Coulomb, da Magnetostática. De acordo com essas leis, a força entre cargas eléctricas, e força entre supostas massas magnéticas, são dadas, respectivamente, por:

$$F = \frac{1}{\epsilon'} \cdot \frac{q q'}{d^2} \quad \text{e} \quad F = \mu \frac{m m'}{d^2}$$

em que q e q' são cargas eléctricas, m e m' massas magnéticas e ϵ' e μ , representam respectivamente, as características, eléctrica e magnética do meio.

A natureza destas últimas grandezas passou despercebida aos experimentadores iniciais, como Gauss e Maxwell, tendo sido então consideradas como constantes adimensionais. Por isso nos primeiros sistemas ESCGS e EMCGS surgiram anomalias dimensionais, como as que já foram referidas.

Se, na expressão representativa da lei de Coulomb da Electrostática, em vez da constante ϵ' figurar o quociente $\epsilon/a = \epsilon'$, vem

$$F = \frac{a q q'}{\epsilon d^2}$$

em que a é uma constante adimensional. Se se atribuir a essa constante o valor $1/4 \pi$ consegue-se a chamada *racionalização* da formulação resultante. Isto é, nos sistemas em que $a = 1$ as fórmulas contêm, em geral, o factor 4π , nomeadamente as que não estão relacionadas com situações geométricas ligadas à circunferência, ao círculo ou à esfera; enquanto que, fazendo $a = 1/4 \pi$, o factor 4π passa a estar presente, apenas, nestes últimos casos, o que é bem mais racional.

A aplicação das leis do Electromagnetismo mostra que, para um meio qualquer, as constantes ϵ e μ não são independentes mas estão ligadas pela seguinte relação:

$$v = \frac{k}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

em que v é a velocidade da onda electromagnética num meio de características ϵ e μ , e em que k é uma constante, dependente do sistema.

Mostrou a prática que quando o meio em que se realiza a experiência de Coulomb, deixa de ser o vazio, as forças eléctricas diminuem sempre e as forças magnéticas aumentam quase sempre. Isso levou a considerar, analiticamente, a influência do meio da seguinte forma:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad \text{e ainda} \quad \mu = \mu_0 \mu_r$$

em que ϵ_0 e μ_0 são as características do vazio, e ϵ_r e μ_r são as características do meio. Conforme recomendação da Comissão Electrotécnica Internacional (Publicação 60 206-1966) ϵ_0 e μ_0 - constantes universais - são designadas por, *constante eléctrica* e *constante magnética*, enquanto que ϵ_r e μ_r , adimensionais, são: a *permissividade relativa* e a *permeabilidade relativa*, respectivamente.

Na maior parte dos sistemas $k=1$, excepto nos chamados sistemas híbridos, isto é, sistemas para os quais se fez $\epsilon_0=1$ e, ao mesmo tempo, $\mu_0=1$. São eles, os sistemas de Gauss e de Heaviside-Lorentz, resultando este último da racionalização do primeiro.

Passando em revista os sistemas de unidades já referidos, a situação de cada um é em resumo:

Sistema ESCGS (não racionalizado)

Unidades fundamentais:

comprimento	1 cm
massa	1 g
tempo	1 s

$$a=1 \quad \epsilon_0 = 1 \quad \mu_0 = \frac{1}{c^2} = \frac{1}{9 \times 10^{20}} \quad k=1$$

Sistema EMCGS (não racionalizado)

Unidades fundamentais:

comprimento	1 cm
massa	1 g
tempo	1 s

$$a=1 \quad \epsilon_0 = \frac{1}{c^2} = \frac{1}{9 \times 10^{20}} \quad \mu_0 = 1 \quad k=1$$

Sistema de Gauss

Unidades fundamentais:

comprimento	1 cm
massa	1 g
tempo	1 s

$$a=1 \quad \epsilon_0 = 1 \quad \mu_0 = 1 \quad k = c = 3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$$

Sistema Prático (eléctrico)

Unidades fundamentais:

resistência	1 $\Omega = 10^9$ UEMCGS
intensidade de corrente	1 A = 10^{-1} UEMCGS
tempo	1 s

$$a=1 \quad \epsilon_0 = \frac{1}{c^2} = \frac{1}{9 \times 10^9} \quad \mu_0 = 1 \quad k = 1$$

(a unidade de comprimento do sistema é igual a 10^9 cm)

Sistema de Heaviside- Lorentz

Unidades fundamentais:

comprimento	1 cm
massa	1 g
tempo	1 s
$a = 1/4\pi$	$\epsilon_0 = 1$
$\mu_0 = 1$	$k = c = 3 \times 10^{10}$ cm/s

Sistema Giorgi (MKSA racionalizado)

Unidades fundamentais:

comprimento	1 m
massa	1 kg
tempo	1 s
$a = 1/4\pi$	$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7} c^2} = \frac{1}{36\pi \times 10^9} \text{ Fm}^{-1}$
$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$	$k = 1$

De acordo com as ideias de G. Giorgi, atrás referidas, ϵ_0 e μ_0 já não são consideradas constantes adimensionais, mas sim grandezas constantes cujas dimensões são: farad por metro, para ϵ_0 e henry por metro, para μ_0 .

Sistema Internacional (SI)

Unidades fundamentais

comprimento	1 m
massa	1 kg
tempo	1 s
intensidade de corrente	1 A (ampere)
temperatura termodinâmica	1 K (kelvin)
quantidade de matéria	1 mol (mole)
intensidade luminosa	1 cd (candela)

$$a = 1/4\pi \quad \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7} c^2} = \frac{1}{36\pi \times 10^9} \text{ F.m}^{-1} \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H.m}^{-1} \quad k = 1$$

Como pode observar-se, o Sistema Internacional – a estudar em pormenor a seguir – engloba todas as unidades fundamentais do sistema anterior.

Convém anotar que na prática corrente, à velocidade de uma onda electromagnética no vazio, c , é atribuído o valor aproximado de 3×10^8 m/s, mas em aplicações de grande rigor, como por exemplo na medição absoluta de grandezas, considera-se já o seu valor efectivo, ou seja: $c = 299\,792\,458$ m/s (17ª CGPM - 1983).

$k = 1$

não são
imensões

AS UNIDADES FUNDAMENTAIS DO SISTEMA INTERNACIONAL
- ASPECTOS HISTÓRICOS E TÉCNICOS -

4

O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)

4.1 - ANTECEDENTES

Em 1948, a 9ª CGPM resolveu que fosse aberto um inquérito para auscultar a opinião dos meios científicos, técnicos e pedagógicos de inúmeros países, sobre o estabelecimento de um novo sistema de unidades de medida, que pudesse merecer a aprovação de todos os países signatários da Convenção do Metro.

Em 1954, a 10ª CGPM, com base nas respostas do inquérito anterior, decidiu adoptar como unidades de base do sistema a estabelecer: o metro, o quilograma, o segundo, o ampere, o grau kelvin e a candela.

Em 1960, a 11ª CGPM abandonou a definição do metro com base no protótipo de 1889 e fixou uma nova definição a partir do comprimento de onda de uma radiação do átomo de cripton 86. Esta mesma conferência ratificou ainda, a definição do segundo, ligando-o à duração do ano trópico. Foi também decidido dar ao novo sistema a designação de SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI), tendo ficado definidas as designações de doze prefixos, para a formação de múltiplos e de submúltiplos das unidades, em geral.

Em 1964, a 12ª CGPM, entre outros assuntos, acrescentou mais dois prefixos para a formação de submúltiplos: o fento (10^{-15}) e o atto (10^{-18}).

Em 1971, a 14ª CGPM estabeleceu a sétima unidade de base do SI: a mole.

Em 1975, a 15ª CGPM acrescentou mais dois prefixos para a formação de múltiplos: o peta (10^{15}) e o exa (10^{18}).

Em 1979, a 16ª CGPM redefiniu a candela, abandonando o padrão de platina à temperatura de solidificação e fixando-a em termos energéticos.

Em 1983, a 17ª CGPM, numa atitude decidida, sancionou a fixação – por convenção – do valor da velocidade da luz no vácuo e redefiniu o metro, ligando-o directamente ao segundo. Aliás, a intenção de fixar a velocidade da luz vem já da 15ª CGPM, em 1975.

Em 1991, a 19ª CGPM acrescentou mais quatro prefixos para a formação de múltiplos e de submúltiplos: o yotta (10^{24}), o zetta (10^{21}), o zepto (10^{-21}) e o yocto (10^{-24}).

4.2 - UNIDADES SI

De acordo com “O Sistema Internacional de Unidades (SI), 7ª edição, publicado pelo BIPM em 1998, há duas classes de unidades:

- unidades de base, em número de sete;
- unidades derivadas,

formando um conjunto coerente.

4.2.1 - UNIDADES DE BASE

As unidades de base do SI são: o metro, o quilograma, o segundo, o ampere, o kelvin, a mole e a candela. Os seus símbolos, bem como as grandezas a que correspondem, estão representados no quadro que se segue:

UNIDADES DE BASE

Grandeza	Nome da unidade	Símbolo
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Intensidade de corrente eléctrica	ampere	A
Temperatura termodinâmica	kelvin	K
Quantidade de matéria	mole	mol
Intensidade luminosa	candela	cd

4.2.2 - UNIDADES DERIVADAS

As unidades derivadas do SI exprimem-se por meio de relações algébricas, em função das unidades de base. Da mesma forma se exprimem os seus símbolos. Algumas unidades derivadas receberam nomes e símbolos especiais, que também são usados em combinação com os símbolos das unidades de base, para exprimir unidades de outras grandezas.

As unidades SI, que se exprimem directamente em função das unidades de base, são:

UNIDADES DERIVADAS

Grandeza	Nome da unidade	Símbolo
Área	metro quadrado	m ²
Volume	metro cúbico	m ³
Velocidade	metro por segundo	m/s
Aceleração	metro por segundo quadrado	m/s ²
Número de onda	inverso do metro	m ⁻¹
Densidade, densidade mássica	quilograma por metro cúbico	kg/m ³
Volume específico	metro cúbico por quilograma	m ³ /kg
Densidade de corrente	ampere por metro quadrado	A/m ²
Intensidade de campo magnético	ampere por metro	A/m
Concentração (de quantidade de matéria)	mole por metro cúbico	mol/m ³
Luminância	candela por metro quadrado	cd/m ²
Índice de refração	um (o número)	1

As unidades SI derivadas, com nomes e símbolos especiais, constam do quadro que se segue:

UNIDADES DERIVADAS (com nomes e símbolos especiais)

Grandeza	Nome da unidade	Símbolo	Dimensão
Ângulo plano	radiano	rad	$m \cdot m^{-1} = 1$
Ângulo sólido	esterradiano	sr	$m^2 \cdot m^{-2} = 1$
Frequência	hertz	Hz	s^{-1}
Força	newton	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Pressão, tensão mecânica	pascal	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Trabalho, energia, quantidade de calor	joule	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Potência, Fluxo Radiante	watt	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Quantidade de electricidade	coulomb	C	s. A
Potencial eléctrico, diferença de potencial, força electromotriz	volt	V	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Capacidade eléctrica	farad	F	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Resistência eléctrica	ohm	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Condutância eléctrica	siemens	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Fluxo magnético	weber	Wb	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Densidade de Fluxo Magnético, Indução Magnética	tesla	T	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Indutância	henry	H	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Temperatura Celsius	grau Celsius	$^{\circ}C$	K
Fluxo luminoso	lumen	lm	cd. (sr)
Iluminação	lux	lx	$m^{-2} \cdot cd$ (sr)
Actividade	becquerel	Bq	s^{-1}
Dose absorvida	gray	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$
Equivalente de dose	sievert	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$

Obs.1 – Na Norma Portuguesa Provisória P-77 (Unidades Fotométricas), publicada em Abril de 1955, aparece a grafia *estere-radiano* que, embora traduzindo melhor a pronúncia corrente da palavra, veio posteriormente a ser substituída por *esterradiano*.

Obs. 2 – Até à 20ª CGPM, em 1995, os ângulos plano e sólido eram considerados como unidades especiais designadas como Unidades Suplementares. A partir dessa reunião passaram a ser consideradas Unidades Derivadas, continuando a usar-se as designações e os símbolos respectivos, os quais não devem figurar na expressão dimensional em termos das Unidades de Base.

As restantes unidades SI exprimem-se em função das unidades base e das unidades com nomes e símbolos especiais:

4.2.3 - UNIDADES DE GRANDEZAS SEM DIMENSÃO, GRANDEZAS DE DIMENSÃO 1

Certas grandezas são definidas como a relação entre duas grandezas da mesma espécie. A unidade de tais grandezas é, necessariamente, uma unidade derivada coerente com as outras unidades SI, e assim sendo, formada pelo quociente de duas unidades SI idênticas; esta unidade pode também ser expressa pelo número 1. Igualmente, a unidade SI de todas as grandezas que tenham o produto dimensional igual a 1, é 1. Exemplos destas grandezas são: o índice de refração, a permeabilidade relativa, o coeficiente de fricção, etc.

Outras grandezas com unidade 1 mas que incluem um “número característico” que representa uma contagem, tal como o número de moléculas, o número de degenerescência (de níveis energéticos), ou funções de partição em estatística termodinâmica, são descritos como adimensionais ou de dimensão 1, e têm a unidade coerente SI de 1. Estas dimensões são, em geral, expressas apenas por um número, sem se explicitar a unidade 1. No entanto, em alguns casos especiais é-lhe dado um nome, como por exemplo, radiano, esterradiano ou neper.

4.3 - MÚLTIPLOS E SUBMÚLTIPLOS

Para a formação de múltiplos e de submúltiplos das diversas unidades, dispõe-se (depois de 1991) de uma lista de vinte prefixos, aplicáveis, às unidades do SI.

nsão

= 1

$\cdot 10^{-2} = 1$

s^{-2}

$\cdot s^{-2}$

$\cdot s^{-2}$

$\cdot s^{-3}$

$s^{-3} \cdot A^{-1}$

$\cdot s^{-4} \cdot A^2$

$\cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$

$\cdot s^{-3} \cdot A^2$

$s^{-2} \cdot A^{-1}$

A^{-1}

$s^{-2} \cdot A^{-2}$

)

(sr)

publicada
melhor a
ano.

PREFIXOS

Factor de multiplicação	Nome	Símbolo	Factor de multiplicação	Nome	Símbolo
10	deca	da	10 ⁻¹	deci	d
10 ²	hecto	h	10 ⁻²	centi	c
10 ³	quilo	k	10 ⁻³	mili	m
10 ⁶	mega	M	10 ⁻⁶	micro	μ
10 ⁹	giga	G	10 ⁻⁹	nano	n
10 ¹²	tera	T	10 ⁻¹²	pico	p
10 ¹⁵	peta	P	10 ⁻¹⁵	femto	f
10 ¹⁸	exa	E	10 ⁻¹⁸	atto	a
10 ²¹	zetta	Z	10 ⁻²¹	zepto	z
10 ²⁴	yotta	Y	10 ⁻²⁴	yocto	y

Nota – Na formação dos prefixos não é admitida a justaposição de dois prefixos. Por exemplo: 1nm, e não 1mμm. Os prefixos não podem ser escritos isolados, mas sempre ligados a uma unidade, isto é, sem haver espaço entre o símbolo da unidade e o do prefixo. O agrupamento formado pelo símbolo do prefixo ligado ao símbolo da unidade constitui um novo símbolo, inseparável, que pode ser elevado a uma potência de expoente positivo ou negativo e mesmo combinado com outro símbolo de unidade, de forma a originar compostos de símbolos de unidades.

$$\text{Ex: } 1 \text{ V/cm} = (1\text{V})/(10^{-2} \text{ m}) = 10^2 \text{ V/m}$$

$$1 \mu\text{s}^{-1} = (10^{-6} \text{ s})^{-1} = 10^6 \text{ s}^{-1}$$

4.4 - ESCRITA DE NOMES E DE SÍMBOLOS DAS UNIDADES

Os princípios gerais para a escrita de números e símbolos das unidades foram propostos, em 1948, pela 9ª CGPM e adoptados depois pela ISO/TC-12 (ISO 31 – Grandezas e Unidades):

- A parte inteira de um número deve ser separada da parte decimal, por uma vírgula ou ainda por um ponto (à maneira anglo-saxónica);
- Os números com quatro ou mais algarismos devem ser separados em grupos de três, de um lado e de outro da vírgula, por um espaço e não por um ponto ou por uma vírgula;
- Para escrever (por extenso) números muito grandes usa-se a chamada regra dos 6N, que se exprime: $10^{6N} = N$ ilião
 Ex: $10^{12} = \text{bilião}$ (N = 2), $10^{18} = \text{trilião}$ (N = 3)
 É, no entanto, preferível escrever a própria potência de dez.

- Os nomes das unidades são considerados palavras comuns e, portanto, são escritos com minúscula, mesmo que se trate de nomes de pessoas. Para fazer o plural é normal o acrescento de um *s*, excepto em nomes terminados por *s*, *x* ou *z*.
Ex.: pascal, pascals. Porém, quando se trate de uma unidade composta só a segunda vai para o plural.
Ex.: wathhora, wathhoras; mas se os dois nomes são separados por traço, vão ambos para o plural. Ex.: coulombs-volts.
- Quando uma unidade é o produto de outras duas, os seus nomes separam-se por um traço, por exemplo pascal–segundo, mas há algumas excepções consagradas pelo uso, por exemplo, wathhora.
- Quando uma unidade é o quociente de outras duas, os nomes são escritos separados pela preposição "por". Ex.: metro por segundo e nunca m/segundo, por não se dever associar um nome com um símbolo.
- O símbolo de uma unidade só deve empregar-se a seguir a um valor numérico, expresso em algarismos e separado dele por um intervalo.
- Os símbolos das grandezas devem ser impressos em itálico, enquanto que os símbolos das unidades, em letra direita.
Ex.: *m* (símbolo da grandeza massa), kg (símbolo da unidade).
- Os símbolos das unidades são formados, em geral, por letras minúsculas; só os que derivam de nomes de pessoas terão letra maiúscula. Ex.: kg (quilograma), V (volt).
- Os símbolos não têm plural e não devem ser seguidos de ponto final.
- Os símbolos de unidades que são quociente de outras unidades, apenas devem ter uma só barra oblíqua. Por exemplo m/s^2 e $m \cdot s^{-2}$ estão correctos, já não estando $m/s/s$. Outro exemplo: $m \cdot kg/(s^2 \cdot A)$, ou $m \cdot kg \cdot s^{-2} A^{-1}$, mas não $m \cdot kg/s^2 / A$.
- Nos símbolos de unidades que são produto de outros símbolos, devem estes ser separados por pontos, ao nível da base das letras; pontos que poderão ser suprimidos se daí não resultar perigo de confusão.

4.5 - GRANDEZAS, SÍMBOLOS E DIMENSÕES

A tabela seguinte contém os símbolos representativos das grandezas (em *itálico*) e também a respectiva dimensão, no SI.

Grandeza	Símbolo	Dimensão	Grandeza	Símbolo	Dimensão
Comprimento	<i>L</i>	L	Viscosidade cinemática	<i>ν</i>	L ² T ⁻¹
Comprimento de onda	<i>λ</i>	L	Intensidade de corrente eléctrica	<i>I</i>	I
Número de onda	<i>σ</i>	L ⁻¹	Força electromotriz, Tensão, d. d. p.	<i>U</i>	L ² M T ⁻³ I ⁻¹
Área	<i>A</i>	L ²	Resistência	<i>R</i>	L ² M T ⁻³ I ⁻²
Secção eficaz	<i>σ</i>	L ²	Intensidade de campo eléctrico	<i>E</i>	L M T ⁻³ I ⁻¹
Volume	<i>V</i>	L ³	Condutância	<i>G</i>	L ⁻² M ⁻¹ T ³ I ²
Ângulo plano	<i>α</i>	A	Carga eléctrica	<i>Q</i>	T I
Ângulo sólido	<i>Ω</i>	Ω	Capacidade	<i>C</i>	L ⁻² M ⁻¹ T ⁴ I ²
Massa	<i>M</i>	M	Indutância	<i>L</i>	L ² M T ⁻² I ⁻²
Massa atómica	<i>M_a</i>	M	Fluxo magnético	<i>Φ</i>	L ² M T ⁻² I ⁻¹
Massa volúmica	<i>ρ</i>	L ⁻³ M	Densidade de Fluxo Magnético, Indução	<i>B</i>	M T I
Concentração	<i>ρ_B</i>	L ⁻³ M	Campo magnético	<i>H</i>	L ⁻¹ I
Tempo	<i>T</i>	T	Força magnetomotriz	<i>F</i>	I
Frequência	<i>F</i>	T ⁻¹	Temperatura	<i>T</i>	θ
Velocidade	<i>V</i>	L T ⁻¹	Entropia, Cap. térmica	<i>S</i> <i>C</i>	L ² M T ⁻² θ ⁻¹
Velocidade angular	<i>ω</i>	T ⁻¹ A	Condutividade térmica	<i>λ</i>	L M T ⁻³ θ ⁻¹
Velocidade angular	<i>ω</i>	T ⁻¹ A	Condutividade térmica	<i>λ</i>	L M T ⁻³ θ ⁻¹
Aceleração	<i>A</i>	L T ⁻²	Actividade	<i>A</i>	T ⁻¹
Aceleração angular	<i>α</i>	T ⁻² A	Exposição	<i>X</i>	TM ⁻¹ I

(Continuação)

Grandeza	Símbolo	Dimensão	Grandeza	Símbolo	Dimensão
Força	F	$L M T^{-2}$	Dose absorvida	D	$L^2 T^{-2}$
Trabalho, Energia	W	$L^2 M T^{-2}$	Quantidade de matéria	n	N
Momento de força	M	$L^2 M T^{-2}$	Intensidade luminosa	I	J
Intensidade energética	I	$L^2 M T^{-3} \Omega^{-1}$	Fluxo luminoso	Φ	$J \Omega$
Potência	P	$L^2 M T^{-3}$	Iluminação, Iluminância	E	$L^{-2} J \Omega$
Pressão, Tensão	p σ	$L^{-1} M T^{-2}$	Brilho, Luminância	L	$L^{-2} J$
Viscosidade dinâmica	ν	$L^{-1} M T^{-1}$			

4.6 - DEFINIÇÕES DAS UNIDADES

As unidades de base foram definidas em reuniões da CGPM, cujos números de ordem e data serão indicados, para cada caso.

As unidades derivadas devem ser definidas em função das unidades de base.

4.6.1 - UNIDADES DE BASE

metro (m) Unidade de comprimento, é o comprimento do trajecto percorrido pela luz no vazio, durante um intervalo de tempo de 1/299 792 458 do segundo. (17ª. CGPM - 1983, Resolução A).

quilograma (kg) Unidade de massa, é igual à massa do protótipo internacional do quilograma. (1ª CGPM - 1889, ratificado na 3ª CGPM - 1901, página 70 das actas).

segundo (s) Unidade de tempo, é a duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiper finos do estado fundamental do átomo de césio 133. (13ª CGPM - 1967, Resolução 1).

ampere (A) Unidade de intensidade de corrente eléctrica, é a intensidade de uma corrente constante que, mantida em dois condutores paralelos, rectilíneos, de comprimento infinito, de secção circular desprezável e colocados à distância de 1 metro um do outro, no vazio, produziria entre estes condutores uma força igual a 2×10^{-7} N por metro de comprimento. (9ª. CGPM-1948, Resolução 7).

kelvin (K) Unidade de temperatura termodinâmica, é a fracção $1/273,16$ da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água. (13ª CGPM-1967, Resolução 4).

O ponto triplo de uma substância simples é um conjunto de valores bem definidos da temperatura e da pressão, para os quais as fases sólida, líquida e gasosa da substância podem coexistir em quantidades arbitrárias.

mole (mol) Unidade de quantidade de matéria, é a quantidade de matéria de um sistema contendo tantas entidades elementares quantos os átomos que existem em $0,012$ kg de carbono 12.

Quando se utiliza a mole, as entidades elementares devem ser especificadas e podem ser: átomos, moléculas, iões, electrões, outras partículas ou agrupamentos especificados de tais partículas (14ª CGPM-1971, Resolução 3).

candela (cd) Unidade de intensidade luminosa, é a intensidade luminosa, numa direcção dada, de uma fonte que emite uma radiação monocromática com a frequência de 540×10^{12} Hz e cuja intensidade nessa direcção é $1/683$ watt por esterradiano. (16ª CGPM-1979, Resolução 3).

4.6.2 - UNIDADES DERIVADAS

radiano (rad) Unidade de ângulo plano, é o ângulo plano compreendido entre dois raios que, na circunferência de um círculo, intersectam um arco de comprimento igual ao raio desse círculo.

esterradiano (sr) Unidade de ângulo sólido, é o ângulo sólido que, tendo o vértice no centro de uma esfera, intersecta na superfície desta uma área igual à de um quadrado tendo por lado o raio da esfera.

metro quadrado (m²) Área de um quadrado com 1 m de lado.

metro cúbico (m³) Volume de um cubo com 1 m de aresta.

hertz (Hz) Frequência de um fenómeno periódico cujo período é 1 s.

newton (N) - Força que comunica a um corpo com a massa de 1 kg, uma aceleração de 1 m/s^2 .

joule (J) - Trabalho produzido pela força de 1 N, cujo ponto de aplicação se desloca de 1 m, na direcção da força.

io 1/273,16 da
olução 4).

bem definidos
1 da substância

matéria de um
tem em 0,012

pecificadas e
agrupamentos

inosa, numa
frequência de
esterradiano.

entre dois
to igual ao

o vértice
quadrado

ação se

watt (W) - Potencia de um sistema energético no qual é transferida, uniformemente, a energia de 1 J durante 1 s.

Volt-ampere (VA), (**VAr**), (**VAR**) Nomes especiais do watt, para, em relação a uma corrente alternada exprimir as potências, aparente e reactiva, respectivamente.

pascal (Pa) Tensão (ou pressão) que actuando sobre uma superfície plana de 1 m^2 exerce sobre ela a força total de 1 N.

pascal-segundo (Pa.s) Viscosidade dinâmica de um fluido, tal que, sob uma tensão tangencial constante e igual a 1 N por metro quadrado, a velocidade adquirida pelo fluido diminui à razão de 1 metro por segundo, por metro de afastamento na direcção perpendicular ao plano de deslizamento. O submúltiplo 10^{-1} do pascal-segundo é o **poise (P)**.

metro quadrado por segundo (m^2/s) - Viscosidade cinemática de um fluido cuja viscosidade dinâmica é 1 Pa.s e cuja massa específica é $1 \text{ kg}/\text{m}^3$. O submúltiplo 10^{-4} do metro quadrado por segundo é designado **stokes (St)**.

volt (V) - Diferença de potencial eléctrico entre dois pontos de um condutor percorrido por uma corrente constante de 1 A, quando a potência dissipada no condutor, entre estes pontos, é igual a 1 W.

ohm (Ω) Resistência eléctrica entre dois pontos de um condutor, quando a diferença de potencial, constante, de 1 V, aplicada entre esses dois pontos, produz no condutor uma corrente de 1 A, não sendo o condutor sede de qualquer força electromotriz.

coulomb (C) - Quantidade de electricidade (ou carga eléctrica) transportada, num segundo, pela corrente de 1 A. Para exprimir a carga eléctrica de acumuladores utiliza-se, particularmente, o **ampere-hora (A h)**. $1 \text{ Ah} = 3\,600 \text{ C}$.

volt por metro (V/m) - Intensidade de um campo eléctrico que exerce uma força de 1 N sobre um corpo carregado com a quantidade de electricidade de 1 C.

siemens (S) - Condutância eléctrica de um condutor com a resistência eléctrica de 1Ω ($1 \text{ S} = 1 \Omega^{-1}$).

farad (F) - Capacidade de um condensador eléctrico entre cujas armaduras há uma diferença de potencial 1 V quando está carregado com a quantidade de electricidade de 1 C.

henry (H) - Indutância eléctrica de um circuito fechado, no qual se produz a força electromotriz de 1 V quando a corrente eléctrica que o percorre varia, uniformemente, à razão de 1 A por segundo.

weber (Wb) Fluxo de indução magnética que, atravessando um circuito de uma só espira, produz nele uma força electromotriz de 1 V, quando se anula por decréscimo uniforme com a duração de 1 s.

tesla (T) - Indução magnética uniforme que, disposta perpendicularmente a uma superfície plana de 1 m^2 produz através dela, um fluxo magnético total de 1 Wb.

ampere por metro (A/m) - Intensidade do campo magnético produzido no vazio, por um condutor rectilíneo, de comprimento infinito e de secção desprezável, percorrido pela corrente de 1 A, em qualquer ponto de uma circunferência com o perímetro de 1 m, centrada com o condutor e cujo plano lhe seja perpendicular.

ampere (A) - Força magnetomotriz produzida ao longo de uma linha fechada qualquer, que inclua, uma única vez, um condutor percorrido pela corrente eléctrica de 1 A. Esta unidade foi anteriormente designada por **ampere-espira**.

grau Celsius ($^{\circ}\text{C}$) A temperatura Celsius, t , é definida pela diferença $t = T - T_0$, entre duas temperaturas termodinâmicas, T e T_0 , sendo $T_0 = 273,15 \text{ K}$. Para exprimir um intervalo ou uma diferença de temperaturas, o grau Celsius é igual ao kelvin. A designação grau Celsius, em substituição de grau centígrado ou grau centesimal, foi aprovada na 9ª CGPM, em 1948.

joule por kelvin (J/K) Unidade de capacidade térmica ou de entropia. É a entropia de um sistema homogéneo e isotrópico, cuja temperatura aumenta de 1 K quando recebe uma quantidade de calor igual a 1 J.

joule por quilograma-kelvin ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) Capacidade térmica de massa, ou entropia de massa, de um sistema homogéneo e isotrópico, cuja temperatura aumenta de 1 K quando se lhe fornece calor à razão de 1 J por quilograma de massa.

watt por metro-kelvin ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) Condutividade térmica de um corpo homogéneo e isotrópico no qual se verifica um gradiente térmico de 1 K por metro, quando a densidade de fluxo de calor é igual a 1 W por metro quadrado.

becquerel (Bq) Actividade de um núclido radioactivo para o qual o número de transições espontâneas por segundo é igual a 1. Na prática, é usado o **curie**, cujo número de transições espontâneas por segundo é igual a $3,7 \cdot 10^{10}$.

coulomb por quilograma (C/kg) Exposição a uma radiação tal que a carga de todos os iões de um mesmo sinal é de 1 C; admitindo que os electrões (negativos ou positivos), libertados pelos fotões, de maneira uniforme, na massa de ar de 1 kg, ficam completamente retidos na massa de ar. A exposição, assim definida, respeita apenas às radiações X e γ . Na prática é usado o **roentgen** ($1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$).

sievert (Sv) Unidade de equivalente de exposição. É uma designação especial do **coulomb por quilograma**. Entende-se por *equivalente de exposição*, a grandeza definida por, $H = Q.N.D$ em que Q é o factor de qualidade, N é o factor estipulado pela Comissão Internacional de Protecção Radiológica - ambos dimensionais, e D é a exposição (dose). (16ª CGPM - 1979).

gray (Gy) Energia (dose) absorvida por quilograma de massa do material sobre o qual incide uma radiação ionizante que comunica, de maneira contínua, a energia de 1 J. Designa-se por **rad** o submúltiplo 10^{-2} do **gray**.

lúmen (lm) Fluxo luminoso emitido num ângulo sólido de 1 sr, por uma fonte pontual uniforme com a intensidade luminosa de 1 cd, situada no vértice do ângulo.

lux (lx) Iluminação de uma superfície que recebe, uniformemente distribuído, o fluxo luminoso de 1 lm por metro quadrado.

candela por metro quadrado (cd/m^2) Luminância de uma fonte cuja intensidade luminosa é 1 cd e cuja área é $1 m^2$.

4.7 - UNIDADES NÃO PERTENCENTES AO SI

Se bem que deva haver sempre preferência pelo uso das unidades SI, há situações consagradas pelo uso e pela história da cultura humana, que levaram a aceitar algumas unidades fora do Sistema, como por exemplo as unidades de tempo. No seu conjunto constam das tabelas que se seguem e que foram aprovadas pelo CIPM em 1996.

Nome	Símbolo	Valor (SI)
minuto	min	1 min = 60 s
hora	h	1 h = 60 min = 3 600 s
dia	d	1 d = 24 h = 86 400 s
grau	°	1° = ($\pi/180$) rad
minuto	'	1' = (1/60)° = ($\pi/10\,800$) rad
segundo	''	1'' = (1/60)' = ($\pi/648\,000$) rad
litro	l, L	1 l = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
tonelada	t	1 t = 10 ³ kg
neper	Np	1 Np = 1
bel	B	1 B = ½ ln 10 Np

Obs 1 – O neper é usado para exprimir quantidades logarítmicas tais como níveis de campo, de potência, de pressão sonora, de atenuação. É coerente com o SI mas não foi ainda adoptado como unidade pela CGPM.

As unidades seguintes apresentam valores determinados pela experiência e que não são conhecidos com exactidão.

Nome	Símbolo	Valor (SI)
eléctron-volt	eV	1 eV = 1,60217733(49) × 10 ⁻¹⁹ J
unidade unificada de massa atómica	u	1 u = 1,6605402(10) × 10 ⁻²⁷ kg
unidade astronómica	ua	1 ua = 1,49597870691(30) × 10 ¹¹ m

Obs 2 – A unidade unificada de massa atómica é igual a 1/12 da massa de um átomo livre do núclido ¹²C em repouso, e no estado fundamental. No campo da bio-química esta unidade é também chamada *dalton*, com o símbolo Da.

Na tabela seguinte figuram unidades correntemente aceites para satisfazer necessidades e interesses comerciais, legais e científicos especializados. Em cada domínio em que estas unidades forem usadas deve ser definida a sua relação com o SI.

Nome	Símbolo	Valor (SI)
milha náutica		1 milha náutica = 1852 m
nó		1 nó = 1 m.n. por hora = (1852/3600) m/s
are	a	1 a = 1 dam ² = 10 ² m ²
hectare	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
bar	bar	1 bar = 0,1 Mpa = 100 kPa = 1000 hPa = 10 ⁵ Pa
ångström	Å	1 Å = 0,1 nm = 10 ⁻¹⁰ m
barn	b	1 b = 100 fm ² = 10 ⁻²⁸ m ²

Obs. 3 – A milha náutica e o nó não têm ainda símbolos reconhecidos internacionalmente. O barn é uma unidade usada em Física Nuclear para exprimir áreas de secções transversais.

Obs. 4 – Para mais completa informação, em especial sobre o uso das unidades não pertencentes ao SI, consultar a publicação do BIPM *The International System of Units (SI) - 1998*, ao que se julga, disponível via Internet.

Nos primeiros quatro capítulos o Sistema Internacional de Unidades ficou delineado, tanto no que respeita ao seu conteúdo, como ao aspecto formal, como ainda, ao aspecto histórico. No entanto, cada uma das unidades de base do SI tem o seu próprio historial, o qual será, a seguir, objecto de estudo separado.

5

O METRO

5.1 - PRIMITIVAS REPRESENTAÇÕES

Conforme já foi referido, a primeira representação do Metro, na forma de uma barra de platina com o comprimento de 1 metro e a secção transversal de 25,3 mm × 4 mm, foi depositada nos Arquivos da República, em Paris, em Junho de 1799 e recebeu, por isso, a designação de Metro dos Arquivos.

Para servir como elemento de comparação apresentava alguns defeitos; além de a platina ser um metal macio e portanto sujeito a desgaste e a deformação, a comparação da distância entre os topos do Metro dos Arquivos, com a distância entre dois traços marcados numa régua (a aferir), não era cómoda de realizar.

Foi então conferido ao BIPM, como missão inicial, a participação no projecto e na construção de um novo protótipo do metro, não já de platina mas de uma liga mais dura, com 90% de platina e 10% de irídio, que representasse o mesmo comprimento do Metro dos Arquivos, à temperatura do gelo fundente. Além disso o novo protótipo seria ainda objecto de modificações, no que respeita à secção transversal e à forma de marcação do comprimento a representar. O novo Metro, designado por Metro Internacional, é uma régua, com cerca de 1020 mm de comprimento com secção em forma de X que pode inscrever-se num quadrado com 20 mm de lado, conforme a Fig. 5-1

Há que notar que a assimetria na forma da secção, relativamente à posição da face onde estão feitas as inscrições, é propositada. Tem por finalidade fazer coincidir esta face com a posição da chamada fibra neutra, ou seja a fibra, ou camada, que numa eventual flexão da régua, mantenha um comprimento invariável.

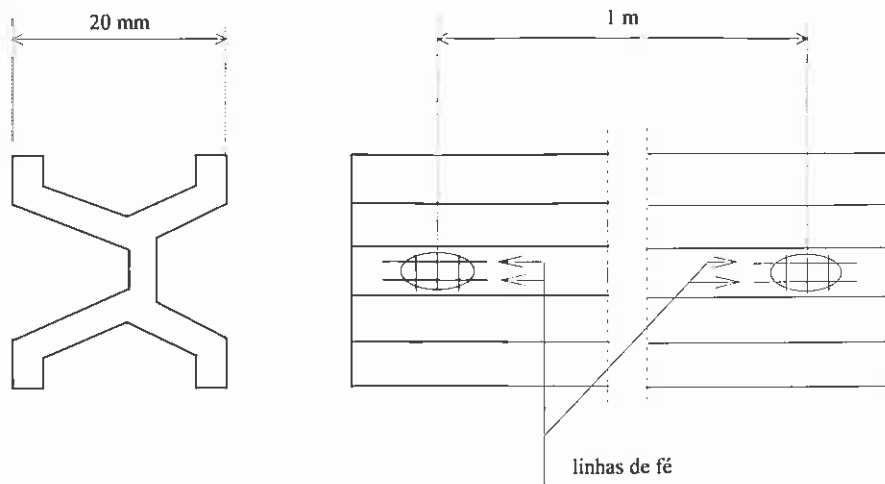


Fig. 5-1 O Metro Internacional

Numa das faces internas, a cerca de 1 cm de cada extremidade da régua, estão gravados três traços transversais e dois longitudinais; estes últimos denominados linhas de fé. A distância entre os traços transversais situados a meio de cada grupo de três, em cada uma das extremidades, na estreita zona limitada pelas linhas de fé, representa o metro.

Este novo protótipo foi apresentado na 1ª CGPM, em 1889 e de seguida depositado no BIPM. Foi-lhe dada a designação de Metro Internacional, e passou a ser representado pelo símbolo **M**, em caracteres góticos.

Entretanto, tinham sido construídos cerca de trinta protótipos do metro, todos idênticos, os quais nessa primeira reunião foram atribuídos, por sorteio, aos países que os haviam requisitado. Antes porém, foram numerados e comparados no BIPM, tanto entre si, como com o **M**.

A Portugal coube, por sorteio, o protótipo Nº 10.

Mais tarde, devido à grande procura de novos padrões representativos do metro, e dado o preço elevado da platina, procedeu-se no BIPM ao estudo de novas ligas, compostas principalmente por ferro e níquel (invar e semelhantes), cobertas, por electrólise, com uma camada de níquel.

Obtiveram-se assim padrões com melhores características, nomeadamente no que respeita a: preço de custo, coeficiente de dilatação e definição dos traços de referencia, conseguindo-se na verdade uma maior estabilidade.

A secção transversal destas régua (já não designadas por Metros protótipos mas apenas por Régua), apresenta a forma de um H em vez de um X, igualmente assimétrica no que respeita à posição da face de gravação dos traços, e com dimensões que permitem inscreve-la num quadrado com 24 mm de lado. A gravação das régua é contínua em todo o seu comprimento, e apresenta uma óptima definição.

Além da produção de protótipos e de régua, há ainda os fios geodésicos, com 24 metros, feitos de *invar*, e que submetidos a uma tracção prefixada, garantem medidas (a partir de 1975) com uma incerteza de 2 a 3 mm.

5.2 - AS IMPERFEIÇÕES DO METRO

Como toda a obra humana o Metro esteve, e está, sujeito a erros. Logo de início, quando se pretendia que fosse igual à décima milionésima parte do quarto do meridiano terrestre, resultou 0,2 mm mais curto.

Mesmo assim foi uma conquista notável, tendo em vista as dificuldades de medição de uma distância tão grande como a que lhe serviu de base: a distância entre Dunquerque e Barcelona. Aliás desse erro não resultaram consequências de monta, mas apenas o facto de o Metro não poder continuar a ser definido como previsto mas sim como sendo o comprimento de uma barra de platina iridiada, guardada em Sévres (localidade nos arredores de Paris, onde está instalado o BIPM)

A preocupação do rigor foi sempre uma constante na vida do BIPM; os coeficientes de dilatação eram determinados com precisão e os primeiros Metros eram acompanhados de termómetros. Por isso, logo de início, foi a termometria um dos assuntos mais profundamente estudados.

É curioso acompanhar a evolução desta preocupação. Em 1889 estabelecia-se que *o novo protótipo (o Metro Internacional) representaria, à temperatura do gelo fundente, a unidade métrica de comprimento*. Isto, não obstante outro pequeno erro cometido na passagem do Metro dos Arquivos para o Metro Internacional. Em 1927, na 7ª CGPM, foi-se mais longe, estabelecendo que: *A unidade de comprimento é o Metro, definido pela distância, a 0 °C, dos eixos de dois traços medianos inscritos sobre a barra de platina iridiada depositada no BIPM, estando a régua submetida à pressão atmosférica normal e sendo suportada por dois roletes com pelo menos 1cm de diâmetro, situados simetricamente no mesmo plano horizontal e distantes entre si de 571 mm*.

A referência aos roletes e às suas posições relativas, denota a preocupação com a flexão da barra; tendo a distância de 571 mm sido calculada de modo a reduzir ao mínimo a flexão resultante do peso próprio.

A partir de 1937 todos os protótipos que ficaram no BIPM e numerosos Metros nacionais, foram submetidos a polimento em toda a sua extensão, ficando os traços gravados com uma melhor definição.

Estabelecia a Convenção do Metro que houvesse verificações periódicas do conjunto dos Metros nacionais. A primeira começou em 1921 e prolongou-se por cerca de quinze anos. Na verdade tratou-se não de uma simples comparação mas também da detecção de um conjunto de problemas, cuja resolução muito fez progredir a metrologia dos comprimentos, em especial no que respeitou à determinação da dilatabilidade dos Metros protótipos. Os resultados definitivos só foram publicados em 1940.

Conforme já referido, em 1889 foi entregue aos representantes de Portugal o protótipo nº.10 do Metro Internacional. Ficou ao cuidado de um organismo nacional antecessor do Instituto Geográfico e Cadastral, que actualmente ainda o detém, embora o

controlo das unidades de comprimento tenha, já há muito, passado para organismos antecessores do actual Instituto Português da Qualidade.

Entre Novembro de 1935 e Janeiro de 1936 foram medidos no BIPM, o Metro nº 1 de Portugal, em conjunto com o nº 6, da Roménia, o nº 28, da U.R.S.S. e o nº 21, da Turquia.

No que respeita ao Metro nº 10, era a primeira vez que ia ser medido, depois de 1889, data em que fora entregue. Nessa medição de 1935/36, apresentava, em relação à medição primitiva uma diferença de $-0,24 \mu\text{m}$, depois de feita a correcção para referir as duas medidas a uma mesma temperatura.

5.3 - INSTRUMENTOS DE COMPARAÇÃO

Até à década de 50 a comparação entre dois metros ou duas régua métricas, era feita na base de dois microscópios, separados de cerca de 1 metro, e sob os quais se deslocava um carro onde eram fixados, lado a lado, os metros a comparar, (Fig. 5-2).

Este método foi tendo, ao longo dos anos, os seus aperfeiçoamentos, especialmente no que respeita à potência dos microscópios e ainda à possibilidade que lhes foi dada, de rodarem de 180 graus em torno dos respectivos eixos ópticos. Com este tipo de dispositivo era possível fazer comparações entre dois Metros com a precisão de $0,1 \mu\text{m}$.

Em 1952 o BIPM iniciou o estudo de um novo comparador, equipado com um tipo recente de microscópios designados *microscópios fotoelétricos*. Trata-se do *comparador fotoelétrico interferencial*, que permite um acerto da posição do eixo óptico do microscópio sobre os traços de referencia do Metro, com a precisão de 1 nm. O seu funcionamento será descrito mais adiante.

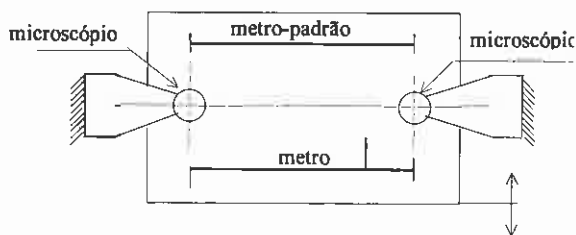


Fig. 5-2 Comparador de Metros

5.4 - O METRO DE 1960

Na 11ª CGPM, em 1960, o Metro foi definido como o comprimento igual a 1 650 763,73 comprimentos de onda no vazio, da radiação correspondente à transição entre os níveis $2p_{10}$ e $5d_5$ do átomo de cripton 86.

Ora, já em 1870 Maxwell escrevia: *A dimensão da Terra e o seu período de rotação, se bem que sejam considerados suficientemente constantes, relativamente aos meios de comparação do presente, poderão deixar de o ser por eventuais razões de ordem física. A Terra pode contrair-se, pelo arrefecimento, ou pode dilatar-se por acção da queda de meteoritos, ou pode o seu período de revolução variar lentamente, que continuará a ser ainda um planeta, como anteriormente.*

Mas uma molécula, por exemplo de hidrogénio, se, quer a sua massa, quer o seu período de vibração fossem alterados, pelo menos deixaria de ser uma molécula de hidrogénio.

Então, se queremos obter padrões de comprimento, de tempo e de massa, devemos procurá-los, não nas dimensões, no movimento ou na massa do nosso planeta, mas no comprimento de onda, no período de vibração e na massa absoluta dessas imperecíveis, inalteráveis e perfeitamente similares moléculas.

Estas afirmações, com mais de cem anos de idade, continuam perfeitamente actuais, sobretudo se se acrescentar à palavra *moléculas* a palavra *átomos*.

Antes porém de ter feito esta afirmação já Maxwell havia sugerido a escolha do comprimento de onda da luz amarela do sódio como padrão natural de comprimento; no entanto o desenvolvimento gradual da espectroscopia breve mostrou que se não tratava de uma única radiação mas de duas, com comprimentos de onda separados entre si por cerca da milésima parte do seu valor médio.

Pensou-se também na radiação verde do mercúrio natural, mas breve se verificou tratar-se de um grupo complexo de radiações vizinhas ocupando um intervalo de cerca de dez milésimas partes do comprimento de onda médio.

Em 1890 o físico norte-americano A. A. Michelson, descobriu a radiação vermelha do cádmio natural, cuja finura e cuja reprodutibilidade eram, na época, consideradas excepcionais.

Cabe aqui explicitar, que por finura se entende o quociente entre o intervalo de comprimentos de onda pelo qual a radiação se estende – já que não é possível, por razões adiante consideradas, limitar uma radiação a um único comprimento de onda – e o valor do comprimento de onda médio. A finura pode também ser referida pela largura a meia altura, expressa em ondas por metro, que o perfil espectral apresenta.

É oportuno inserir aqui um parêntesis para nele se esclarecer o significado de algumas expressões relativas às medições de grandezas e que irão surgindo no texto.

Reprodutibilidade de uma medição, segundo o Vocabulário de Metrologia Legal referido em 2.1, é o grau de concordância entre os resultados das medições de uma mesma grandeza, quando as medições individuais são efectuadas:

- segundo métodos diferentes, por meio de instrumentos de medição diferente
- por diferentes observadores, em diferentes laboratórios,
- após intervalos de tempo suficientemente longos em relação à duração de ur só medição, em diferentes condições usuais de emprego dos instrumentos utilizados.

O termo *reprodutibilidade* também é utilizado quando apenas alguns destes fact são diferentes, em medições individuais.

Com significado próximo da *reprodutibilidade* está a *repetibilidade*, que é o ; de concordância entre os resultados de medições sucessivas de uma mesma grand efectuadas pelo mesmo método, pelo mesmo observador, com os mesmos instrumento medição, no mesmo laboratório e em instantes sucessivos curtos.

Tanto uma como outra se estima com base na *incerteza*: quanto maior a *incert* tanto menores serão, quer a *reprodutibilidade*, quer a *repetibilidade*, e vice-versa. consequência de um maior número de fontes de erros aleatórios, a incerteza é em g maior na determinação da *reprodutibilidade* do que na da *repetibilidade*.

A incerteza da média aritmética de uma série de medições é expressa por $\pm t \cdot \sigma$, que σ é o desvio padrão da média aritmética da série de medições e t um factor (inteiro fraccionário), que condiciona a probabilidade – ou *nível de confiança* – de a medida grandeza se situar dentro da zona de incerteza – ou *intervalo de confiança*.

O desvio padrão da média aritmética de uma série de n medições é dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}$$

em que x_i é o resultado da medição de ordem i .

No caso da lei de distribuição normal, a correspondência entre os valores de t probabilidade P é a seguinte:

t = 3	→	P = 99,73 %	t = 1,5	→	P = 86,64 %
t = 2,5	→	P = 98,76 %	t = 1	→	P = 68,27 %
t = 2	→	P = 95,45 %			

Na literatura científica sobre medidas, aparece com frequência o valor numérico uma grandeza, seguido de: (1σ) ou (3σ) , ou ainda (1, ou 3, St. dev. – *desvio padro* indicando a incerteza com que foi obtido e consequentemente a probabilidade P de o va

se situar dentro da zona definida pela média aritmética dos resultados das medições, subtraída e acrescida do produto $t \cdot \sigma$, ou seja, dentro do *intervalo de confiança*.

Valor da grandeza = média aritmética $\pm t \cdot \sigma$

Voltando ao assunto das radiações previstas para a representação do Metro, há a acrescentar que o já referido Michelson, em 1892/1893, utilizando um interferómetro por ele criado e que transportou para o BIPM, mediu, com a colaboração de J. R. Benoit, o comprimento de onda da radiação vermelha do cádmio natural, a que atribuiu o valor de:

$$\lambda_{cd} = 6\,438,469\,6 \times 10^{-10} \text{ m}$$

no ar seco e a 15 °C, valor que foi em seguida confirmado, por diversas vezes.

Foi este comprimento de onda que, em 1927 serviu, por acordo internacional, para a definição do *angstrom*, convencionando-se que

$$\lambda_{cd} = 6\,438,469\,6 \text{ \AA}$$

Mercê dos trabalhos realizados por vários investigadores, foram sendo descobertas as causas físicas da complexidade das radiações ópticas. Por um lado um elemento natural é em geral uma mistura de vários isótopos, cujas radiações não coincidem exactamente. A radiação vermelha do cádmio parece simples por uma coincidência fortuita mas de facto não o é. Por outro lado as propriedades magnéticas do núcleo do átomo de certos isótopos conferem às radiações que emitem, uma estrutura designada por *hiper fina*. O padrão ideal será pois baseado na radiação de um isótopo puro (um mononúclido), com núcleo isento de magnetismo. Para isso deverá ter um número atómico Z par e um número de massa também par.

Um outro problema é o facto de, na pratica, as radiações apresentarem sempre uma largura espectral superior à que teoricamente se previa. A causa principal é o efeito Doppler: sempre que um átomo se aproxima do observador, o comprimento da onda recebida diminui, e sempre que se afasta, aumenta.

Ora os átomos num gás encontram-se submetidos aos movimentos devidos à agitação térmica; assim emitem radiações cuja frequência varia, consoante o sinal da componente da sua velocidade, relativamente à direcção do observador. Isso faz com que o comprimento de onda espectral se espalhe por uma banda, tanto mais larga quanto mais elevada for a temperatura e quanto mais leve for o átomo.

Admitindo que a variável aleatória, – velocidade do átomo de gás – tem distribuição normal, será de esperar para a radiação, um perfil espectral semelhante à curva de Gauss, centrada no comprimento de onda base.

Por volta de 1950, pouco tempo depois de ter sido possível fazer a separação dos isótopos, foram propostos três núclidos, pelos laboratórios IMM, NBS e PTB, para a produção de uma radiação padrão sem estrutura hiper fina: o cádmio 144 ($Z=48$), o mercúrio 198 ($Z=80$) e o cripton 84 ou 86 ($Z=36$).

Com o auxílio do interferómetro de Michelson, e do microscópio fotoeléctrico, o qual permite um acerto muito mais rigoroso dos traços extremos dos Metros, foram estudadas estas três radiações, tendo sido concluído, aliás em concordância com as opiniões de outros laboratórios, que a escolha deveria cair na radiação vermelha do cripton 86, a mais estreita das três radiações propostas

5.4.1 - O INTERFERÓMETRO DE MICHELSON

Em 1882 A. A. Michelson publicou um relato do seu **Refractómetro Interferencial**, designação mais tarde abreviada para **Interferómetro**, que serviu de modelo a formas posteriores de dispositivos para medição de deslocamentos, idênticos, mas mais sofisticados, com um grau de precisão muitíssimo superior ao dos dispositivos anteriores.

O seu princípio de funcionamento está representado no esquema seguinte:

F é a fonte de radiação monocromática, A e B são vidros planos inclinados de 45 graus relativamente à radiação incidente, sendo A semi-espelhado na face indicada. C é um espelho fixo, D é um espelho móvel paralelamente a si próprio, cujo deslocamento o interferómetro mede, e O é o observador, ou melhor, o dispositivo receptor.

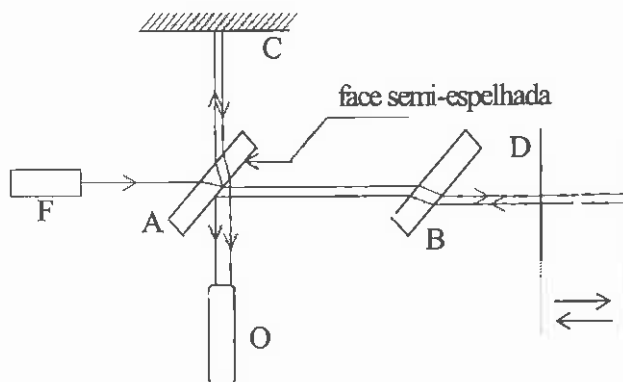


Fig. 5-3 O Interferómetro de Michelson

A radiação, saindo de F

atinge A e no semi-espelho subdivide-se em dois feixes: um segue para B, D e regressa através de B, sendo reflectido no semi-espelho para O; enquanto que o outro feixe reflectido pelo semi-espelho vai a C onde, atravessando A, é dirigido para O. Em O se reúnem os dois feixes e, conforme a diferença de fase com que chegam, assim o observador verá claro, escuro, ou uma situação intermédia.

Se D (na figura) se deslocar para a direita, aumenta o percurso do respectivo feixe, os ciclos de faixas de interferência negras e brancas sucedem-se, e são em geral contados por contador electrónico. Se forem em número de p , o deslocamento do espelho D será obtido pelo produto de p por $\lambda/2$, sendo λ o comprimento de onda da radiação. Quase sempre p tem uma parte fraccionária e, desprezando-a, o erro não é muito grande, devido à desproporção entre uma fracção de comprimento de onda e as distâncias a medir; no entanto há processos para avaliar a parte fraccionária.

Há também que anotar que a presença no interferómetro, do vidro B idêntico a A mas não espelhado; apenas serve para criar uma situação de igualdade no percurso dos dois feixes, obrigando cada um a atravessar um vidro, tanto na ida como na volta.

5.4.2 - O MICROSCÓPIO FOTOELÉCTRICO

Para se poder aproveitar a enorme precisão do interferómetro na medição dos protótipos do Metro e de outros calibres limitados por traços gravados em barra metálica, era preciso resolver primeiro o problema do posicionamento inicial e final do espelho móvel do interferómetro em relação a esses traços.

É certo que já antes de se usar o interferómetro, o acerto dos traços dos Metros a comparar, era feito com microscópios; mas a verdade é que esses traços, mesmo depois de, em 1937, as zonas que os continham terem sido especialmente polidas (com o fim de regularizar os contornos), são faixas com cerca de $8 \mu\text{m}$ de largura.

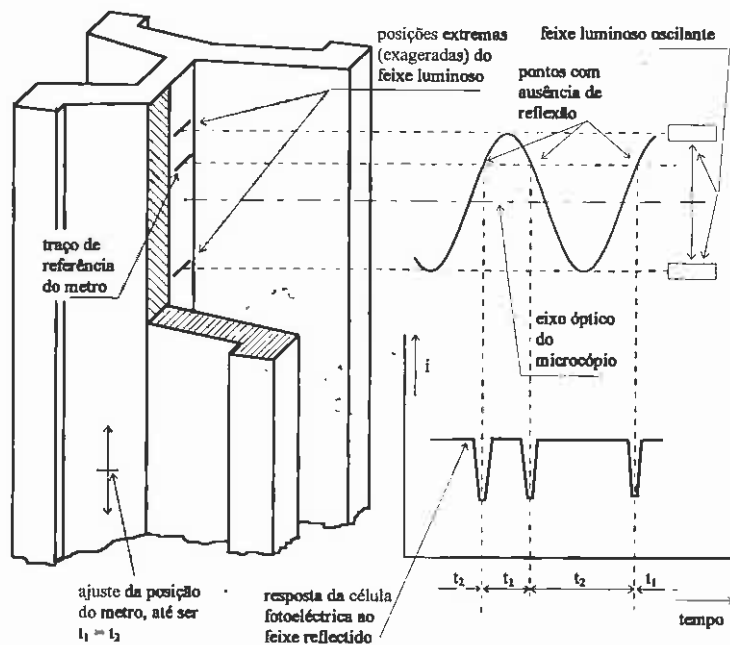


Fig. 5-4 O Microscópio Fotoelétrico

Funciona assim o microscópio fotoelétrico representado na Fig. 5-4: solidária com um microscópio comum há uma pequena fonte luminosa que projecta sobre o Metro, na zona de um dos traços centrais de referência, um feixe estreito, de forma a produzir, nesta zona, um rectângulo de luz com o comprimento de cerca de $160 \mu\text{m}$ e a largura aproximada de $8 \mu\text{m}$ (idêntica à largura do traço). O rectângulo tem a sua maior dimensão paralela ao traço, conforme a figura.

Ao feixe é dado ao um movimento oscilatório regular, na direcção do comprimento do Metro. A luz reflectida na superfície deste é recolhida por um receptor fotoelétrico que transforma num impulso eléctrico cada passagem do feixe sobre o traço (por ausência momentânea de reflexão).

Há processos electrónicos de fornecer uma relação muito precisa entre os intervalos de tempo t_1 e t_2 que separam impulsos consecutivos, e quando essa relação for igual à unidade o microscópio estará centrado no traço de referência do Metro.

O interferómetro, se funcionar com um comprimento de onda de cerca de $0,6 \mu\text{m}$ (do cripton 86) permite descer às centésimas desse comprimento, ou seja a $0,006 \mu\text{m}$. Uma faixa com $8 \mu\text{m}$ de largura para limitar cada extremidade do comprimento a medir, introduz um factor de imprecisão incompatível com as possibilidades do interferómetro. A solução deste problema veio com o microscópio fotoeléctrico, que permite acertos de posição em relação aos traços, com a definição de 1 nm .

Para melhor se avaliar das potencialidades deste instrumento, será bom trazer as grandezas intervenientes para uma escala mais acessível, multiplicando-as por um milhão; o traço na barra representa a indefinição de uma rua com 8 m de largura, na qual o microscópio definiu a posição central com um traço de 1 mm de espessura.

5.4.3 - O COMPARADOR FOTOELÉCTRICO INTERFERENCIAL

O esquema de princípio do conjunto é o seguinte:

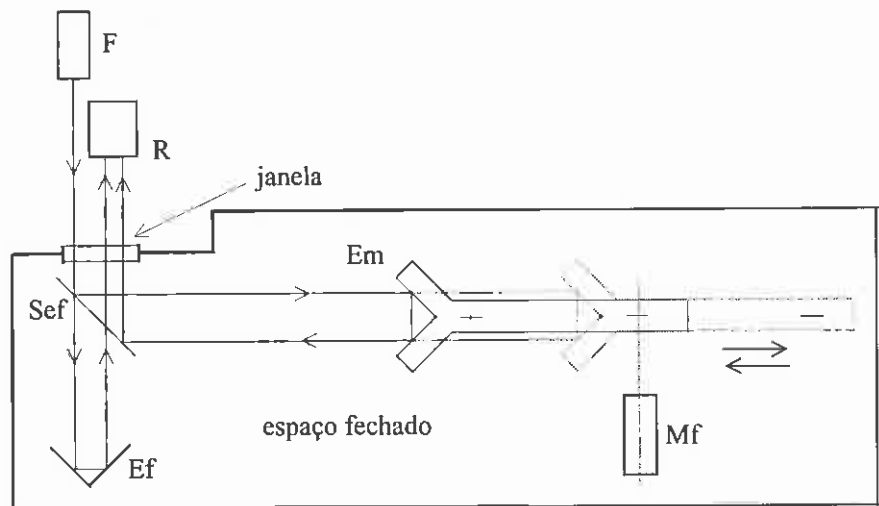


Fig. 5-5 O Comparador fotoeléctrico interferencial

No esquema são:

- F – Fonte de luz (cripton 86 ou laser)
- R – Receptor e contador de impulsos fotoeléctrico
- Ef – Espelho fixo
- Sef – Semi-espelho fixo
- Em – Espelho móvel solidário com o Metro a medir

Mf – Microscópio fotoelétrico (fixo)

Todo este conjunto, com excepção das fontes de luz e do contador de impulsos, está encerrado num espaço climatizado, mantido a pressão constante, isolado de vibrações e cuja temperatura, medida por termómetro de platina, é conhecida a menos de 1 mK.

A régua a medir desloca-se entre as duas posições representadas na figura, ou seja, de modo a que os traços representativos de cada extremidade passem sucessivamente frente ao eixo do microscópio fotoelétrico. Esse deslocamento L calcula-se dividindo por dois o produto do número n de franjas de interferência contadas, pelo comprimento de onda λ :

$$L = \frac{n\lambda}{2}$$

5.4.4 - A LÂMPADA DE CRÍPTON 86

Conforme já foi referido, tinham sido propostos três elementos, o cádmio 144, o mercúrio 198 e cripton 84 ou 86 para a representação do Metro. Pela estreiteza relativa de banda que apresentava foi escolhido o cripton 86. O modelo padrão da lâmpada está representado na Fig. 5-6.

A lâmpada propriamente dita, em forma de U, é uma lâmpada de descarga de cátodo quente. Todavia, para estabilizar a temperatura, em especial no troço Tr, horizontal, ela está imersa em azoto líquido contido num vaso de Dewar. Neste troço cujo diâmetro interior é de cerca de 2 mm e cujo comprimento é de aproximadamente 7 cm, a densidade de corrente é de $0,33 \text{ A/cm}^2$ e a pressão interior de 4 Pa.

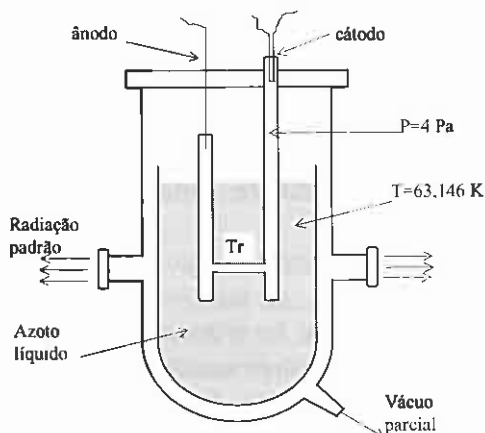


Fig. 5-6 A lâmpada de cripton 86

O vaso tem uma saída por onde se faz um vácuo parcial, de modo a levar o azoto ao ponto triplo, cuja temperatura, de 63,146 K, é suficientemente baixa para se conseguir um efeito Doppler pouco acentuado, e suficientemente fixa para que não seja afectado o comprimento de onda da radiação produzida.

Mesmo assim há diferença entre os comprimentos de onda das radiações que saem pelas janelas, frente ao ânodo e frente ao cátodo. O valor de 1 650 763,73 comprimentos de onda por metro atribuído ao Metro na 11ª CGPM em 1960, e referido em 5.4, respeita à radiação que sai pelo lado do ânodo. Foram ainda feitas experiências com temperaturas do azoto líquido um pouco abaixo do ponto triplo (pressões internas no cripton mais baixas)

de modo a poder fazer-se uma extrapolação para a pressão nula. Tudo isto porque, embora na definição do metro nada constasse, em instruções complementares vinha expresso que o átomo do cripton 86 deveria estar: no vazio, não perturbado e em repouso.

Para, em termos práticos, realizar o Metro foi escolhida como radiação padrão a radiação que sai pela janela frente ao ânodo nas condições de: pressão 4 Pa e temperatura do ponto triplo do azoto. O erro do número de comprimentos de onda da radiação assim produzida, em relação ao número atribuído na 11ª CGPM, é inferior a 1 parte em 10^8 .

A largura de banda do perfil espectral, medida a meia altura do valor de pico, é de 1,3 ondas por metro e a dispersão de valores do comprimento de onda, produzida por lâmpadas de cripton diversas, é da ordem de $\pm 4.10^{-9}$. Admite-se que na melhor das hipóteses será ainda possível baixar um pouco este valor, mas nunca para menos de $\pm 1.10^{-9}$.

Por isso em 1975 se começou a pensar na substituição deste padrão. Antes porém de se entrar no estudo do futuro Metro, uma informação curiosa: logo que no BIPM ficou concluída a instalação do comparador fotoeléctrico, trabalhando com a lâmpada de cripton, foram comparados com a radiação padrão, diversos protótipos nacionais bem como o Metro Internacional M. Em relação a este houve surpresa: o novo Metro ficou $0,25\mu\text{m}$ mais curto que o anterior. Ficou, e não advieram daí consequências práticas.

5.5 - O METRO DE 1983

Na 17ª CGPM em 1983 o metro foi definido como *o comprimento do trajecto percorrido pela luz no vazio durante um intervalo de tempo de $1/299\,792\,458$ s.*

Seja qual for a definição do metro, mais teórica ou menos teórica, há um factor a realçar: será sempre necessário medir, quer distâncias entre traços gravadas numa régua, quer distâncias entre faces de topo de barras metálicas (calibres). São as indústrias de precisão que o exigem. Para tal fim pode continuar a ser usado o Comparador Fotoeléctrico Interferencial, com a diferença de que o número de comprimentos de onda para perfazer o metro deixa de ser um número especificado e passa a ser calculado, em função do comprimento de onda da radiação utilizada.

No estudo do Comparador deduziu-se a expressão:

$$L = \frac{n\lambda}{2}$$

na qual L é o comprimento a medir, n o número de franjas de interferência contadas durante o deslocamento da régua e λ o comprimento de onda.

Na definição anterior a 1983 o comprimento de onda da radiação da lâmpada de cripton 86 era dado, não directamente, mas através do número de vezes ($n/2$):

$$\frac{n}{2} = \frac{L}{\lambda} = 1\,650\,763,73$$

que cabia no metro; na nova definição permite-se o uso de qualquer comprimento de onda, embora se aconselhem cinco. Para medir um qualquer calibre, de comprimento L , poderá, em princípio, usar-se o mesmo dispositivo e a mesma expressão analítica para o comprimento, em função do comprimento de onda e do número de franjas de interferência contadas; só com a diferença de que o valor do comprimento de onda da radiação escolhida deve ser conhecido com grande precisão.

Foi pois esta a tarefa dos anos noventa: comparar lasers, medir-lhe com rigor o comprimento de onda, avaliar e melhorar a sua reproductibilidade. É certo que logo em 1983 a CGPM, ao adoptar a nova definição do metro, convidou o CIPM a criar instruções para a realização prática do metro. Surgiu assim um conjunto de regras denominadas *Mise en Pratique* que especificavam os métodos de realização prática do metro. Essas regras foram revistas em 1992 e especialmente ampliadas no que respeita aos comprimentos de onda a utilizar, aos tipos de laser e à forma de estabilização. Em 1997 houve nova revisão com alargamento substancial dos tipos de laser e dos dispositivos de estabilização.

5.5.1 - OS LASERS

Os lasers são fontes de radiação muito direccional, muito intensa e que pode ser muito monocromática. É em especial esta propriedade que tem maior interesse, dado que a sua largura espectral pode descer até 0,000 1 ondas por metro.

Isso permite observar as franjas de interferência perfeitamente contrastadas e assim o deslocamento do espelho móvel pode ser conhecido com maior rigor.

O problema principal dos lasers neste tipo de aplicação é a variação do comprimento de onda médio da radiação, ao longo do tempo. Há pois que utilizar artificios para o estabilizar.

A Fig. 5-7 representa um laser de hélio (85%)-néon (15%), estabilizado, com o comprimento de onda $\lambda \approx 0,633 \mu\text{m}$.

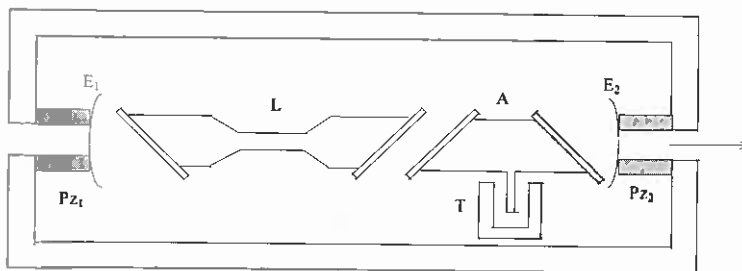


Fig 5-7 O laser de hélio-néon

Na figura são:

L – tubo de descarga com hélio-néon

A – célula de absorção com iodo

T – estabilizador de temperatura e, conseqüentemente, da pressão do iodo

E_1 , E_2 – espelhos côncavos, (E_2 ligeiramente transparente), formando a cavidade ressonante

Pz_1 , Pz_2 – apoios piezoelétricos para ajuste da cavidade ressonante

Tanto o tubo de descarga como a célula de absorção termina por janelas em ângulo (de Brewster) que, polarizando o feixe, reduzem as perdas por reflexão.

Os átomos de hélio, excitados por ondas de radiofrequência (27 a 30 MHz) aplicadas por meio de anéis exteriores ao tubo, colidem com os átomos de néon, que são assim também excitados. Estes, por sua vez, regressando ao estado normal emitem radiações distribuídas por diversos níveis, sendo a escolha da frequência pretendida, obtida por ajuste do comprimento da cavidade, ou seja do afastamento entre espelhos. Algumas das linhas representativas desses níveis energéticos, num total de 159, estão representadas na Fig. 5-8.

Conforme foi referido, estas linhas tem um perfil espectral extremamente fino e as diferenças entre as suas frequências são bem conhecidas, para que se possa usar qualquer delas no controle do laser.

O METRO

avidade

em ângulo

30 MHz)

n, que são

al emitem

retendida,

espelhos.

159, estão

o fino e as

r qualquer

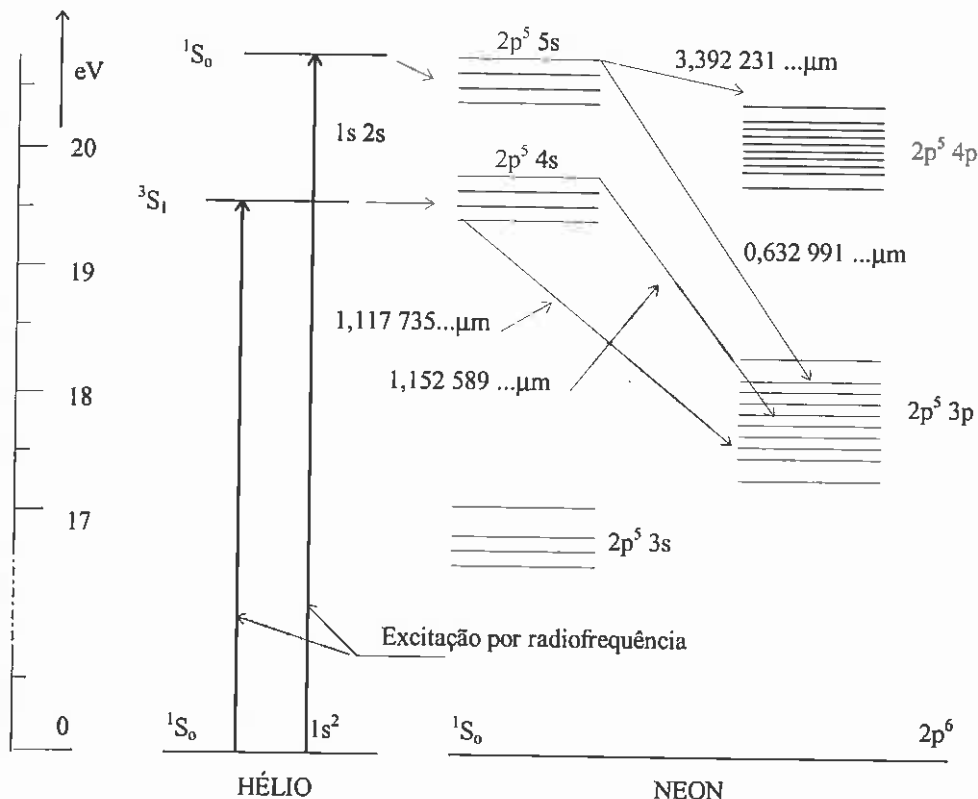


Fig. 5-8 Níveis energéticos do laser de hélio-néon

A estabilização da frequência da radiação ocorre da seguinte forma: a radiação, ao atravessar a célula de iodo dentro da cavidade ressonante, sofre absorção a qual, por sua vez, vai afectar o ganho do laser e, produzir uma diminuição na potencia útil irradiada.

Na medida em que haja uma tendência para a variação do comprimento de onda, tende a variar também a potencia absorvida, e quando esse comprimento coincide com uma linha de absorção (do iodo), esta potencia apresenta um pico bastante nítido, devido à baixa pressão na célula.. É este pico que, traduzindo-se de forma negativa na potência de saída do laser, vai controlar o afastamento entre espelhos e fixar assim ao laser um comprimento de onda igual ao da linha de absorção escolhida.

Na definição do Metro não se faz referencia ao tipo de radiação a usar, mas o CIPM recomenda que se realize o Metro por meio de um certo número de radiações que vão a seguir indicadas. Quatro delas são produzidas em laser de hélio-néon, aproveitando outras tantas frequências próprias do átomo de néon e com absorção ou por iodo 127 ou por metano, e a quinta produzida em laser de íões de árgon com absorção pelo mesmo iodo.

Laser	Absorvente	Comprimento de onda (μm)	Desvio padrão
He-Ne	CH_4	3,392 231 397 0	$0,44 \times 10^{-10}$
He-Ne	$^{127}\text{I}_2$	0,576 294 760 27	2×10^{-10}
He-Ne	$^{127}\text{I}_2$	0,632 991 398 1	$3,4 \times 10^{-10}$
He-Ne	$^{127}\text{I}_2$	0,611 970 769 8	$3,7 \times 10^{-10}$
Ar	$^{127}\text{I}_2$	0,514 673 466 2	$4,3 \times 10^{-10}$

Obs. – A radiação de comprimento de onda 0,576... μm é produzida a partir da radiação de 1,153 μm , por duplicação de frequência em cristal não linear.

Além destas radiações são ainda recomendadas outras, tais como a do cripton 86 já referida, com um desvio padrão mais modesto (13×10^{-10}); o mesmo sucedendo com as linhas de absorção do iodo, das quais foi publicada uma lista das componentes hiper finas, tanto do iodo 127 como do híbrido 127-129.

Nas recomendações do CIPM de 1997, numa nova e mais extensa lista das radiações recomendadas, e dos respectivos estabilizadores, para a realização do metro figuram entre outros os seguintes dispositivos:

- laser de argon estabilizado por uma transição do $^{127}\text{I}_2$, a cerca de $-5\text{ }^\circ\text{C}$
- laser de Nd:YAG com a frequência duplicada e estabilização o por $^{127}\text{I}_2$ de $-10\text{ }^\circ\text{C}$ a $-20\text{ }^\circ\text{C}$
- laser de He-Ne com célula de iodo externa, à temperatura de cerca de $0\text{ }^\circ\text{C}$.
- laser de He-Ne estabilizado por molécula de CH_4
- laser de C O_2 estabilizado por molécula de OsO_4
- absorção por transição em átomos de ^{40}Ca ,
- absorção por transição em iões $^{88}\text{Sr}^+$,
- absorção por transição em átomos de ^{85}Rb .

Foi tarefa importante dos laboratórios principais nos anos 90, a pesquisa sobre lasers e em especial sobre a sua estabilização com base nas recomendações do CIPM de 1992 e de 1997, tendo em vista principalmente a redução da incerteza nos valores determinados para a frequência. Foram experimentados diversos dispositivos com vista a realizar padrões de frequência, constituídos não só por lasers mas também por osciladores, com base em iões ou em átomos confinados a cavidades (ion traps ou atom traps), os primeiros por acção combinada de campos eléctricos e magnéticos, como ainda por padrões do tipo das lâmpadas de radiação, como a lâmpada de cripton.

Uma das causas de desvio da frequência em relação ao valor previsto reside no efeito de Doppler, nos seus dois aspectos: primário, devido ao deslocamento ordenado dos elementos que constituem o feixe e secundário devido aos movimentos desordenados provenientes da agitação térmica. Nestes tipos de osciladores o efeito primário é

eliminado visto não haver movimento contínuo dos iões, e o efeito secundário pode ser fortemente reduzido pela técnica do arrefecimento (laser cooling) através da pressão exercida por uma radiação laser ou ainda o arrefecimento por colisão com átomos de gás inerte (He). Conseguem-se assim temperaturas inferiores a 1 kelvin e, por consequência, uma redução notável do efeito Doppler secundário.

Outros dispositivos e outras técnicas têm sido experimentados, como por exemplo os osciladores atómicos "bombeados" por via óptica, em cavidades com paredes revestidas a teflon para reduzir as oscilações livres ou preenchidas com gases amortecedores (buffers). A combinação destas e de outras técnicas tem principalmente em vista a redução do efeito Doppler secundário e das suas consequências na estabilização da frequência.

De facto durante a década de 90 assistiu-se, nos laboratórios mais evoluídos, ao estudo intenso de aprofundamento do conhecimento, não só da estabilidade, como das próprias frequências dos lasers, especialmente do de He-Ne.

Igualmente foram investigadas as possibilidades, como estabilizador de frequências, do $^{127}\text{I}_2$ que tem mais de 10^5 linhas de absorção, cobrindo o visível e o infravermelho próximo. As frequências de transição desta molécula podem ser deduzidas a partir dos parâmetros moleculares, com uma incerteza de $3 \cdot 10^{-7}$; no entanto a medida das frequências de transição entre algumas linhas do iodo, vão permitir uma determinação mais precisa desses parâmetros e, por consequência, uma previsão mais correcta de outras linhas de transição.

Recentemente uma colaboração entre o PTB e a universidade de Hanover, utilizando padrões de frequência constituídos por lasers de Ca e de CH_4 , permitiu definir frequências de transição do iodo na banda dos 815 nm, com erros de 15 kHz em frequências de 367 THz, ou seja com erros de 4 partes em 10^{11} .

As possibilidades do $^{127}\text{I}_2$ como estabilizador não estão ainda completamente exploradas. Na região dos 551 nm há inúmeras linhas de transição com forte absorção e bem separadas entre si, Será naturalmente possível fabricar lasers com excelente estabilidade de frequência, comparável com a do relógio de céσιο; sendo mesmo de prever que a base de tempo, que actualmente é o referido relógio, possa vir a ser substituída por um laser.

5.5.2 - AS RAZÕES DA MUDANÇA

Para uma melhor compreensão das razões que levaram à mudança do padrão do metro, será bom seguir as considerações feitas por Pierre Giacomo, do BIPM, sobre o assunto, expressas numa publicação de Março de 1983, em IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. IM-32, nº 1.

A ideia de utilizar comprimentos de onda atómicos para definir a unidade de comprimento baseia-se na suposição de que eles sejam permanentes e universais. Esta suposição, por sua vez, assenta nos postulados da condição de permanentes e universais

- 1) - dos níveis energéticos E_2 e E_1 , entre os quais se verifica a transição $\Delta E = E_2 - E_1$,
- 2) - da constante de Planck h na expressão: $\Delta E = hv$, sendo v a frequência,
- 3) - da velocidade da luz c , na expressão $\lambda = c/v$, sendo λ o comprimento de onda

Na verdade, quando em 1967, na redefinição da unidade de tempo, se abandonou o movimento da Terra e se substituiu por uma característica do átomo de césio, não se fez mais do que aceitar os postulados 1) e 2).

Esta substituição veio confirmar irregularidades no movimento de rotação da Terra, de que já se suspeitava através de meios astronómicos. Porém a melhor confirmação da regularidade do relógio de césio, é a comparação entre diversos relógios da mesma natureza.

O segundo é de longe a unidade com maior reprodutibilidade; a sua incerteza é da ordem de uma parte em 10^{14} ou mesmo 10^{15} . É a melhor confirmação dos postulados 1) e 2).

Da mesma forma, quando em 1960 se substituiu, na representação do Metro, uma barra com dois traços gravados, pelo comprimento de onda do cripton 86; isso constituiu uma aceitação do conjunto dos três postulados.

O abandono desta definição em 1983 significa falta de confiança em algum deles? Absolutamente: não. Foram outras as razões. Reconheceu-se que não era possível melhorar a reprodutibilidade, por causas tais como: efeito de Doppler, colisões entre moléculas devidas a um vazio não completamente realizado, irregularidades estruturais etc. que impediam a realização perfeita das condições ideais de funcionamento do átomo de cripton.

Uma via a explorar, seria a de trabalhar com frequências mais baixas, como por exemplo a que serviu para definir o segundo; mas os comprimentos de onda centimétricos são pouco adequados a medições tão rigorosas como as que se obtêm com os comprimentos da ordem dos décimos de micron. Acresce ainda que as frequências visíveis permitem aproveitar de um dos mais potentes meios de comparação: a interferência.

Afigura-se assim que uma boa solução seria pesquisar uma transição atômica (ou molecular) na banda visível, de frequência conhecida e suficientemente estável.

No que toca à estabilidade, lasers de He-Ne estabilizados a iodo, trabalhando lado a lado, apresentam desvios da ordem de uma parte em 10^{12} durante períodos de 10^4 segundos. O problema consiste em conhecer o seu comprimento de onda com a mesma precisão. Para tal faltavam: métodos de comparação e uma frequência padrão conhecida.

Ora, se o relógio de césio assegura desvios inferiores a 10^{-14} , ele próprio seria bom ponto de partida, para que a sua frequência de cerca de 10 GHz, fosse comparada com frequências superiores, até à gama dos 500 THz, onde se situam os lasers já referidos.

O problema não era fácil. Já desde 1968 que diversas equipas, de diversos países procuravam comparar harmónicas de ondas electromagnéticas produzidas por via radiotécnica, com radiação do infravermelho próximo. Distinguiu-se nessa tarefa uma equipa norte-americana da NASA, dirigida por M. A. Pollack.

Anos depois, outra equipa, também norte-americana mas pertencente ao NBS e trabalhando em Boulder, no Colorado, sob a orientação do mesmo Pollack, conseguiu fazer a síntese e medir frequências no infravermelho próximo, com desvios da ordem de 10^{-10} .

Em 1982 esta mesma equipa conseguiu fazer a síntese de frequências até ao visível ($\lambda \approx 0,633 \mu\text{m}$ e $\lambda \approx 0,576 \mu\text{m}$), com o mesmo grau de precisão. Foi este trabalho, com base numa radiação de laser com $\lambda \approx 3,39 \mu\text{m}$, cuja frequência fora previamente medida, que possibilitou a definição do Metro de 1983. Tratou-se de uma tarefa extremamente delicada e que na época só estaria ao alcance de poucos laboratórios.

Esta definição precisa de se apoiar apenas no terceiro dos postulados referidos a princípio, e tem a vantagem de, não fixando valores para a frequência de operação, deixar caminho aberto a futuros desenvolvimentos.

5.5.3 - AS COMPARAÇÕES INTERNACIONAIS

Até à definição do metro de 1983 as comparações internacionais dos diversos metros nacionais com o padrão do metro eram realizadas regularmente no BIPM. Após 1983 as comparações centraram-se sobre os comprimentos de onda dos lasers (geralmente de He-Ne) utilizados no estabelecimento dos padrões nacionais do metro. Nesta ordem de ideias entre 1993 e 1997, com a colaboração do BIPM, foi realizado um programa de comparações internacionais de lasers He-Ne de $\lambda \approx 633 \text{ nm}$, com estabilização por iodo. Além do BIPM estiveram envolvidos 37 laboratórios de 34 países, entre os quais Portugal representado pelo laboratório do I. P. Q.. O estudo aprofundado e a comparação de lasers (sobretudo do de He-Ne) continuam sendo objecto de interesse internacional, e também do BIPM, que se dedica ultimamente ao estudo do laser de Nd YAG (de 532 nm, frequência duplicada) como eventual substituto do He-Ne.

AS UNIDADES FUNDAMENTAIS DO SISTEMA INTERNACIONAL
- *ASPECTOS HISTÓRICOS E TÉCNICOS* -

6

O QUILOGRAMA

O quilograma é a única unidade do Sistema Internacional cuja definição se mantém válida desde 1889. Por isso também o respectivo padrão "resiste" desde essa data; mas isso não significa que se esteja em presença de um padrão de grande estabilidade; bem pelo contrário.

Voltemos um pouco atrás no tempo.

6.1 - ANTECEDENTES

Em 1793, por decreto publicado em França em 1 de Agosto, foi definida como unidade de massa o *grave*, que correspondia à massa do decímetro cúbico de água. Dois anos depois, por decreto de 7 de Abril, surgiu o *grama*, como sendo a massa de 1 cm³ de água à temperatura de 0 °C. Neste decreto aparece, pela primeira vez, a palavra *quilograma*, designando um múltiplo do grama.

Em 1799 foi realizado o Quilograma dos Arquivos – simultaneamente com o Metro dos Arquivos –, conforme já foi referido, na forma de um cilindro de platina com cerca de 39 mm de diâmetro, para materializar a massa do decímetro cúbico de água à temperatura de 4,1° C.

Finalmente em 1889 e por razões também já referidas foi, na 1ª CGPM, aprovada a substituição do Quilograma dos Arquivos pelo Quilograma Internacional **K** (em letra gótica), de platina iridiada, o qual tem continuado a ser o padrão da unidade de massa do Sistema Internacional.

Na verdade, em 1889 foram realizados, não um, mas quatro protótipos: o K I, o K II, o K III e o K IV. Comparados separadamente com o Quilograma dos Arquivos foi escolhido o K III para Quilograma Internacional, por apresentar a massa que mais se aproximava da do Quilograma dos Arquivos e passou a ser designado por K.

Os restantes protótipos ficaram no BIPM, formando um conjunto de testemunhos, a que mais tarde se juntaram outros.

6.2 - A CONSERVAÇÃO DE UM PADRÃO

Obviamente que um padrão de massa tem que ser manipulado com cuidados extremos. Para melhor se avaliar da importância desses cuidados, bastará, por exemplo, referir que se uma das bases do cilindro que constitui o K for desgastada, pelo uso, numa camada com $0,04 \mu\text{m}$ de espessura, o padrão perderá 1 mg de massa ou seja, 1 parte em 10^6 .

Embora o K esteja normalmente coberto por três redomas de vidro, sucessivas, e com vácuo parcial, ao longo dos anos vão aderindo poeiras à sua superfície, que são depois aglomeradas pela acção do vapor de água da atmosfera e contribuem para aumentar a massa real do padrão.

Entretanto, do quilograma padrão, foram sendo realizados mais cerca de quarenta protótipos, alguns dos quais ficaram em França, enquanto que outros foram sorteados pelos países membros da Convenção do Metro, cabendo a Portugal o prototipo do Quilograma com o nº 10 que, por casualidade, era o mesmo número do prototipo do Metro.

Em 1911 foi levada a efeito a primeira comparação entre o K e dezoito protótipos. Constatou-se que nos protótipos que não tinham tido uso, a variação de massa era da ordem de poucos microgramas; excepção feita ao protótipo nº 31 que, embora sempre manipulado com extremo cuidado, tinha tido um uso intensivo, durante o qual havia perdido $25 \mu\text{g}$.

Em 1939 houve nova comparação, com intervenção, pela segunda vez, do K. Alguns dos testemunhos apresentavam aumentos de massa entre os 30 e os 80 microgramas, devido a depósitos aderentes; muito embora – e pela primeira vez – todas as suas superfícies tivessem sido previamente passadas com camurça embebida em mistura de álcool e benzeno.

Na terceira intervenção do K, em 1946, foi ele comparado com os seus seis testemunhos e ainda com dois protótipos de uso do BIPM: os nº. 9 e 31. Desta vez a lavagem foi mais completa: numa primeira fase com vapor de água e em seguida com álcool e benzeno.

As diferenças para os testemunhos originais (de 1889), foram de $-30 \mu\text{g}$ a $+40 \mu\text{g}$ e ilustraram bem a importância da lavagem dos protótipos e, simultaneamente, o grau de confiança que eles inspiram.

Conforme se referiu, foi o Quilograma-protótipo nº.10 que em 1889 veio para Portugal. Antes de ser entregue foi aferido e o certificado que o acompanhou mencionava um erro de +0,228 mg. Ficou à guarda do organismo estatal que na época tutelava pesos e medidas e está actualmente entregue ao Instituto Português da Qualidade. Em 1935/36, juntamente com o protótipo nacional do Metro, foi enviado ao BIPM para aferição. O erro continuava positivo e de valor muito próximo do valor primitivo: +0,237 mg. Isto significa que em cerca de 45 anos a massa do padrão variou de +0,009 mg.

O facto foi considerado notável pelo BIPM e não houve assim necessidade de modificar o certificado original, por não ter sido excedido o limite de $\pm 0,05$ mg, estabelecido logo em 1889 pela CIPM.

Provavelmente, porque cem anos de idade é vida demasiada para um Quilograma-protótipo, o Instituto Português da Qualidade recebeu em 1989 um novo protótipo que tem o nº. 69.

Em 1980, no BIPM, com a colaboração do NPL e dos fabricantes usuais de cópias do quilograma padrão, construíram-se novos exemplares cuja superfície foi trabalhada a diamante, segundo uma técnica desenvolvida no próprio BIPM. Daí resultaram unidades com melhor aspecto e melhores acabamentos, tendo sobretudo em vista minorar alterações devidas à humidade, à pressão e à temperatura. Foi também estudada a sua estabilidade no vácuo.

Resumindo, constata-se que de uma maneira geral, os protótipos aumentam de massa quando estão inactivos, por causa das aderências, diminuem de massa quando lavados e diminuem ainda: gradualmente em função do uso, ou bruscamente por via de pequenos acidentes.

Se se pensar que uma variação de 50 μg num quilograma representa uma fracção de 1 parte em 2×10^7 , haverá que concordar que, comparativamente aos padrões de outras unidades, é baixa a sua reprodutibilidade. No entanto não existe ainda outra forma de representar a unidade de massa, e isso justifica que o **K** continue sendo o “decano” dos padrões, ou melhor, o único padrão válido, dado que para as restantes grandezas, os padrões propriamente ditos, foram substituídos por métodos-padrão para realizar as respectivas unidades.

No entanto, mais tarde ou mais cedo, é possível que a situação do padrão seja alterada, provavelmente para ficar definido em termos de uma massa atómica, ou até mesmo para o quilograma deixar de ser uma unidade fundamental e passar a unidade derivada. Esta ideia tem por base uma experiência simples realizada em 1988 no NPL e que consistiu em determinar a massa necessária para repor o equilíbrio numa balança que tinha suspensa de um dos braços uma espira condutora circular, situada em plano horizontal e submetida a uma indução magnética disposta radialmente em relação à espira, quando a espira era percorrida por uma determinada corrente. A equação de equilíbrio é:

$$mg = Bli$$

sendo:

m – massa
 g – aceleração da gravidade
 B – indução magnética radial
 l – comprimento da espira
 i – corrente que a percorre

Numa segunda parte da experiência imprime-se à espira, na ausência de corrente, um deslocamento, paralelamente a si própria, com velocidade medida por interferometria, e sendo mantida durante o deslocamento a condição da indução radial. É medida a força electromotriz desenvolvida na espira, cuja equação é:

$$e = B l v$$

sendo :

e – força electromotriz
 v – velocidade do deslocamento.

Combinando as duas equações:

$$m = \frac{e i}{g v}$$

Esta expressão, embora represente o resultado de uma experiência feita originalmente para realizar a unidade de potência, permite definir a massa com uma precisão superior à do conhecimento do próprio quilograma padrão.

Em 1999 havia, no CCEM (do BIPM) bem como no OFMET (Swiss Federal Office of Metrology), grupos de trabalho com actividades experimentais neste campo.

6.3 - CONTIGÊNCIAS CURIOSAS

Na execução do Quilograma dos Arquivos , que deveria representar a massa de água contida num decímetro cúbico à temperatura da sua maior densidade, cometeu-se um ligeiro erro que depois transitou para o K. De facto, 1 kg de água a essa temperatura ocupa, não um decímetro cúbico exacto mas 1,000 028 dm³; e isso foi notado logo nos primeiros anos do século XX e confirmado mais tarde, em 1975, usando métodos de medida de maior rigor.

O que há de curioso em tal desacordo, é que esta diferença fez nascer e manteve, ao nível das cúpulas da Metrologia, uma enorme controvérsia que só terminou em 1964.

Não tendo qualquer influencia na vida quotidiana, a verdade é que a raiz cúbica de 1,000 028 é cerca de 1,000 009; e até à referida data, o litro, que em 1901, na 3ª CGPM fora definido como o volume ocupado pelo quilograma de água à temperatura da sua maior densidade (4,1 °C) , ficou sendo um pouco maior que o decímetro cúbico e não igual, como se ensinava nas escolas.

O diferendo só foi sanado quando em 1964, na 12ª CGPM, se abandonou a definição do litro baseada na massa de água e se redefiniu como sendo igual ao decímetro cúbico.

6.4 - BALANÇAS

O desenvolvimento dos métodos e dos instrumentos de pesagem foi desde início preocupação importante do BIPM. Efectivamente, as balanças não serviam só para comparação de massas, serviam também para medir forças, forças que operavam por exemplo nas balanças de corrente eléctrica, ou de tensão, com que até há poucos anos se faziam medições absolutas dessas grandezas.

Isso implicava um conhecimento muito exacto da aceleração da gravidade. Daí o desenvolvimento que no BIPM se imprimiu a esta disciplina.

No que toca ao desenvolvimento das técnicas de pesagem, foi, em 1964, instalada no BIPM uma balança designada por "hidrostática" munida de um dispositivo mecânico manobrável à distância, que permitia comparações entre quilogramas com uma reprodutibilidade de 1×10^{-6} .

Em 1973 uma outra balança denominada "de um só prato", comandada à distância e com uma enorme estabilidade térmica, conferida por um compartimento isolado onde se encontrava instalada, realizou a comparação entre quilogramas, com um desvio padrão de 1×10^{-9} , ou seja de 1 μg .

Mais recentemente, em 1984, uma balança com suspensão flexível permitiu descer este valor para 0,3 μg , ou seja 3×10^{-10} e em 1999 a mesma balança, mas com suspensão de liga de Cu-Be, atingiu o valor de $0,4 \times 10^{-11}$ e ainda melhor para pesagens no vácuo, situação em que os padrões são mais estáveis.

Estes progressos, no campo da comparação dos quilogramas entre si, não se coadunam com a já referida instabilidade inerente aos próprios padrões do quilograma. Isto conduz ao problema de uma eventual substituição do padrão de massa. No entanto existem alguns óbices.

Em princípio poderia definir-se a unidade como um múltiplo da massa de uma partícula elementar ou de um átomo, e teríamos garantia de absoluta estabilidade. Acontece porém que as relações entre as diversas massas atómicas só podem ser determinadas com uma incerteza pouco inferior a 1×10^{-7} . Por outro lado a massa atómica do próprio carbono 12 é actualmente conhecida com a incerteza de 3×10^{-6} . Não obstante, existe já um projecto de proposta que visa substituir a unidade de massa do SI pela massa de um certo número de átomos de silício, cerca de 21×10^{24} átomos. Há todavia ainda um longo caminho a percorrer antes de se poder partir para uma tal solução.

6.5 - GRAVÍMETROS

No BIPM foram construídos dois tipos de gravímetros: fixos e transportáveis. Obviamente que os fixos, de maior sensibilidade, destinavam-se a medir a aceleração da gravidade no local onde estavam instalados, isto é, em princípio no próprio BIPM.

As primeiras medições vêm de 1888, utilizando o método dos pêndulos reversíveis e foram realizadas com uma incerteza de $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$. Até 1940 pouco se avançou no que respeita à precisão alcançada, mas em 1946 foi proposto que se construísse (também no BIPM) um gravímetro baseado na medição de tempos na queda de graves.

A avaliação dos tempos era feita por cinematografia cronométrica, e consistia na filmagem de uma régua métrica em queda livre (no vácuo, à pressão de 0,007 Pa).

O princípio da medida era o seguinte: supondo constante a aceleração da gravidade g , o espaço percorrido h , segundo a equação do movimento uniformemente acelerado é dado por

$$h = h_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g t^2$$

em que h é a distância percorrida na vertical pela régua durante o tempo t , h_0 representa a posição no tempo $t=0$, v_0 é a velocidade nesse momento e g a aceleração da gravidade.

Três experiências de queda da régua fornecem três pares de valores correspondentes, de h e de t , e permitem formar um sistema de equações cujas soluções são: h_0 , v_0 e g , supostos obviamente constantes nas três experiências. Na prática, um maior número de experiências permite aumentar o rigor da determinação.

A instalação só ficou completa em 1958, sendo a precisão relativa deste gravímetro de 2×10^{-7} .

Um modelo mais recente, e mais preciso é designado por gravímetro de "duas estações" e, embora começado a estudar em 1947 só em 1966 permitiu as primeiras medições. O princípio de funcionamento é o seguinte: um projectil de liga de alumínio, com seis espelhos e com a massa de 430 g é catapultado para cima, na vertical. Na subida o projectil passa sucessivamente pelo nível (ou estação) inferior, pelo nível superior, distantes h (cerca de 40 cm) entre si (Fig. 6-1) e sobe ainda mais um pouco (h') acima do nível superior, antes de começar a descida.

À primeira passagem pelo nível inferior dispara um cronómetro que só pára quando, t_1 segundos depois, na descida, o projectil volta a esse nível. Da mesma forma, outro cronómetro dispara na ida e para na volta, mas em relação ao nível superior, registando o intervalo de tempo t_2 .

Supondo g constante, a lei da queda dos graves mostra que em relação à descida, a partir do ponto mais alto da trajectória,

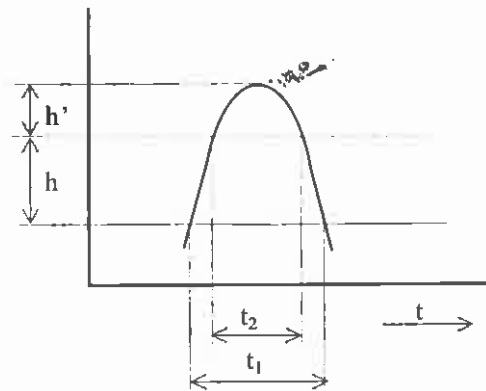


Fig. 6-1 Percurso do projectil no gravímetro de duas estações, em função do tempo

-para o nível inferior:

$$h + h' = \frac{1}{2} g \left(\frac{t_1}{2} \right)^2$$

-para o nível superior:

$$h' = \frac{1}{2} g \left(\frac{t_2}{2} \right)^2$$

Subtraindo membro a membro

$$h = \frac{1}{2} g \left(\frac{t_1^2}{4} - \frac{t_2^2}{4} \right)$$

de onde se conclui que

$$g = \frac{8h}{t_1^2 - t_2^2}$$

Com efeito g não é constante mas varia com a posição momentânea do projectil; o valor dado pela fórmula é pois uma espécie de valor médio. Demonstra-se que esse valor é exactamente o valor que a aceleração da gravidade tem num ponto um pouco abaixo do ponto mais elevado da trajectória, distante dele de: $h/6 + h'/3$. É a essa altitude que corresponde o valor de g calculado.

Os intervalos de tempo são medidos, com uma resolução de 0,1 ns, por contagem de oscilações de 20 MHz combinada com a contagem, por registo fotográfico, de franjas de interferência de luz branca. O espaço é medido fazendo incidir nos espelhos do projectil um dos braços luminosos de um interferómetro trabalhando com radiação de comprimento de onda conhecido, como por exemplo a da lâmpada de cripton 86 e, mais recentemente, a do laser He-Ne estabilizado com absorção por iodo.

Em 1975 a precisão deste aparelho era da ordem de 3×10^{-9} , e para melhor se entender o que significa uma tal precisão basta dizer que ele pode detectar a variação que sofre a aceleração da gravidade quando a altitude do ponto de medida varia de 1 cm.

Foi também construído com o auxílio do BIPM e lá experimentado, um gravímetro transportável destinado a um instituto de metrologia italiano, em Turim. O princípio de funcionamento é idêntico ao que ficou descrito, apenas com algumas simplificações. Trabalha com um grau de vácuo mais modesto (cerca de 1 Pa) e tem uma precisão relativa de 2×10^{-8} . Isto em 1975, porque dez anos depois, como resultado de vários melhoramentos, tanto os gravímetros fixos como os transportáveis atingiam já a precisão relativa de 1×10^{-9} .

Os gravímetros que foram descritos são considerados absolutos; designando-se por relativos aqueles cuja indicação é obtida com base na deformação de peças metálicas (molás). Tanto uns como outros podem ser fixos ou transportáveis.

Em Novembro de 1997 realizou-se no BIPM uma comparação (a maior até à data) de gravímetros. Durante aproximadamente três semanas foram comparados 15

AS UNIDADES FUNDAMENTAIS DO SISTEMA INTERNACIONAL
- *ASPECTOS HISTÓRICOS E TÉCNICOS* -

gravímetros absolutos e 14 relativos, de todos os tipos actualmente usados, provenientes de 13 países.

7

O SEGUNDO

Inicialmente o segundo foi definido como a fracção $1/86\,400$ do dia solar médio, mas em 1960, na 11.^a CGPM foi redefinido como a fracção $1/31\,556\,925,974\,7$ da duração do ano trópico, aliás em concordância com decisões da União Astronómica Internacional. Em 1967, na 13.^a CGPM a definição passou a ser: *a duração de $9\,192\,631\,770$ períodos de uma radiação correspondente à transição entre dois níveis hiper finos do estado fundamental do átomo de cézio 133*, tendo sido acrescentado na reunião de 1997 do CIPM que *o átomo se encontrava à temperatura termodinâmica de 0 K*. É evidente que estes números não foram escolhidos ao acaso; antes se procurou sempre respeitar para o segundo a dimensão anterior.

Nestas poucas linhas está definido o segundo; mas há ainda algo mais para acrescentar.

7.1 - UM POUCO DE ASTRONOMIA

É sabido que, tomando como referência o Sistema Solar, a Terra descreve em volta do Sol uma órbita elíptica plana –o movimento de translação– na qual o Sol ocupa um dos focos. O movimento de rotação sobre si própria, é feito em torno de um eixo que não é perpendicular ao plano da órbita; antes faz com a normal ao plano um ângulo de $23^{\circ} 27'$, aproximadamente. Este ângulo não é rigorosamente constante, oscila ligeiramente, ora num sentido ora noutro, com uma amplitude de cerca de $9''$ e com um período à volta de 29 anos, constituindo o movimento de nutação.

O eixo da Terra aponta actualmente, no Pólo Norte, para a vizinhança (diferença angular próxima de 1°) da Estrela Polar. Mas nem sempre assim foi: há 5000 anos

apontava para a estrela mais brilhante da constelação do Dragão e no futuro continuará a sua ronda, inscrevendo na esfera celeste uma circunferência que o fará, daqui por cerca de 26 000 anos, voltar à Estrela Polar.

7.1.1 - SISTEMAS DE COORDENADAS

Como se sabe, para definir a posição de um ponto P, na esfera terrestre, usam-se as coordenadas terrestres: latitude e longitude, que são, no fundo, duas das três coordenadas esféricas habituais da Geometria Analítica (Fig. 7-1a), representadas normalmente por ϕ e θ , e só duas, visto que o que o raio ρ , sendo aqui suposto constante, não tem intervenção. Porém o ângulo ϕ é medido a partir de um meridiano de referência que passa por Greenwich, na Inglaterra, designa-se *longitude* – Este se positivo, se negativo Oeste – e o complemento do ângulo θ designa-se por *latitude*, do lugar L, obviamente (Fig. 7-1b).

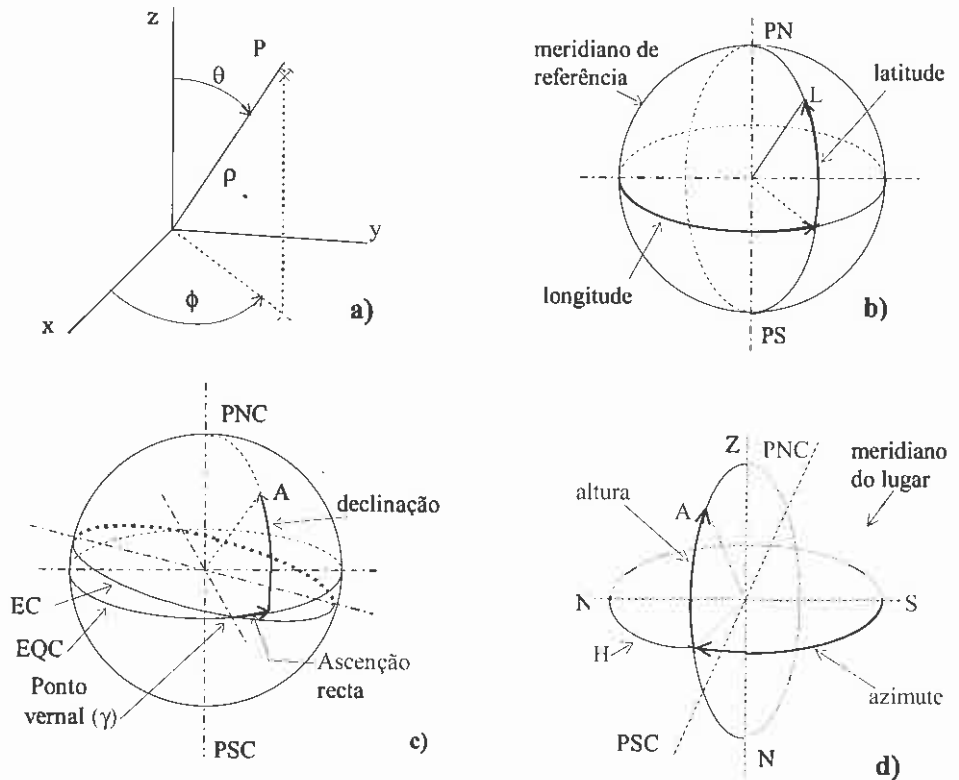


Fig. 7-1 Sistemas de

coordenadas celestes e terrestres

LEGENDA

A - Astro
L - Lugar

g - Ponto Vernal
PN - Pólo Norte

EQC - Equador Celeste
PNC - Pólo N. Celeste

inuará a cerca de	Z - Zénite N- Nadir	PS - Pólo Sul EC - Eclíptica	PSC - Pólo S. Celeste H - Plano do Horizonte
----------------------	------------------------	---------------------------------	---

Da mesma forma se pode imaginar uma esfera celeste (Fig. 7-1c) de raio indefinido e em cuja superfície se supõem projectados os astros. Tem o centro na posição do observador ou no centro da Terra e o seu eixo de referência é paralelo ao eixo da Terra.

As intersecções da esfera com o eixo são, o *Pólo Norte Celeste* e o *Pólo Sul Celeste*; o círculo máximo perpendicular ao eixo é o *Equador Celeste* e o círculo máximo que resulta da intersecção da esfera celeste com o plano da órbita da Terra é designado por *Eclíptica*.

Para definir na esfera celeste a posição de um astro A, usam-se coordenadas semelhantes às terrestres: as coordenadas celestes. Só que aqui a latitude (do lugar) chama-se *declinação* (do astro) e a longitude é substituída pela *ascensão recta*, que é medida a partir de uma outra referência, no sentido retrógrado, não em graus mas em horas, minutos e segundos.

O meridiano de referência na esfera celeste não passa propriamente por uma estrela ou posição fixa, mas pelo chamado *Ponto Vernal* (γ), que é um dos pontos em que a linha de intersecção do plano do Equador com o plano da órbita terrestre, – também chamado plano da Elíptica – corta a esfera celeste, marcando o início da Primavera. O outro ponto notável desta linha – a linha dos equinócios – designa-se por *Ponto Balança*.

Há ainda outro tipo de coordenadas celestes (Fig. 7-1d) que toma como eixo principal, não o eixo da Terra mas a vertical do lugar do observador. Essa vertical corta a esfera celeste em dois pontos: o superior, o *Zénite* (Z) e o inferior o *Nadir* (N).

As novas coordenadas já não são propriamente coordenadas do astro mas sim do conjunto astro-observador. Designam-se por *altura* e *azimute*; a primeira, como a declinação, é o complemento do ângulo que a vertical do lugar (Z) faz com o eixo que passa pelo astro e a segunda - o *azimute* - é o ângulo entre o plano que contém o eixo Z/N e o Pólo Norte Celeste, e o plano que contém o eixo Z/N e o astro.

A introdução feita a estas coordenadas justifica-se pela necessidade de mais adiante lhes ser feita referência. Por agora vejamos como se processam os movimentos da Terra.

7.1.2 - TEMPO SOLAR MÉDIO

A segunda lei de Kepler diz que o vector-posição de qualquer planeta, em relação ao Sol, varre em intervalos de tempo iguais, áreas iguais da órbita elíptica.

Na Fig. 7-2 são: S o Sol, ocupando um dos focos da elipse, T a Terra, P o Periélio, ou seja, o ponto da órbita mais próximo do Sol e A o Afélio, o ponto mais afastado.

A excentricidade da órbita está exagerada para que se possam observar os diferentes percursos com igualdade de áreas, portanto feitos em igualdade de tempos.

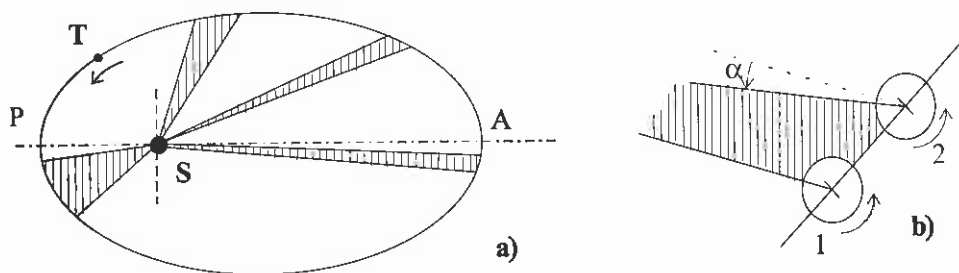


Fig. 7-2 O movimento de translação terrestre e a segunda lei de Kepler

Assim, ao longo do ano, as áreas varridas em cada 24 horas são iguais mas os percursos de translação são diferentes de dia para dia. A Fig. 7-2b) mostra a Terra nas posições 1 e 2, separadas de 24 horas, ou seja de uma rotação de 360° . Para que o Sol, com a Terra na posição 2, volte a passar pelo mesmo meridiano com que estava alinhado em 1, é preciso que a Terra rode, além dos 360° , de um pequeno ângulo α igual ao ângulo de varrimento desse dia. Isto, na metade do percurso de translação em que a Terra se afasta do Sol; na outra metade em vez de acrescentar o ângulo α há que o subtrair.

É este facto que, obrigando a Terra a um ângulo de rotação diária em relação ao Sol, variável de dia para dia, isto é, a um ângulo entre duas passagens consecutivas de qualquer meridiano terrestre pelo Sol, variável, origina a desigualdade dos dias ao longo do ano, que é característica do Tempo Solar Verdadeiro.

Dada a impossibilidade de os relógios mecânicos acompanharem esta irregularidade, houve a necessidade de se imaginar um Sol Médio que, com deslocamento angular aparente constante, possa, quatro vezes por ano, indicar a mesma hora que o relógio do tempo verdadeiro, o relógio de Sol. Nos intervalos entre estas datas (15 de Abril, 13 de Junho, 1 de Setembro e 25 de Dezembro) a hora solar média permanecerá alternadamente em avanço e em atraso, em relação à hora solar verdadeira, com uma diferença variável que pode ir até cerca de 16 minutos. Essa diferença, entre a hora verdadeira e a hora solar média tem o nome de **Equação do Tempo**.

A explicação apresentada é um pouco simplista; supôs-se o eixo de rotação terrestre perpendicular ao plano da órbita. Em rigor o Sol Médio é definido como *um ponto imaginário que se desloca para Leste sobre o Equador Celeste, completando o seu circuito na esfera celeste no mesmo período que o Sol verdadeiro o faz na Eclíptica*.

O tempo solar médio, referido ao meridiano de Greenwich, era, até há poucos anos, designado internacionalmente pelas iniciais GMT mas entretanto, à medida que as exigências de precisão requeridas para a definição do tempo foram crescendo, a noção que lhe estava subjacente perdeu significado e o GMT deu lugar ao UT, Tempo Universal (1925) e mais tarde ao UTC, Tempo Universal Coordenado (1972).

7.1.3 - A PRECESSÃO DOS EQUINÓCIOS

Conforme foi referido, a orientação do eixo de rotação terrestre não coincide com a do eixo perpendicular ao plano da órbita. Este último eixo corta a esfera celeste nos chamados *Pólos da Eclíptica*, dos quais o Pólo Norte se situa na região média da constelação do Dragão.

É esta direcção (Pólo Norte-Pólo Sul, da Eclíptica) que funciona como eixo de uma superfície cónica, com semi-abertura actual de cerca de $23^{\circ} 27'$, descrita pelo eixo da Terra, num período de aproximadamente 26 000 anos, durante os quais a semi-abertura variou entre $21^{\circ} 48'$ e $24^{\circ} 24'$. É o movimento de precessão terrestre (Fig. 7-3).

Na Fig. 7-3 PNE e PSE representam os pólos da eclíptica, Norte e Sul, e os pontos 1, 2 e 3 definem as orientações do Pólo Norte terrestre, há cinco mil anos, na actualidade e daqui por cinco mil anos, respectivamente.

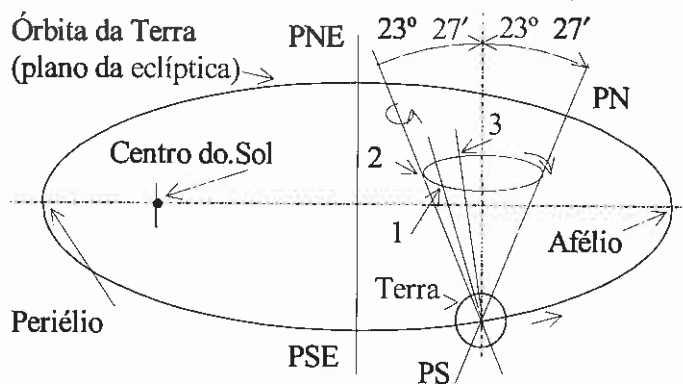


Fig. 7-3 Consequências do movimento de precessão dos Equinócios

De facto há cinco mil anos a direcção do Pólo Norte apontava para a estrela α da constelação do Dragão, daqui por cinco mil anos apontará para a estrela α da Cefeú e daqui por doze mil anos para a estrela Vega, a estrela α da Lira. Dentro de cada constelação designam-se as estrelas, por ordem decrescente do seu brilho, por meio de letras do alfabeto grego, assim a estrela α é sempre a de maior brilho dentro da constelação.

A curva geratriz da superfície cónica não é rigorosamente uma circunferência; o eixo da Terra, além do ângulo de $23^{\circ} 27'$ que faz com a perpendicular à órbita tem oscilações num e noutro sentidos, com $9''$ de amplitude, constituindo o movimento de nutação.

Uma massa isolada rodando em torno de um eixo que passe pelo centro de gravidade, se não for sujeita a outras acções, tem tendência a manter constante a orientação do eixo de rotação. Se lhe for aplicado um binário perpendicular a esse eixo surge o movimento de precessão.

No caso conhecido do pião, que gira apoiado pelo bico numa superfície plana, admitindo que o eixo não fica rigorosamente vertical, surge de imediato um binário formado pelo peso próprio e pela reacção do plano de apoio aplicada no bico, o qual tende a aumentar a inclinação do eixo. Neste caso o sentido do movimento de precessão é o mesmo do do movimento de rotação.

No caso da Terra o binário actua ao contrário: tende a que a direcção do eixo de rotação se torne perpendicular ao plano da órbita e, por esse motivo, os sentidos dos

movimentos de precessão e de rotação já são opostos. A presença deste binário é devida à desigualdade de distribuição da força atractiva, principalmente a do Sol, sobre a massa da Terra, motivada pelo achatamento polar que esta apresenta.

O movimento de precessão do eixo da Terra tem consequências que se reflectem na posição do Ponto Vernal. Com efeito, o plano do Equador, que é perpendicular ao eixo, é com ele arrastado no mesmo movimento de precessão. Como o Ponto Vernal nasce da intersecção deste plano com o da órbita, também este Ponto precessa, fazendo uma rotação completa nos referidos 26 000 anos. Em cada ano desloca-se assim de 50',27 e como o sentido da precessão é oposto ao da rotação (e da translação) acontece que quando a Terra está quase a completar uma volta em redor do Sol, o Ponto Vernal vem ao seu encontro e esse encontro dá-se assim um pouco antes de se completar a volta. É a precessão dos equinócios.

Quais são as consequências dessa precessão? Para se localizar uma estrela no céu há os chamados catálogos de estrelas, onde as suas posições aproximadas vêm indicadas através das duas coordenadas: declinação e ascensão recta.

Mas, para aplicações de rigor, como por exemplo à navegação, há que atender ao facto de que a variação, embora pequena, da posição do Ponto Vernal, fazer com que estas coordenadas variem também continuamente. Daí a necessidade da publicação anual dos Almanques Náuticos. Em Portugal foi publicado pela primeira vez em 1943, pelo Ministério da Marinha, mas teve vida breve, dado que há uma publicação congénere inglesa cujo uso está generalizado.

Outra consequência da precessão dos equinócios foi o desacerto gradual das estações do ano com as datas do calendário, o que já obrigou a várias revisões históricas dos calendários

Um outro desacerto, que parece nunca ter havido necessidade de corrigir, é o que existe, na Tradição Astrológica, com os signos do Zodíaco (doze constelações situadas numa faixa de 16° da esfera celeste, cortada a meio pelo plano da órbita da Terra, e regularmente distribuídas à volta de um eixo que lhe é perpendicular, o eixo dos Pólos da Eclíptica). Há cerca de dois mil anos, os signos tomaram o nome das constelações onde, em cada época do ano, o Sol se encontrava, isto é, onde o Sol seria visto, se o seu brilho e a difusão luminosa na atmosfera não impedissem de observar o fundo de estrelas que o cerca. Passados que foram esses anos, os signos encontram-se hoje deslocados cerca de 30° (um signo) em relação às constelações que lhes deram os nomes. Quando os manuais de Astrologia dizem que o Sol entra em Aries (Carneiro) a 21 de Março, nessa data ele está ainda em pleno signo anterior – Peixes –, onde entrou poucos dias antes! O atraso foi devido ao “roubo” anual dos 50',27, que acumulados durante 2 148 anos, somaram os 30° de um signo de Zodíaco; mas das consequências astrológicas de um tal lapso, sobretudo quando se pretende reconstituir a posição dos astros no Céu numa determinada data, só os entendidos no assunto poderão ajuizar...

7.1.4 - OS MOVIMENTOS DA TERRA

Se o período do movimento de rotação da Terra tem variado notavelmente ao longo dos anos, já o mesmo se não pode afirmar, relativamente ao movimento de translação,

cujo período admite uma variação de cerca de meio segundo por século. Este período costuma ser expresso em dias por ano; mas a propósito convém esclarecer de que *ano* se trata, pois que há pelo menos três formas de definir o que se entende por *ano*:

- *ano anomalístico*: o tempo que decorre entre duas passagens sucessivas da Terra por um ponto qualquer da órbita, por ex: o Periélio,
- *ano sideral*: o tempo que decorre entre duas passagens sucessivas do Sol, no seu movimento aparente, por um ponto fixo da esfera celeste,
- *ano trópico*: o tempo que decorre entre duas passagens consecutivas do Sol, no seu movimento aparente, pelo Ponto Vernal.

O primeiro é um tanto ou quanto teórico por ser difícil definir a posição da Terra num dado ponto da órbita, ponto a que ela de facto não regressa; o Sol, no seu movimento dentro da Galáxia, obriga a Terra a fazer não uma elipse mas uma epiciclóide. O ano sideral corresponde efectivamente ao verdadeiro período de translação da Terra, no entanto, para efeito da fixação de um calendário que regule a actividade humana, foi dada preferência ao ano trópico. É ele que faz coincidir regularmente as mesmas datas com as mesmas condições climáticas, sistematizando assim toda a actividade da subsistência humana.

Voltemos então ao problema da duração do ano, expressa, como foi referido, pelo número de dias nele contidos, no ano trópico obviamente. Admite-se hoje que, há dois mil anos, quando da elaboração do Calendário Juliano, o ano trópico teria 365,242 32 dias solares médios (e não os 365,25 então atribuídos).

Mais tarde, em 1582 por ocasião da elaboração do Calendário Gregoriano, foram obtidos e registados dados suficientes para que se possa hoje atribuir a esse ano a duração de 365,242 22 dias (e não os 365,242 5 atribuídos na época).

No início do ano 1900 um astrónomo norte-americano calculou meticulosamente a duração do ano trópico em 365,242 198 79 dias. Foi com base neste último número que se convencionou fixar a duração actual do segundo, atribuindo-se, naturalmente, 86 400 (24x60x60) segundos a cada dia.

Acontece que quase cem anos depois, o segundo está perfeitamente desactualizado; os dias de hoje têm a mais que os oitenta e seis mil e quatrocentos segundos, entre um a três milissegundos.

Uma vez que a duração do ano se pode considerar praticamente constante, como o número de dias por ano vem gradualmente diminuindo, pelo menos de há dois mil anos para cá, uma conclusão se impõe: a Terra gira cada vez mais devagar. É mesmo de admitir que em tempos recuados, tenha girado bastante mais depressa.

De facto, já Edmund Halley, descobridor do cometa com o seu nome, em princípio do século XVIII, notou discrepâncias sistemáticas entre as posições registadas de observação de antigos eclipses e as áreas de visibilidade previstas, baseadas na velocidade de rotação da Terra no seu tempo. Isso o levou a exprimir a opinião de que antigamente a Terra giraria mais depressa.

Emanuel Kant, filósofo e astrónomo, no fim do mesmo século, forneceu a explicação adequada, argumentando com a perda de energia representada pela fricção dos mares e dos ventos. Como consequência dessa diminuição de velocidade a Terra perde momento angular, mas como as leis da Mecânica exigem conservação deste momento, a

Lua compensa, afastando-se cada vez mais da Terra para manter assim o momento conjunto Terra-Lua. Este facto tem sido confirmado depois de, em 1964, os astronautas da missão Apollo terem deixado na superfície da Lua espelhos que, por reflexão de raios laser emitidos da Terra, permitem (1991) medir a distância da Terra à Lua com uma precisão inferior a 1 cm. Estima-se um afastamento anual da ordem dos 3 cm.

Conforme relata Stephen Jay Gould, da Universidade de Harvard, em "O Panda e o Homem," a maior velocidade de rotação terrestre noutras épocas foi, há algumas décadas, confirmada pelos trabalhos de dois paleontólogos: o chinês Ting Yin Mei e o inglês John West Wells. O primeiro, nos anos trinta, descobriu em corais fósseis, anéis de crescimento sazonal. Isto é, acontece com os corais, fenómeno semelhante ao que acontece com as árvores e os seus anéis de crescimento, que aparecem nas secções praticadas nos troncos; naturalmente por o crescimento, tanto de corais como de árvores, ser mais acentuado nas épocas quentes do ano.

O segundo, o inglês Wells, em 1960 observou os mesmos anéis em corais, fósseis como recentes, e, com instrumentos de observação com poder de resolução superior, conseguiu notar entre anéis consecutivos um número enorme de lâminas correspondentes ao crescimento diário. Nos corais fósseis (com 370 milhões de anos) o número andava sempre próximo de 400, enquanto que nos corais recentes se aproximava de 360. Em ambos os casos se admite que, sendo embora os corais elementos típicos dos mares tropicais, em alguns dias por ano o Sol estivesse encoberto.

7.2 - CALENDÁRIOS E ERAS

Bem cedo, no alvor dos tempos, os homens observaram a repetição cíclica de fenómenos climáticos e a sua influência na criação de alimentos, quer vegetais quer animais.

A observação do céu e as conclusões dela retiradas, constituindo os rudimentos da primitiva Astrologia – mãe da Astronomia – são quase tão antigos como o próprio homem.

Os fenómenos cíclicos que primeiro chamaram a sua atenção foram: o dia, que sucede à noite, o mês, ligado às fases da Lua e o ano, resultante da variação gradual da altura do Sol e por consequência das fases do clima.

Não admira pois que as primeiras tentativas de sistematização de todos estes conhecimentos, ou seja da elaboração dos primeiros calendários, fossem baseadas, quer no fenómeno lunar, quer no fenómeno solar, quer ainda em ambos; dando assim origem a três tipos de calendários: os lunares, os solares e os lunissolares.

O calendário lunar, o mais simples de todos, foi o primeiro a ser utilizado. Cada mês principiava com a Lua nova e tinha 29 ou 30 dias, alternadamente. Não havia assim uma relação fixa com o ano das estações. O calendário muçulmano, que ainda vigora, data o início no dia 16 de Julho do ano 622 d.C. à Era de Maomé ou Hégira, palavra que em árabe significa fuga e está relacionada com a fuga de Maomé de Meca para Medina.

O calendário solar procura que o ano do calendário esteja de acordo, tanto quanto possível, com o ano das estações, desprezando as fases da Lua. Foi deste tipo o calendário egípcio e também o calendário romano, que boa parte do Mundo acabou por herdar.

O calendário lunissolar procura manter-se de acordo, simultaneamente com as fases da Lua e com as estações do ano, através da adição de um 13 mês. O calendário judaico, que ainda hoje é seguido, é o principal deste tipo.

7.2.1 - O CALENDÁRIO ROMANO

Teve início no ano em que, tradicionalmente, se situa a fundação de Roma: o ano 753 a.C. Era a princípio uma espécie de calendário lunar com dez meses, de cujos nomes derivaram os nomes actuais, de Março a Dezembro. Mais tarde foi estabilizado com a adição de mais dois meses, Janeiro e Fevereiro, colocados no início do ano.

Como os meses eram lunares, o número de 12 era ainda insuficiente para manter a paridade com as estações e, de quando em quando, as autoridades mandavam acrescentar mais um mês, para tentar conservar essa paridade.

As datas que aparecem escritas, referentes a esse período, tem a seguir ás letras representativas do ano as iniciais A.U.C., isto é, AD URBE CONDITA, ou seja desde a fundação da cidade (de Roma).

O ano 46 a.C., ou seja, o ano 708 A.U.C., ficou celebrenemente designado como o ano da confusão, tal era a descoordenação a que se chegara, devido à imperícia de quem tinha manejado o calendário. Assim, o imperador Júlio César, a conselho de Sosígenes de Alexandria, deixou correr o ano 46 durante 445 dias, iniciando no dia seguinte a Era de César, ou seja, para nós, o ano 45 a.C. e, simultaneamente, o **CALENDÁRIO JULIANO**.

Foi então abandonado o calendário lunar e atribuído ao ano a duração de 365,25 dias. É óbvio que a parte decimal deste número só podia ser cumprida pela adição aos 365 dias, de mais 1 dia, de quatro em quatro anos. Eram os anos bissextos.

Quanto ao nome dos meses e ao número de dias de cada mês, eram já os que actualmente usamos. A semana de sete dias foi introduzida muito mais tarde, no tempo do imperador Constantino, em 321 d.C.

A Era de César projectou-se por vários séculos, ultrapassou o nascimento de Cristo e a sua substituição pela Era de Cristo, só no Século VI foi decretada pela Igreja, tendo nos diversos países cristãos a substituição ocorrido lentamente.

7.2.2 - A ERA HISPÂNICA

Na Península Ibérica toda a documentação produzida nos treze séculos que se seguiram à dominação romana, está datada em moldes diferentes dos da Era de César. O imperador César Augusto, talvez para comemorar o fim de quase duzentos anos de luta, resolveu instituir nova era para a Península: a Era Hispânica, cujo Ano I foi o ano 38 da

Era de César. A Era Hispânica foi abolida pela Igreja em 1351 mas, embora abolida, manteve-se até 1422 (D. João I). Assim, em relação a todos os acontecimentos históricos registados até 1422, para serem referidos à Era de Cristo é preciso subtrair à data assinalada, 38 anos e não 45.

7.2.3 - O CALENDÁRIO GREGORIANO

O Calendário Juliano continha um erro (por excesso) na avaliação do número de dias atribuídos ao ano (trópico). Conforme já foi referido o número de dias atribuído ao ano foi de 365,25 em vez de 365,242 32. Essa diferença foi-se acumulando e nos 400 anos que decorreram até 325, data do Concílio de Niceia, originou um atraso de três dias, do Calendário em relação às estações do ano.

O Concílio decidiu que a Páscoa deveria passar a ser celebrada no mesmo dia – um Domingo – por toda a cristandade. Deixou porém à Igreja o encargo de encontrar o modo de fixação desse Domingo. Ficou ainda decidido fixar no dia 21 de Março a passagem do Sol pelo Ponto Vernal.

Reformular o Calendário de forma a estabiliza-lo e a manter no mesmo dia do ano as passagens sucessivas do Sol pelo Ponto Vernal, não era tarefa fácil. Talvez por isso, é que só passados 1257 anos sobre o Concílio de Niceia, um espírito esclarecido, como o do Papa Gregório XIII que fora anteriormente professor na Universidade de Bolonha, se abalçou à reforma do Calendário.

Para o efeito reuniu uma comissão constituída por notáveis astrónomos, matemáticos e homens da Igreja. O relatório dos trabalhos dessa comissão foi publicado em 1588 por um dos componentes, Cristóvão Clavius, num volume com 800 páginas.

A base dos trabalhos da comissão foi um livro intitulado *Compêndio do Novo Plano para a Restituição do Calendário* escrito, após dez anos de trabalhos, por Luigi Lilio, professor de Medicina na universidade de Perugia, falecido em 1576, ano em que foi formada a comissão. É-lhe atribuído o cálculo da duração do ano trópico em 365,242 5 dias, e constitui ainda hoje um mistério como pôde ter chegado a um valor tão próximo do valor real que, ao tempo seria de 365,242 22.

A diferença entre o valor de Lilius e o do Calendário Juliano: gerava, como se referiu, um avanço de 3 dias em 400 anos. A solução adoptada foi a de suprimir três anos bissextos em cada 400 anos. A regra da definição dos anos a considerar como bissextos passaria a ser: *são bissextos os anos divisíveis por 4 com excepção dos terminados em 00, que não sejam múltiplos de 400*. Por ex.: entre 1701 e 2101 não são bissextos os anos: 1800, 1900 e 2100, visto que 2000, sendo divisível por 400, é bissexto. O ano ficou assim com $365 + 97/400 = 365,242\ 5$ dias.

O problema de fixar no dia 21 de Março a passagem do Sol pelo Ponto Vernal foi resolvido encurtando de 10 dias o ano que corria, de 1582. Embora o atraso do Calendário Juliano, desde o seu início fosse de cerca de 14 dias, a circunstância de o Concílio de Niceia ter escolhido para a passagem do Sol pelo Ponto Vernal exactamente a data em que isso acontecia no próprio ano de 325, fez com que bastasse suprimir 10 dias, ou seja o

atraso ocorrido apenas entre 325 e 1582. E foi assim que no ano de 1582, à quinta-feira dia 4 de Outubro, último dia do Calendário Juliano, sucedeu a sexta-feira dia 15, primeiro dia do Calendário Gregoriano.

A fixação deste acontecimento (a passagem do Sol pelo Ponto Vernal) é extremamente importante para a Igreja pois através dela é marcado o Domingo de Páscoa, com o qual estão ligadas todas as datas móveis de comemoração. Além disso até há bem poucos anos era hábito, sobretudo das populações rurais, regular as tarefas agrícolas por datas consagradas pela Igreja a determinados santos.

Apenas a título de curiosidade resta acrescentar que o Domingo de Páscoa é o primeiro Domingo após o décimo quarto dia de idade da Lua (aproximadamente Lua cheia) que cair, ou no dia do equinócio ou no imediatamente a seguir. Diversos cientistas, entre os quais o matemático Gauss tentaram achar uma regra que, através da descoberta de uma sequência cíclica, permitisse a determinação expedita da data do Domingo de Páscoa. Sabe-se apenas que a Páscoa pode calhar em qualquer Domingo entre 21 de Março e 26 de Abril e que incrivelmente, há de facto uma sequência, mas que se repete em ciclos com um período de 5 750 000 anos...

Os proponentes do Calendário admitiam que ele seria válido pelo menos durante 3 500 anos, data em que o Ponto Vernal estaria atrasado de um dia em relação ao dia 21 de Março; no entanto o cálculo é optimista visto que ao tempo não se conhecia o encurtamento gradual, embora pequeno, que sofre o ano trópico. Uma validade de 2 400 anos está mais próxima da realidade.

A reforma gregoriana do Calendário foi promulgada pelo Papa através da Bula "Inter Gravíssima", de 24 de Fevereiro de 1582, para ter início a partir de 15 de Outubro desse mesmo ano. A aceitação do Calendário foi imediata nos países de religião católica: Itália, Espanha e Portugal (por Decreto-Régio de 24 de Setembro de 1583); na Inglaterra e suas colónias de então (E.U.A. incluídos) só aconteceu em Setembro de 1752 quando o atraso já era de onze dias. Os países da Europa oriental aderiram no século XIX, quando o atraso atingiu os treze dias. No Japão a reforma do Calendário foi adoptada em 1873 e na China em 1911, embora aqui a ratificação governamental tivesse que esperar até 1949. Na U.R.S.S. o Calendário Gregoriano só veio a ser aceite em 1919 e daí que a revolução conhecida como de Outubro, tenha de facto acontecido em Novembro.

7.2.4 - DATA JULIANA (JD)

A Data Juliana não é propriamente um calendário mas sim uma forma expedita de designar um qualquer dia, tendo em vista apenas a sucessão natural dos dias e sem obediência a qualquer periodicidade. Foi em 1582 que Joseph Justus Scaliger, um dos obreiros do Calendário Gregoriano, tomou a iniciativa de numerar os dias na sequência da sua sucessão, escolhendo para início da contagem o meio dia de 1 de Janeiro de 4713 a.C.

Pensa-se que a escolha desta data estaria relacionada com uma interpretação demasiado literal da Bíblia, que na época, e mesmo em séculos posteriores, pretendia fixar naquele dia a data da "Criação do Mundo".

Era um sistema de contagem já com um certo carácter científico pois não só fixava facilmente uma data, de forma a poder ser aceite pelos diversos calendários existentes,

como ainda simplificava a marcação de datas correspondentes a fenómenos periódicos, conhecido o tempo decorrente entre eles. A título de curiosidade acrescenta-se que à data de 1 de Janeiro de 2000, ao meio dia, corresponde 2 451 545 JD.

7.2.5 - DATA JULIANA MODIFICADA (MJD)

Recentemente a conveniência da utilização de um tal sistema foi de novo posta em foco, pela necessidade de relacionar com o tempo fenómenos cuja duração se estende por meses ou por anos. É por exemplo o caso da marcha dos relógios atómicos. Assim e para simplificar, diminuiu-se para cinco o número de algarismos que caracterizam cada dia deslocando o início da contagem para as zero horas UTC do dia de 17 de Novembro de 1858. Foram assim retirados à JD 2 400 000,5 dias. Ao dia 1 de Janeiro de 2000, às zero horas, cabe a data 51 544 MJD. Tanto na JD como na MJD uma fracção de um dia exprime-se, não em horas minutos e segundos, mas na forma decimal.

7.3 - INSTRUMENTOS PARA MEDIR O TEMPO

7.3.1 - RELÓGIOS DE SOL, RELÓGIOS DE ÁGUA E AMPULHETAS

O primeiro instrumento usado na medição do tempo foi o relógio de Sol; desde a forma mais simplificada de uma vara espetada verticalmente no solo, que marcava as horas em função do comprimento da sombra, até às versões mais científicas, que surgiram no século XVI. São, de uma forma geral, relógios, que usando a sombra de um limbo paralelo à direcção do eixo da Terra, produzem deslocamentos angulares da linha de sombra, aproximadamente proporcionais ao tempo, ou seja: permitem construir mostradores com intervalos angulares horários, regulares.

Existem ainda em museus varas egípcias para medir o tempo, da época do faraó Tutmés III (1500 a.C.).

Os egípcios dividiam o dia em 12 horas e a noite em outras tantas; os romanos, de início com uma divisão do dia mais simplificada, acabaram por usar a divisão egípcia, que depois nos transmitiram.

Embora em épocas muito recuadas a actividade humana cessasse praticamente durante a noite, o problema da medição do tempo no período nocturno, breve se pôs. Assim, os primeiros relógios nocturnos foram os relógios de água, nos quais a quantidade de água que gotejava de um reservatório com um orifício no fundo, servia de medida. Deste tipo de relógios, que os egípcios começaram a construir por volta do ano 1000 a.C., existem ainda alguns exemplares.

As ampulhetas de areia são um pouco mais tardias, cerca de 500 anos. A sua utilização não se generalizou tanto quanto a dos relógios de água, devido a problemas

tecnológicos: no fabrico do vidro, na modelação da forma específica, como ainda na secagem da areia e na obtenção da hermeticidade necessária.

Há notícia que o imperador Carlos Magno teria uma ampulheta que só precisava de ser invertida de 12 em 12 horas!

O reinado da ampulheta floresceu durante a Idade Média, ultrapassou-a, e prosseguiu durante algum tempo; pelo menos como instrumento de navegação para medir a velocidade dos navios, através da contagem do número de nós, equidistantes, praticados no cabo de uma barquinha que se deitava ao mar, e que passavam pela mão do operador durante o funcionamento de uma ampulheta. Daí o nó (uma milha por hora) ser hoje ainda a unidade de medida da velocidade dos navios. Normalmente a ampulheta era de trinta segundos e a distância entre os nós, que teoricamente seria de $1852/120 = 15,43$ m ($1/120$ é a fracção da hora que corresponde aos 30 s) era na prática ligeiramente encurtada, para 14,61 m para corrigir o deslocamento que a barquinha sofria durante a medição.

A ampulheta usou-se na Marinha de Guerra portuguesa até 1807, mas já só para regular os períodos de quarto das tripulações.

7.3.2 - RELÓGIOS MECÂNICOS

Os primeiros relógios mecânicos tiveram origem nos conventos e nos mosteiros e destinavam-se a lembrar aos monges os tempos consagrados à oração. Eram dispositivos simples, formados por um fio enrolado num tambor, ao qual estava preso por uma das extremidades, e tendo um peso fixado na outra, que obrigava o fio a desenrolar. Não tinham mostrador e limitavam-se a dar um sinal auditivo. Funcionavam apenas durante um certo tempo e estavam ainda muito longe do funcionamento contínuo. Em geral um dos monges dormia junto ao relógio, acordava, e ia depois tocar o sino para acordar os restantes.

Para que os relógios pudessem trabalhar durante as vinte e quatro horas seria necessário dispor de um economizador no desenrolar do fio. Esse apetrecho surgiu por volta de 1330, com a adição de um escape, isto é, um órgão que impede normalmente o desenrolar do fio e só o permite periodicamente e por curtos instantes. O primeiro utilizado foi o escape chamado *de barra*. Era um mecanismo imperfeito constituído por uma barra oscilante que periodicamente engrenava ou travava o desenrolar do fio.

Foi destes intervalos que nasceu a ideia de dividir a hora em minutos e, bem mais tarde, os minutos em segundos. A divisão em 60 partes é herança babilónica.

Os primeiros relógios de funcionamento contínuo foram instalados nas catedrais; o mais antigo é o da catedral de Estrasburgo, instalado em 1350, o da catedral de Salisbúria, na Inglaterra é de 1380 e é o mais antigo ainda funcionando, o da catedral de Wells, no mesmo país, foi montado em 1392 e remodelado em 1500, passando a bater horas e quartos de hora.

Mas o grande impulso, no que respeita à precisão, veio com a aplicação do pêndulo ao mecanismo de escape. Foi o holandês Christian Huygens que em 1656 construiu o primeiro relógio de pêndulo. Para se avaliar da importância deste melhoramento basta referir que, anteriormente, era corrente um relógio apresentar um erro diário de cerca de

15 minutos, enquanto que, poucos anos após a morte de Huygens, esse erro estava reduzido a 10 segundos.

Um outro obstáculo era ainda preciso ultrapassar: a criação do relógio transportável. O problema interessava especialmente à navegação. Na determinação da posição do navio, a latitude era relativamente fácil de encontrar, quer pela medição da altura máxima do Sol (ao meio dia verdadeiro local), quer pela medição da altura da Estrela Polar, que é praticamente igual à latitude, salvo uma correcção inferior a 1°. O grande problema era o da determinação da longitude.

Medindo a altura do Sol e aguardando o momento em que ela atinge o seu valor máximo, determina-se, nesse momento, o meio-dia local. Se no mesmo instante tivéssemos conhecimento da hora no meridiano de referência (Greenwich), pela diferença das duas horas obtinha-se a longitude do lugar.

O problema era pois como “conservar” a hora do meridiano de referência, transportada num navio, onde o pêndulo estava, obviamente, interdito.

Por causa desse problema perderam-se navios e perderam-se armadas; diversos monarcas e alguns governos chegaram até a oferecer prémios a quem conseguisse realizar a hora transportável.

Sabia-se que já em 1410 um serralheiro italiano construía um relógio accionado por uma mola em forma de fita, enrolada sobre si própria; mas havia um problema: o relógio, com tal motor, tinha um andamento mais lento à medida que a mola se ia desenrolando.

Deve-se a Robert Hooke a ideia de substituir o escape até aí usado e chamado “de barra” pelo escape de âncora (que equipa ainda actualmente os relógios mecânicos), o qual sendo mais perfeito, deixa apenas passar um dente a cada oscilação do sistema formado pela roda de balanço e pela mola em espiral – inventada em 1665 por Huygens –, tornando o andamento do relógio praticamente independente do binário exercido pela mola motora.

Mas, como muitas vezes acontece aos descobridores, não foram Huygens nem Robert Hooke que ganharam o prémio pecuniário de 20 000 libras oferecido em 1735 pelo Parlamento Britânico; um mecânico, fabricante de relógios, John Harrison, aplicando as descobertas anteriores, realizou em termos práticos o primeiro relógio que obedecia às exigências do proponente do prémio; candidatou-se mas só ao fim de algumas dezena de anos, em 1773, é que conseguiu receber a totalidade do prémio.

7.3.3 - RELÓGIOS DE QUARTZO

Uma lâmina de quartzo, cortada segundo planos fazendo certos ângulos com as direcções dos eixos da estrutura cristalina, e metalizada em duas faces opostas, constitui um condensador eléctrico, que sendo normalmente um elemento passivo, se transforma em elemento activo, por virtude das propriedades piezoeléctricas do quartzo. Consistem essas propriedades, basicamente, na deformação do dieléctrico (a lâmina de quartzo) face à presença de um campo eléctrico, ou melhor, face à presença de carga nas armaduras do

condensador e, vice-versa: ou seja, a produção de carga no condensador em resultado de deformação mecânica imposta ao dieléctrico.

Por outro lado um pedaço de quartzo, ou de qualquer outra substância sólida, tem as suas frequências próprias de vibração mecânica. Podemos observá-las face, por exemplo, a um pudim de gelatina. Se ao prato que o contém for dado um impulso horizontal, durante alguns instantes assiste-se a uma oscilação lateral, da face de cima do pudim em relação à base. Se o choque inicial tivesse sido dado na direcção vertical, haveria oscilações nessa direcção, naturalmente com frequência diferente. Podemos afirmar que o pudim *pode ser excitado em vários modos de vibração*.

É exactamente o que acontece com o quartzo. Intercalada a lâmina de quartzo devidamente metalizada em posição estratégica no circuito de um oscilador electrónico, sintonizado para uma frequência próxima de uma das frequências próprias do quartzo, é esta última frequência que acaba por se impor no oscilador.

Acontece que, havendo embora diversas substâncias piezoeléctricas mais sensíveis que o quartzo, é ele que apresenta a melhor estabilidade, especialmente no que respeita à temperatura. Esta característica pode ser optimizada por três vias: escolhendo para o corte do cristal ângulos adequados, encerrando o cristal no vácuo e situando-o dentro de um invólucro com a temperatura estabilizada.

Os relógios de quartzo atingiram as melhores condições de funcionamento nos anos quarenta e cinquenta, mantiveram a hora, tanto do tempo sideral como do GMT, nos observatórios astronómicos e só a partir do meio da década de cinquenta é que começaram a ser substituídos pelos relógios atómicos. Nos anos setenta, tendo perdido a primazia nos observatórios astronómicos, substituíram os relógios mecânicos em toda a gama de aplicações que estes últimos detinham.

A precisão de um bom relógio de quartzo pode atingir 1 parte em 10^{12} ; mas apenas durante em períodos curtos. Para funcionamento permanente este valor baixa 10^9 ou mesmo 10^8 .

7.3.4 - RELÓGIOS ATÓMICOS

A primeira realização neste campo data de 1948. Não se tratou propriamente de um relógio atómico mas sim de um relógio molecular. Foi construído nos E.U.A., no NBS (actualmente NIST) e baseou-se na molécula do amoníaco. Esta molécula – NH_3 – tem a forma de uma pirâmide com base triangular formada pelos três átomos de hidrogénio. No vértice da pirâmide, a uma certa distância do plano desses três átomos e equidistante deles, situa-se o átomo de azoto. O estado energético da molécula é diferente, consoante este átomo se encontra frente a uma ou à outra das faces do plano. Convenientemente excitado o átomo de azoto fará, por segundo, cerca de $2,387 \times 10^{10}$ oscilações, entre as duas referidas posições.

De entre muitos átomos experimentados o átomo de cézio 133 mostrou ser dos que apresenta uma frequência de oscilação mais estável, quer a curto quer a longo prazo, e uma reprodutibilidade de 10^{-14} e isso levou à sua escolha como base do padrão de tempo. No entanto é bom não esquecer que no campo científico nada é definitivo; o maser de

hidrogénio tem reprodutibilidade de 2×10^{-15} (1 segundo em 16 milhões de anos) e as cavidades supercondutoras apresentam valores da ordem de 5×10^{-16} , embora, um e outras, a curto prazo.

Em 1967-68, na 13ª CGPM o segundo foi definido como a duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre dois níveis hiper finos do átomo de césio 133 no estado fundamental. Em 1997 a CIPM acentuou que a definição se referia ao estado fundamental à temperatura termodinâmica de 0 K.

O césio, como outros átomos alcalinos, tem um único electrão de valência cujo momento de spin pode estar alinhado em direcção paralela, ou anti-paralela, com a direcção do momento angular nuclear. É da transição entre estes dois estados energéticos W_1 e W_2 que resulta a oscilação com a frequência f_0 referida.

$$W_1 - W_2 = h f_0$$

O relógio de césio 133 está esquematicamente representado na Fig. 7-4:

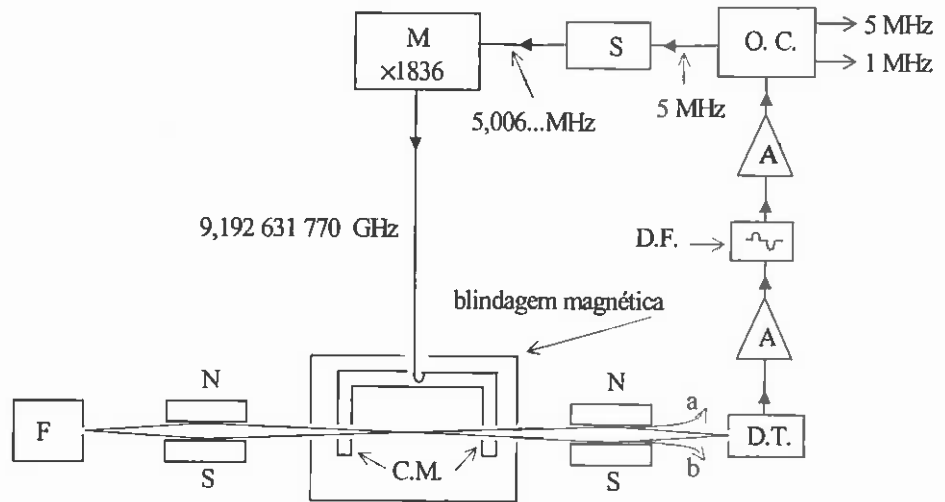


Fig. 7-4 Representação esquemática do relógio de césio

Na figura são:

F - fonte, mantida a 100 °C, de onde sai um jacto de vapor de césio

N-S - ímãs deflectores, por gradiente da indução magnética

CM - cavidades ressonantes de micro-ondas

DT - detector (de tungsténio) da chegada de átomos de césio

A - amplificador

DF - detector de fase

OC - oscilador de cristal (de quartzo)

S - sintetizador

M - multiplicador de frequência

A fonte de césio, os imãs, as cavidades ressonantes e o detector de tungsténio estão inseridos num invólucro onde se faz o vácuo.

O átomo de césio sai da fonte, num jacto fino de vapor, entra no primeiro imã com gradiente ($B \cong 1T$) e, conforme a orientação do momento de spin do electrão, é deflectido para cima ou para baixo (na figura). Entra, a seguir na primeira cavidade ressonante onde pode sofrer inversão do momento de spin do electrão.

Como os sinais da frequência estimulante, aplicada nas duas cavidades, estão praticamente em fase, quando esta frequência for igual à frequência de transição do átomo, ele não volta a sofrer inversão ao atravessar a segunda cavidade. E então, quando atravessar o segundo imã sofre deflexão oposta à da passagem no primeiro imã, quando o seu momento de spin tinha outra orientação, e vai dirigido de forma a entrar no orifício do detector.

Se as frequências, da cavidade e da transição são diferentes, o mais provável é que o momento de spin do electrão não sofra qualquer inversão ao passar por um e por outro imã, indo então deflectir-se no mesmo sentido em ambas as passagens e acabando por ser dirigido para fora do detector (percursos *a* ou *b*). É menos provável, mas poderá também sofrer deflexão em ambas, e terá o mesmo destino.

Assim o caudal de átomos de césio será máximo quando as duas frequências forem iguais, e o átomo sofra apenas uma deflexão; sendo isso conseguido por ajuste automático da frequência da micro-onda, orientado para levar o receptor a uma saída máxima.

O ajuste da frequência processa-se através da acção do detector de fase sobre o oscilador de 5 MHz, que como todos os osciladores comandados a quartzo, permite a imposição de ligeiras variações da frequência. É desta frequência de 5 MHz que, por multiplicação se obtém a frequência que alimenta as cavidades ressonantes e, por divisão, a frequência de 1 MHz, a qual juntamente com a de 5 Mhz constituem propriamente as saídas do relógio de césio.

O detector é constituído por uma pequena câmara com uma fenda na entrada e, frente a ela, um fio de tungsténio incandescente. Os átomos de césio colidem com o fio, ionizam-se por acção da temperatura elevada, e o átomo, ou melhor, o ião positivo é atraído para uma placa vizinha do filamento, mantida a potencial negativo em relação a ele, por um gerador adicional. Um microamperímetro no circuito dessa placa dá indicação proporcional ao número de átomos de césio entrados por segundo.

Para se obter um pico agudo na resposta do detector, de modo a permitir uma boa definição da frequência, as duas cavidades devem estar afastadas entre si, pelo menos de dois a três metros. É importante referir que toda essa zona (limitada na figura por um rectângulo a tracejado) está submetida a uma indução magnética uniforme B , que pode ser variada desde 0 até cerca de 10 μT . Destina-se esta fraca indução a que, por efeito de Zeeman, os dois níveis energéticos já referidos se desdobrem: um em 9 sub-níveis e outro em 7. Excitando algumas das várias transições hiper finas presentes, por meio de espiras existentes na zona da indução magnética, consegue-se medir essa indução e, com ela corrigir a frequência fundamental f_0 , até ao milihertz, ou seja com a precisão de 10^{-14} .

$$f_0 = 9\ 192\ 631\ 770 + 4,27...B^2 \text{ Hz}$$

Esta indução, da ordem de alguns microteslas, pode ser variada e funciona assim como uma “regulação fina” da frequência, que pode compensar desvios de frequência calculáveis, inerentes a problemas da estrutura mecânica que suporta o relógio de césio bem como outros tipos de desvios.

Acresce ainda que por virtude do fenómeno relativista da influência do campo gravitacional na duração de qualquer acontecimento, a frequência dos relógios de césio teve que ser corrigida em função da altitude a que se encontravam, como ainda em função da latitude, para compensar a aceleração devida à rotação terrestre. Só assim foi possível comparar as frequências de dois relógios de césio em situações diferentes.

Obs. 1 A descrição apresentada corresponde ao tipo de relógio de césio construído nos finais da década de setenta, o Cs5. Diversos melhoramentos foram introduzidos e embora com a mesma base teórica foram posteriormente produzidos : o NBS 6 e, já nos anos noventa, o NIST7. O erro previsto para este último é de um segundo em três milhões de anos

Obs. 2 – Entre outras fontes de fenómenos periódicos que poderão vir a substituir o relógio de césio, estão determinados tipos de lasers, cuja reprodutibilidade é já da mesma ordem de grandeza.

7.4 - OS DIVERSOS TEMPOS

As várias escalas de medir o tempo costumam ser referenciadas por outras tantas siglas. Vejamos em pormenor a que corresponde cada uma delas.

7.4.1 - GMT TEMPO MÉDIO DE GREENWICH

A noção de Tempo Médio de Greenwich e a respectiva sigla tiveram início em 1767, data em que o Real Observatório de Greenwich publicou pela primeira vez o “Almanaque Náutico”, contendo tabelas com a posição dos astros, referidas ao tempo solar de Greenwich.

A expressão *Tempo Solar Médio* surgiu posteriormente e significa um tempo definido pelo *Sol Médio*, que é um ponto imaginário da Esfera Celeste que, sobre o Equador Celeste, se desloca para Leste, completando o seu circuito na Esfera Celeste, no mesmo período de tempo que o Sol verdadeiro o faz na Eclíptica.

É o tempo que até 1960 (embora já designado Tempo Universal – TU, desde 1925) servia de base a, praticamente, toda a actividade humana, corrigido evidentemente, para os diferentes fusos horários.

Igualmente as tabelas com dados astronómicos para uso nos observatórios e na navegação, eram sempre referidas ao GMT; com excepção de uma ou outra, referidas especificamente ao Tempo Sideral.

A hora de Greenwich era definida como a vigésima quarta parte do tempo decorrido entre duas passagens (superiores) do Sol Médio pelo meridiano de Greenwich. Acontece que o movimento de rotação da Terra tem irregularidades, muito pequenas é certo, mas que não foram tidas em conta na hora GMT. Quando se chegou à necessidade de definir períodos de tempo com duração garantida até ao milésimo de segundo, ou melhor ainda, foi preciso estabelecer o tempo em bases mais precisas.

Até 1911 usava-se em Portugal o tempo médio local, fornecido pelo Observatório Astronómico de Lisboa (Ajuda). Por decreto de 26 de Maio de 1911, Portugal –bem como outros países– aderiu ao sistema dos fusos horários que desde 1893 dividiu a esfera terrestre em fusos de 15° contados a partir do meridiano de Greenwich, passando a ter a hora do fuso principal (Greenwich), embora Lisboa estivesse já um pouco fora dele. Como consequência disso, a partir de 1 de Janeiro de 1912 todos os relógios, no País, foram adiantados de 36 mn 44,68 s. A hora legal continuou a ser fornecida: em Lisboa pelo O.A. da Ajuda, no Porto pelo relógio do Palácio da Bolsa e no resto do País pelos relógios das Estações de Caminhos de Ferro. Tudo isto diz o referido decreto.

O O.A. da Ajuda adquiriu o primeiro relógio de cézio no fim da década de setenta o qual, devido ao facto da gradual evaporação do dito metal, foi por mais que uma vez substituído. Em 1997 possuía um conjunto de quatro relógios de cézio.

O Instituto Português da Qualidade adquiriu em 1987 um relógio de rubídio. O rubídio é um metal alcalino com um ponto de fusão próximo do do cézio e tem, como ele, um electrão de valência. Quando um feixe de micro-ondas de frequência apropriada é aplicado ao ^{87}Rb alguns átomos regressam do estado $F=2$ ao nível hiper fino $F=1$. À variação de energia associada corresponde uma frequência com a qual se faz entrar em ressonância a frequência da micro-onda. Esse facto é detectado, tal como acontece na lâmpada de cézio, por um pico na corrente de uma fotocélula. A frequência base do relógio de rubídio é de 6 834 682 613 Hz e a sua estabilidade é de cerca de uma parte em 10^9 , embora em períodos curtos (um mês) possa atingir uma parte em 10^{11} .

Trata-se efectivamente de um relógio secundário, mas há a acrescentar que o relógio do IPQ tem a possibilidade de ser controlado por um receptor de rádio anexo, que capta sinais provenientes de um emissor da rede internacional do tempo.

Posteriormente o IPQ adquiriu relógios de cézio e em 1999 já possuía um conjunto de três, a partir dos quais enviava regularmente ao BIPM a diferença (expressa em nanosegundos) entre o UTC – Tempo Universal Coordenado, a referir adiante – e o UTC do próprio laboratório em Monte de Caparica.

7.4.2 - TEMPO SIDERAL

A sigla convencionada para este tempo é ST. A hora sideral é definida como a vigésima quarta parte da duração de tempo entre duas passagens superiores consecutivas do meridiano de Greenwich pelo Ponto Vernal. É uma hora importante para os

observatórios astronómicos e também para a navegação. É conservada por relógios com uma marcha ligeiramente diferente da dos relógios do tempo solar.

O dia sideral é mais curto que o dia solar médio cerca de 3 mn 56 s por, no movimento de translação ao longo de um ano, a Terra dar uma rotação a mais em relação às estrelas (leia-se Ponto Vernal), do que em relação ao Sol.

O tempo sideral é determinado nos observatórios astronómicos por meio da *luneta fotográfica zenital*. Trata-se de um instrumento que trabalha fixo, com o eixo óptico disposto verticalmente, portanto apropriado para fotografar estrelas com declinação próxima da latitude do lugar em que está instalado. A passagem dum astro no meridiano dá-se quando a imagem do astro coincide com uma linha reticular da luneta, orientada de Norte para Sul. Nesse instante a hora sideral do lugar deve ser igual à ascensão recta do astro. A primeira, a hora sideral do lugar, lê-se directamente no relógio sideral do observatório – se para ela estiver regulado – ou, se estiver regulado para Greenwich, combina-se a hora sideral de Greenwich com a longitude do lugar; a segunda, isto é a ascensão recta, tira-se de tabelas astronómicas. Se não forem iguais (a hora sideral do lugar e a ascensão recta), corrige-se a hora sideral, que fica assim com um erro em geral inferior a 0,003 s.

A fotografia de astros, mesmo com películas especialmente sensíveis, necessita de tempos de exposição da ordem de uma ou duas dezenas de segundos. O movimento aparente dos astros, ampliado pela luneta – e muito mais se se tratar de um telescópio – deixa na película um traço, em vez do ponto representativo do astro a fotografar. Por este motivo as películas fotográficas são montadas num suporte que durante a exposição se desloca com velocidade constante e numa direcção tal que acompanha o movimento aparente e permite fixar assim na película a posição dos astros no momento inicial do disparo.

A partir dos anos setenta as películas fotográficas foram, em muitos telescópios, substituídas por captadores electrónicos de imagem, semelhantes aos usados em televisão mas mais sensíveis que as películas.. Na década de oitenta a introdução dos dispositivos designados por C.C.D. (charge coupled device) como receptores de imagem, diminuiu o tempo de exposição para cerca de uma trigésima parte do tempo necessário para as melhores películas, embora à custa de alguma diminuição do poder resolvente, relativamente a estas.

7.4.3 - UT TEMPO UNIVERSAL

Até 1925 os astrónomos utilizavam o Tempo Médio de Greenwich, e consideravam o dia como tendo início às 12 horas; a partir desse ano surgiu a designação “Tempo Universal” para o Tempo Médio de Greenwich, mas com o início do dia, à meia noite. A sigla GMT continuou no entanto a ser usada, sobretudo nas publicações náuticas, até mesmo já com o significado de UT, isto é, com o início do dia às 0 horas.

Por volta de 1930 a perfeição atingida pelos relógios de pêndulo permitiu descobrir pequenas diferenças sazonais na velocidade de rotação da Terra. Essas diferenças foram

sendo melhor conhecidas e na década de cinquenta, com os relógios de quartzo, mais evidentes se tornaram.

Como resultado de um estudo mais aprofundado dessas irregularidades no movimento da Terra, foi proposta em 1955 a separação do UT em três escalões: UT0, UT1, e UT2:.

UT0 – é o Tempo Solar Médio do meridiano de Greenwich, tal como é obtido por observação astronómica directa,

UT1 – é o UT0 depois de corrigido do efeito de pequenos movimentos da Terra em relação ao seu eixo de rotação (variação polar),

UT2 – é o UT1 depois de corrigido dos efeitos da flutuação sazonal da velocidade de rotação da Terra.

A variação polar é lenta e difícil de prever, visto depender de fenómenos atmosféricos envolvendo movimento de grandes massas de ar e de água, como furacões, tornados etc.. Na realidade, os pontos de encontro do eixo real de rotação com a superfície da própria Terra – os Pólos verdadeiros – não são pontos fixos, relativamente à rede de paralelos e meridianos que balizam a sua superfície; antes descrevem ao longo do tempo, em cada Pólo, uma espécie de espiral irregular, resultante da composição de dois movimentos: um anual, portanto com período de 12 meses e outro com um período de aproximadamente 14 meses. Registos dessa deslocação dos Pólos, desde 1931, mostram que ela pode ser inscrita numa circunferência com 11 metros de diâmetro, centrada no respectivo Pólo geográfico, ou seja, no ponto de encontro de todos os meridianos.

A flutuação sazonal na velocidade de rotação está ligada ao facto de a Terra, no seu movimento de translação, se situar a uma distância do Sol (que ocupa um foco da trajectória elíptica) variável durante o ano, ficando assim a sua velocidade de rotação sujeita a uma travagem por efeitos de maré, também variável. Convém notar que uma flutuação na velocidade de rotação, que é mantida durante períodos da ordem do mês ou mais, pode traduzir-se numa variação angular da mesma ordem de grandeza da que resulta da variação polar.

São pois estas as causas do movimento irregular típico da Terra que a Fig. 7-5 mostra.

No gráfico representa-se, em ordenadas, Δd (expresso em milisegundos), que é a contribuição sazonal para a diferença entre um dia na escala de UT0 e 86 400 segundos e em abcissas estão representados os meses do ano.

Na evolução sazonal representada vê-se que a duração do dia no Periélio (Dezembro, Janeiro) é um

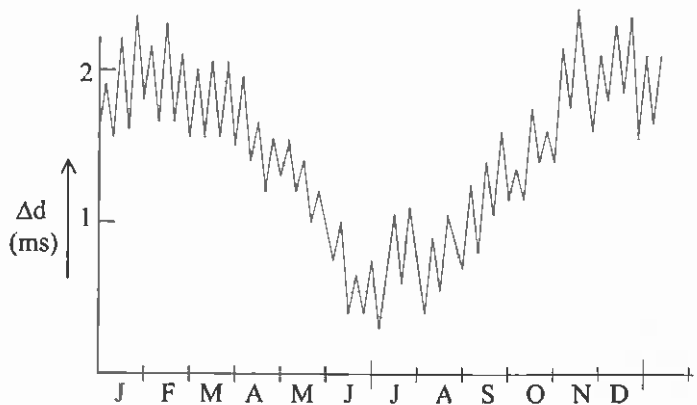


Fig. 7-5 Diferença típica entre a duração de um dia e 86 400 segundos, ao longo do ano

pouco maior do que no Afélio (Junho, Julho); consequência de uma travagem do movimento de rotação mais intensa, quanto mais perto do Sol a Terra se encontrar. Além disso o período da rotação terrestre está ainda sujeito, por razões conhecidas, a uma evolução permanente, que se traduz por um acréscimo fixo da duração do dia de cerca de dois milissegundos e por uma oscilação cíclica significativa de amplitude irregular. Como resultado final, pode referir-se que o período de rotação terrestre, além dos 86 400 segundos básicos, somados à variação sazonal representada, teve a mais um acréscimo lentamente variável de: 1,2 ms entre 1955 e 1965, 2,8 ms entre 1965 e 1985, 1,4 ms entre 1985 e 1990 e daí em diante de 2,3 ms.

7.4.4 - ET TEMPO DAS EFEMÉRIDES

Nenhuma das três escalas do UT apresenta um comportamento linear, ou seja, um comportamento que se ajuste à ideia de um fluir contínuo do tempo; a UT0 porque está cheia de irregularidades, a UT1 transmitindo só as irregularidades sazonais e a UT2 que, sendo a mais linear de todas, está ainda eivada de variações a longo prazo.

Por esta e por outras razões foi definida em 1950 uma nova escala de tempo, designada por *Tempo das Efemérides*. É um tempo definido em termos da translação da Terra à volta do Sol – muito mais regular de que o movimento de rotação – um tempo que decorre uniformemente e se exprime em dias, horas, minutos e segundos como os outros tempos, e em que cada segundo vale $1/31\,556\,925,974\,7$ da duração que o ano trópico tinha no início do ano de 1900. Teve início às 0 horas de 1 de Janeiro de 1950.

Esta definição do segundo foi baseada na duração do ano trópico na transição do século XVIII para o século XIX, a qual foi calculada, com os melhores meios da época, pelo astrónomo norte-americano Simon Newcomb. A duração encontrada foi de 365,242 198 79 dias e se for multiplicada pelos 86 400 segundos de cada dia, resulta no número que está no denominador na fracção que define o segundo. A CGPM deu o seu acordo a esta definição do segundo em 1960 na 11ª CGPM.

A importância deste tempo fez com que as principais publicações náuticas e astronómicas, tanto inglesas como norte-americanas, a partir de 1960 passassem a incluir tabelas com as posições do Sol, da Lua e dos planetas em função do tempo das efemérides.

Conforme também já se referiu os dias actuais já não têm os 86 400 segundos dessa época mas têm a mais, variando com a época do ano, entre 1 a 3 milissegundos. O Tempo das Efemérides é pois um tempo que não convém para regular actividades civis; está ligado ao movimento de translação, e para isso seria mais conveniente um tempo ligado ao movimento de rotação.

A medição do ET, ou se quisermos, a comparação entre o UT1. e o ET é feita aproveitando a grande regularidade do movimento, aproximadamente mensal, da Lua em relação à esfera celeste. Para isso a Lua é fotografada sobre um fundo de umas tantas estrelas e, pela medição, na fotografia, de distâncias entre essas estrelas e pontos notáveis do mapa da Lua, calcula-se a ascensão recta e a declinação do centro desse Astro, para o instante UT1 do início da exposição fotográfica. Por outro lado, com dados tirados do

Almanaque Náutico é possível calcular o instante ET correspondente a essa posição, e avaliar assim a diferença entre os dois tempos.

Dado que os movimentos aparentes das estrelas e da Lua são diferentes, o dispositivo de arraste da película montado nos telescópios, e já referido, não é suficiente para fixar ambas as imagens. O problema foi resolvido nos anos cinquenta por E. Markowitz, director do Serviço de Tempo do Observatório Naval dos E.U.A., com a montagem, no centro do suporte da película, de um filtro de vidro escuro, pouco maior que a imagem da Lua e que, gradualmente inclinado por meio de um motor, mantém estacionária, por variação do ângulo de refração, a imagem da Lua em relação às das estrelas.

Resumindo, pode afirmar-se que o ET não está representado por nenhum relógio mas apenas é aferido por medições astronómicas regulares. Daí a presença da palavra Efemérides.

Em princípio de 1950 ele estava adiantado cerca de 32 s sobre o UT1, em 1960 o avanço era de 35 s e em 2000 ultrapassa os 60 s. A diferença entre estes tempos é passível de ser calculada retrospectivamente, abrangendo várias centenas ou mesmo milhares de anos, com base em relatos históricos de fenómenos celestes com data e hora razoavelmente definidas. Há mesmo programas informáticos elaborados a partir de dados históricos, que permitem conhecer a diferença ET - UT desde 1620 ou ainda mais atrás, com menor precisão.

A partir de 1979 a designação *Tempo das Efemérides* foi alterada para *Tempo Dinâmico* ou mais concretamente *Tempo Dinâmico Terrestre*, com a sigla TDT, o qual, dada a circunstância de ter sido escolhida para o Tempo Atómico Internacional TAI (a referir adiante) a mesma unidade de tempo pode relacionar-se com ele por meio de uma expressão simples:

$$\text{TDT} = \text{TAI} + 32,184 \text{ s}$$

As razões de fundo desta mudança prendem-se com considerações de ordem relativista que se traduzem na alteração do ritmo dos relógios sempre que o observador se desloca face ao relógio ou sempre que os potenciais gravitacionais de ambas as posições sejam diferentes. Adiante serão apontados mais esclarecimentos.

7.4.5 - TAI TEMPO ATÓMICO INTERNACIONAL

Desde 1921 que a URSI (União Internacional Rádio Científica) tem tido como uma das principais preocupações a medição exacta das frequências das ondas de rádio. Mas para medir frequências com rigor é preciso, antes do mais, dispor de osciladores estáveis. E foram as pesquisas nesse sentido que levaram os físicos ao oscilador ligado ao átomo de cézio.

As primeiras experiências com o chamado relógio de cézio vêm relatadas num artigo intitulado: "An Atomic Standard of Frequency and Time Interval", publicado por L. Essen e J. V. L. Parry em *Nature*, vol 176, 1955.

Experiências posteriores foram realizadas em Inglaterra, com dois relógios, um construído no NPL (Inglaterra) e outro nos E.U.A., no Observatório Naval de Washington. A diferença observada entre as duas frequências foi, em termos relativos, de 2 partes em 10^{10} , diferença explicável e susceptível de correcção, em parte.

Perante uma tal precisão, para se criar um tempo atómico baseado no oscilador de céσιο, pôs-se pergunta: que escala de tempo seria mais conveniente usar? A resposta é evidente: o Tempo das Efemérides, que sendo baseado no movimento de translação da Terra, flui regularmente, sempre igual a si próprio.

Como resultado do trabalho conjunto levado a cabo pelas duas entidades referidas, foi estabelecido para a frequência do oscilador de céσιο o valor médio de $9\,192\,631\,770 \pm 20 \text{ Hz}$.

O intervalo de indeterminação de $\pm 20 \text{ Hz}$ não foi motivado por insuficiências técnicas de medição; na verdade estava-se perante um facto que mais tarde se iria repetir, em relação a outras unidades: imprecisão no conhecimento da própria unidade, neste caso o segundo.

Inicialmente o segundo foi definido como a fracção $1/86\,400$ do dia solar médio; mais tarde face à dificuldade em marcar contornos precisos a este dia, transferiu-se a definição (1961, 11ª CGPM) para o ano trópico e o segundo passou a ser a fracção $1/31\,556\,925,974\,7$ do ano trópico no início do ano 1900. Mas também esta base era limitativa e pouco cómoda de trabalhar; Assim, uma solução se impunha: abandonar a base de carácter astronómico e ligar a dimensão do segundo a um fenómeno físico conhecido e facilmente reprodutível. O fenómeno escolhido foi precisamente a transição no átomo de céσιο 133 e assim foi fixado em $9\,192\,631\,770$ o número de ciclos da transição referida, para perfazer o segundo (13ª CGPM -1967) e que, com esta definição, é uma das unidades básicas do Sistema Internacional: o segundo SI.

Fixada que foi a frequência, ou o que é o mesmo, o número de períodos contidos num segundo, o tempo atómico é aquele que menos tem a ver com a Astronomia; e o que mais tem a ver com a Física. Nesta ordem de ideias, a CGPM desde 1971 que vinha mostrando interesse em colaborar na fixação do TAI. A partir de então houve participação nos trabalhos através de um representante que o BIPM passou a ter no BIH (Bureau Internacional da Hora)

Após consultas ao Observatório de Paris (sede do BIH) e à Direcção do BIH, a CIPM decidiu que o BIPM podia assumir a responsabilidade pelo TAI, deixando para o BIH tudo o que tivesse relação com os movimentos da Terra. Este esquema foi aprovado em 1987 pela CGPM e pela assembleia geral das entidades científicas que suportam o BIH

Todavia esta venerável instituição, que teve início em França em 1913 e foi internacionalizada em 1920, teve o seu epílogo em 1 de Janeiro de 1988, pela integração no IERS (International Earth Rotation Service).

Desde 1955, data em que os relógios de céσιο entraram em funcionamento contínuo, que o BIH tem providenciado a transmissão, via rádio, de sinais de tempo, nas frequências então usadas para comunicações a longa distância (3 a 30 kHz). A precisão desses sinais era então de cerca de 1 ms e a escala de tempo era designada pelas siglas TA

ou TA(BIH). A sigla TAI de Tempo Atómico Internacional só apareceu em 1970 quando começou a colaboração internacional para a fixação deste tempo.

Entre 1969 e 1972, na preocupação de respeitar a frequência nominal do relógio de céσιο que servia de base ao TA, este tempo era estabelecido por meio de uma média simples entre os cerca de sete laboratórios mundiais que possuíam relógios de céσιο. O Tempo Atómico Internacional, TAI, foi criado em 1970 a partir do BIH e em 1973 o BIH já coordenava, através de um algoritmo, um conjunto de numerosos TA nacionais, de forma a permitir que o TAI pudesse já ser lido com a precisão de alguns décimos de microsegundo.

Entretanto, diversos melhoramentos introduzidos nos relógios atómicos, bem como nos métodos de avaliação da frequência de funcionamento, e especialmente a comparação com a frequência dos relógios alemães do PTB, permitiram concluir que a frequência do TAI mostrava tendência para se elevar, pelo que tem sido objecto de correcções sucessivas.

Assim, no início de 1977 sofreu um decréscimo de 1 parte em 10^{13} . A partir de 1980 a CCDS (Comissão Consultiva para a Definição do Segundo – do BIPM) determinou que o TAI passasse a ser obtido por aplicação de uma correcção à EAL (Escala Atómica Livre). Esta escala, por sua vez, é que passou a ser objecto de correcção internacional, obtida por aplicação do algoritmo *Algos* (que privilegia os TA com maior estabilidade) aos TA dos diversos países, num total de cerca de 200 relógios (1999), a maioria dos quais de tipo comercial, existentes em 50 laboratórios. Estas correcções têm sido definidas pelo BIPM com base na marcha de um pequeno número (6 ou 7) de relógios de céσιο, que alguns laboratórios (BIPM, PTB, NIST e outros) construíram com extremo rigor e cujos dados são cuidadosamente corrigidos dos erros próprios deste tipo de relógios e também da influência relativista dos potenciais gravitacionais das respectivas posições. Porém a partir de Julho de 1996 a precisão da EAL tem sido baseada principalmente nas frequências de 3 relógios:

- o LPFT-FO1 do BNM-LPTF de Paris,
- o NIST-7 do NIST em Boulder, Colorado, E.U.A.,
- e o PBT Cs2 do PBT, em Braunschweig, Alemanha

A correcção da EAL para obtenção do TAI é definida a intervalos de dois meses e aplicada, se necessário. De 1984 a 1989 não houve qualquer correcção, porém a meio deste último ano, houve várias correcções, num total de 3 partes em 10^{14} . No fim da década de noventa as correcções são poucas e de apenas uma parte em 10^{15} .

O BIPM publica mensalmente a chamada “Circular T” que contém os dados que os diversos laboratórios colhem, a intervalos regulares de cinco dias, expressos em MJD, e lhe enviam sob a forma de indicações tais como: UTC-UTC(k) , TAI-TA(k), – sendo os tempos afectados de (k) os referentes ao laboratório que envia –, diferenças entre os valores das frequências base do EAL e do TAI, bem como o cálculo da correcção a aplicar ao EAL, se necessário, e ainda dados referentes ao GPS e ao “GLONASS time” o sistema russo do tempo e dos satélites.

A Influência Relativista

Para melhor se avaliar da influência da Relatividade na marcha dos relógios atômicos, pode citar-se que de dois relógios notáveis, um situado em Boulder, Co, E.U.A. à altitude de 1650 m e outro em Greenwich, na Inglaterra à altitude de 25 m, o primeiro adianta-se em relação ao segundo, de 5 μ s por ano. No entanto cada relógio atômico, qualquer que seja a sua localização, está sempre previsto para funcionar na frequência que serviu de base à definição do segundo SI; apenas para comparação de marchas se corrige o cálculo, tendo em atenção os efeitos relativistas do potencial gravitacional, da velocidade e de outros factores.

Conforme já foi referido, em 1979, a designação *Tempo de Efemérides (ET)* foi substituída por *Tempo Dinâmico Terrestre (TDT)*, que ficou definido como:

$$TDT = TAI + 32,184 \text{ s}$$

Além deste tempo “dinâmico” surgiu também a sigla TDB, (*Tempo Dinâmico Baricêntrico*), que é definido como sendo o TDT corrigido para o baricentro do Sistema Solar; enquanto que o ET, ou o TDT, ou o TAI são tempos referidos à superfície da Terra. O TDB é usado na integração de equações dos problemas de movimento da Mecânica Celeste.

Nesta ordem de ideias, em 1980, o CCDS (do BIPM) declarou: *O TAI é uma escala de tempo coordenada, definida segundo uma referência geocêntrica com o segundo como unidade, tal como é realizado sobre o geóide em rotação. Além disso, pode ser extensível até um ponto fixo ou móvel na vizinhança da Terra com precisão suficiente, no estado actual do conhecimento, pela aplicação das correcções de primeira ordem da Teoria da Relatividade Generalizada; isto é, as correcções para a diferença no potencial gravitacional e para a diferença na velocidade, além das devidas pela rotação da Terra.*

Em 1991, na reunião da IAU (União Astronómica Internacional), foi-se mais adiante, ampliando-se a definição do TAI, com vista a aplicações espaciais: *O TAI é uma escala de Tempo realizada cuja forma ideal, à parte uma diferença de 32,184 s, é o Tempo Terrestre – TT (sucessor do TDT), ele próprio ligado ao tempo coordenado de referência geocêntrica TGC (Geocentric Coordinate Time) por uma relação (de frequência) constante.*

A importância da Teoria da Relatividade Generalizada na metrologia do espaço-tempo foi posta em evidência pela Assembleia Geral da IAU reunida em 1997, que recomendou a criação de uma Junta Comité BIPM/IAU com diversas funções, entre as quais: *estabelecer uma estrutura relativista coerente para todas as actividades respeitantes a sistemas de referência no espaço-tempo e a metrologia e, ainda, estabelecer definições e convenções e desenvolvê-las em termos de aplicação prática.*

O aperfeiçoamento da sincronização de relógios atômicos situados em posições afastadas, com vista à comparação das respectivas marchas, tem sido uma preocupação constante. Em 1969 foi instalado nos E.U.A. o sistema para definir a localização de navios, conhecido pela designação LORAN-C. Um dos emissores desse sistema, situado em Cape Fear, na costa Leste, com a frequência de 100 kHz controlada pelos relógios atômicos do U.S.N.O. (United States Naval Observatory) era recebido na Europa e

permitia sincronizar relógios com um erro de algumas centenas de nanosegundos; posteriormente a 1980 o G.P.S. (Global Position System) com os seus 24 satélites – cada um com um relógio de céσιο (ou rubídio) – em órbitas a cerca de 20 200 km de altitude, permitiu reduzir o erro para vinte a trinta nanosegundos, para distâncias intercontinentais e para dois a três nanosegundos dentro de um mesmo continente.

Estes satélites, em frequências de cerca de 1,2 GHz e de 1.5 GHz, emitem entre outros sinais, sinais de tempo: o Tempo GPS, que não coincide exactamente com o TAI. De facto, no chamado “ponto zero” do Tempo GPS, às 0 horas do dia 5 de Janeiro de 1980, havia uma diferença entre o TAI e o UTC (Tempo Universal Coordenado, a referir adiante) de 19 segundos e como se pretendeu fazer nesse ponto Tempo GPS = UTC, ficou daí em diante

$$\text{TAI} - \text{Tempo GPS} = 19 \text{ s} + C_0$$

sendo C_0 uma correcção variável, calculada diariamente no BIPM com dados fornecidos pelo Observatório de Paris e que é da ordem de grandeza de uma ou duas dezenas de nanosegundos.

7.4.6 - A COORDENAÇÃO DOS TEMPOS

Desde que os relógios atómicos estiveram aptos a funcionar em regime contínuo (1955), que se sentiu a necessidade de transmitir, em especial à navegação e à aviação, sinais horários rigorosos, de acordo com as novas possibilidades.

Foi já referido o acréscimo que, ao longo dos séculos, sofreu o chamado dia solar médio. Se se persistir na ideia de que um dia deva ter exactamente 86 400 segundos será preciso prever um segundo “elástico”, isto é, sujeito a uma variação, se não contínua, pelo menos revista anualmente. Outra solução seria a de flexibilizar o quantitativo de segundos atribuídos ao dia. A primeira solução já teve a sua época, pelo menos no que respeita aos sinais de tempo para a navegação, a segunda começou a ser aplicada a partir de 1972.

7.4.7 - O SEGUNDO “ELÁSTICO”

Os problemas derivados do aumento gradual da duração dos dias, só se tornam notados se a precisão exigida para o conhecimento do tempo, for igual ou superior à ordem do milissegundo.

Até há poucos anos era a navegação que precisava de um segundo mais rigoroso, digamos com uma precisão da ordem do décimo de segundo; a vida civil e o cidadão comum bastava-lhes conhecer o tempo com um erro inferior a meio minuto, e hoje mesmo, com a divulgação do relógio de quartzo, pode conhece-lo com erro de poucos segundos. Para uma e para outro a noção de Tempo Médio de Greenwich –GMT– era mais do que suficiente. Mas nos últimos decénios, com o aparecimento de sistemas de rádio-localização de navios e de aeronaves, de comando de veículos espaciais com percurso programado, para não falar já de satélites e dos problemas do seu lançamento,

todos eles dependentes de sinais de tempo adequados e precisos, houve que rever as bases em que fora definido o segundo.

Voltando um pouco atrás no tempo, recorde-se que anteriormente a 1960 o segundo era definido como a fracção $1/86\ 400$ do dia solar médio. Com o abrandamento gradual do período da rotação terrestre e com a necessidade de definir o tempo com maior precisão, houve que referir o segundo a um tempo mais estável. Assim, em 1960 a UAI redefiniu o segundo como sendo a fracção $1/31\ 556\ 925,974\ 7$ do ano trópico no início de 1900, definição que foi sancionada na 11ª CGPM.

Na Assembleia Geral da URSI em 1960 foi decidido recomendar ao B.H.I. (Bureau Internacional da Hora), instituição ligada aos observatórios astronómicos, que fomentasse as necessárias medidas astronómicas, de forma a poder anunciar o valor da variação a aplicar à frequência base do átomo de céσιο, para que, o mesmo número de oscilações originasse um segundo que multiplicado por 86 400 preenchesse o dia solar médio do ano de 1961. E, logicamente, a necessidade dessas medidas iria continuar nos anos seguintes. Por outras palavras, procurou-se baixar a frequência, relativamente à frequência base, de modo a que a escala de tempo resultante se aproximasse da escala UT1.

Compreende-se esta preocupação; a frequência acima indicada referia-se a um "segundo" obtido dividindo a duração do ano trópico de 1900 pelo número de segundos que o ano conteria se atribuíssemos a cada dia 86 400 segundos. Ora como de ano para ano os dias vão sendo cada vez maiores, será lógico que para manter as relações do dia para a hora, da hora para o minuto e do minuto para o segundo, se vá talhando este último, cada vez mais longo. E isso implica uma revisão anual da frequência da onda, cujos 9 192 631 770 períodos compõem o segundo.

Em termos práticos, à frequência base da transição entre os dois níveis hiper finos do estado fundamental do átomo de céσιο 133, passou a ser aplicado, por via electrónica ou até electromecânica, um "offset", ou seja uma variação anualmente estabelecida pela U.A.I.. Por exemplo, em 1962 foi de -130 partes em 10^{10} e em 1967 foi de -300 partes em 10^{10} , o que equivale a uma diminuição de frequência de cerca de 118 Hz no primeiro caso e de 276 Hz no segundo. E assim se fez durante vários anos: o B.H.I. publicava em cada ano o valor do decréscimo a aplicar no ano seguinte à frequência base do relógio de céσιο.

A partir de 1960 diversas estações de rádio, encarregadas de difundir sinais horários, começaram a ter as frequências da onda portadora comandada, directa ou indirectamente, por meio de osciladores de céσιο. Tratava-se principalmente de estações nas bandas de v.l.f. (3 kHz a 30 kHz), de l.f. (30 kHz a 300 kHz) e algumas na banda de h.f. (3 Mhz a 30 MHz).

Até ao fim de 1971 a coordenação entre o TA e o UTC era realizada conforme ficou exposto: um decréscimo na frequência base emitida, calculado para cada ano, de modo a tornar o dia solar médio desse ano 1 a 3 milisegundos maior que o de 1900.

Este esquema apresentava vários inconvenientes. Nos primeiros anos da coordenação (1957/8) algumas estações emissoras trabalhavam com a frequência da portadora ligada à frequência base, enquanto que outras, especialmente as de v.l.f., aplicavam o "offset". Como os impulsos de tempo são em regra obtidos por subdivisão da portadora, acontecia que os sinais das primeiras estações perdiam sincronismo em relação aos das segundas. Isso levou a que o BIH decidisse que as estações trabalhando sem

“offset” na portadora teriam que acertar os seus sinais pelas restantes, de modo a que o seu erro não fosse além de 50 ms.

Por outro lado estava-se perante uma situação falsa: o facto de o segundo, ter sido estabelecido com uma determinada duração, e o intervalo entre impulsos consecutivos representativos do mesmo segundo, e emitidos via rádio, ser ligeiramente maior.

No entanto houve muitas estações que emitiram sempre sem aplicar o “offset” podendo mesmo afirmar-se que nos fins da década de 60 era essa a tendência; e mesmo as estações que emitiam sinais de tempo, não aplicavam o “offset” à onda portadora mas apenas à formação dos sinais de tempo, em conformidade com a autorização concedida na assembleia plenária da C.C.I.R. reunida em Oslo em 1966.

7.4.8 - O TEMPO UNIVERSAL COORDENADO

A vigência do segundo “elástico” terminou no último dia do ano de 1971, quando a diferença entre o TA. e o UT1 era de exactamente 10 s. A 1 de Janeiro de 1972 deu-se início, por decisão do BIH a uma nova forma de coordenação.

Acabou o “offset” e todas as estações que emitiam sinais de tempo passaram a estar ligadas à frequência base do relógio de céσιο. O UTC passou a ter segundos iguais aos do TA, mas como o TA flui mais depressa do que permite a rotação terrestre, intercala-se de tempos a tempos um segundo extra, ficando assim o minuto que o recebe, com 61 segundos. De preferência, essa inclusão ocorrerá no último minuto de 30 de Junho ou de 31 de Dezembro ou ainda, como segunda opção, de 31 de Março ou de 30 de Setembro. Em qualquer dos casos é sempre emitido pelo BIH (IERS a partir de 1988) um aviso com antecedência de, pelo menos, três meses.

Desde o início da nova forma de coordenação foi acrescentado um segundo a mais, ao último minuto em cada uma das seguintes datas, a que correspondem os seguintes desvios $\Delta = \text{TAI-UTC}$:

Data	Δ (s)	Data	Δ (s)
30 de Junho de 1972	11	30 de Junho de 1983	22
31 de Dezembro de 1972	12	“ “ “ “ 1985	23
“ “ “ “ 1973	13	31 de Dezembro de 1987	24
“ “ “ “ 1974	14	“ “ “ “ 1989	25
“ “ “ “ 1975	15	“ “ “ “ 1990	26
“ “ “ “ 1976	16	30 de Junho de 1992	27
“ “ “ “ 1977	17	“ “ “ “ 1993	28
“ “ “ “ 1978	18	“ “ “ “ 1994	29
“ “ “ “ 1979	19	31 de Dezembro de 1995	30
30 de Junho de 1981	20	30 de Junho de 1997	31
“ “ “ “ 1982	21	31 de Dezembro de 1998	32

É a solução que continua em vigor e que, na verdade, é do tipo da que já vinha sendo aplicada de há dois mil anos para cá; com a intercalação do dia 29 de Fevereiro, de quatro em quatro anos, dando origem aos anos bissextos.

A formação do UTC é feita com base no UT1 e no TAI; no UT1 por ser o tempo que, ligado à rotação terrestre, melhor representa o compromisso com as actividades que necessitam de uma definição exacta do ângulo de rotação, e que são, a navegação e os observatórios astronómicos; no TAI porque representa a precisão e a regularidade.

A formação do UTC obedece pois às seguintes regras, conforme foram definidas pela C.C.I.R. (Comissão Consultiva Internacional de Rádio):

- Diferença TAI-UTC = n segundos, sendo n inteiro ou zero
- Diferença $\Delta t = |UT1 - UTC| \leq 0,9$ s
- Acréscimo de 1s no UTC, feito com intervalos de 12 a 18 meses,
- Possibilidade imediata de se conhecer o tempo a menos de 0,1 s.

Esta última possibilidade resulta da acentuação por meio de um impulso duplo, dada a um, ou a mais, dos primeiros dezasseis impulsos de segundo, a partir do início de cada minuto. Assim, a acentuação do primeiro até ao oitavo, indica avanço de UT1 sobre UTC, à razão de um décimo de segundo por cada impulso acentuado; a acentuação do nono ao décimo sexto indica atraso de um décimo de segundo, por cada impulso acentuado a partir do nono.

Depois de 1973 os sinais de tempo de algumas estações norte-americanas são emitidos com a precisão de 1 μ s, mas para serem recebidos é preciso dispor de um decodificador especial. Estes sinais são destinados principalmente a instituições de carácter científico.

Actualmente são muitas as estações de rádio que emitem sinais de tempo, geralmente na forma de impulsos modulados de curta duração. Algumas estações emitem continuamente durante as vinte e quatro horas; outras com horários determinados, por vezes apenas durante alguns períodos do dia.

De entre as estações mais antigas, susceptíveis de serem captadas em Portugal citam-se:

- Rugby, inglesa, em 60 kHz,
- Droitwich, inglesa, em 200 kHz
- WWV, norte-americana, em 5 - 10 - 15 - 20 e 25 MHz
- Estações russas de Novosibirsk, em 4,996 - 9,996 e 14,996 MHz.

As estações WWV de 5 MHz e de 10 MHz funcionam durante as 24 horas do dia e conseguem ouvir-se com qualquer receptor mediano.

O AMPERE (O VOLT, O FARAD E O OHM)

O trabalho exaustivo de uma comissão do BIPM que nos anos trinta concluiu pela escolha do ampere, como quarta unidade para completar o elenco das unidades fundamentais do sistema MKSA, parece ter sido gorado. De facto, embora continuando a ocupar a posição de unidade de base, o ampere é hoje uma das unidades que, medida directamente, pior reprodutibilidade apresenta. Aliás a sua medição directa, feita na chamada *balança de correntes*, ou com recurso ao *coeficiente giromagnético do protão*, está virtualmente posta de lado; devido não só às correcções a que obriga, inerentes à geometria dos dispositivos físicos utilizados, mas também ao facto de, no primeiro caso, exigir um conhecimento local e actualizado do valor da aceleração da gravidade.

Actualmente são objecto de medição absoluta directa, baseada apenas no conhecimento aprofundado de algumas constantes universais: o volt, o farad e o ohm.

Acresce ainda que o ampere não é uma unidade susceptível de representação directa através de um padrão físico; ao contrário do que acontece por exemplo com o volt, que tem na pilha de tipo Weston um representante quase imediato (a força electromotriz da pilha excede em pouco o volt), ou com o ohm, que facilmente se materializa na forma de uma bobina de fio.

Por isso o ampere foi conservado nos laboratórios através de pilhas de tipo Weston e de resistências feitas de material com resistividade de baixo coeficiente de temperatura.

Anteriormente a 1960, admitia-se que um bom conjunto de pilhas padrão, de tipo Weston, era capaz de manter sem alteração, durante anos, o valor da média das forças electromotrizas individuais. Assim, tanto o BIPM como os principais laboratórios nacionais, procuravam, por medições absolutas, em balanças de corrente ou de tensão ou ainda pelo coeficiente giromagnético do protão, corrigir periodicamente o valor da força electromotriz que era atribuído à média do conjunto das suas pilhas padrão. Nesta ordem

de ideias, o BIPM reunia com regularidade: pilhas, resistências (1Ω e $10\,000\ \Omega$) e condensadores-padrão ($10\ \text{pF}$ e $0,1\ \mu\text{F}$), de várias proveniências e comparava-os sistematicamente.

Só o advento em 1959 e em 1962 de novos métodos de determinação absoluta de capacidades e de diferenças de potencial, permitiu uma maior concordância entre os padrões das unidades fundamentais do BIPM e os dos laboratórios nacionais mais importantes: NPL da Inglaterra, ETL do Japão, PTB da Alemanha, LCIE de França, IMM da U.R.S.S. e NBS (posteriormente NIST, National Institute of Standards and Technology) dos E.U.A..

Dessa data em diante subsistiram ainda algumas comparações periódicas, mas destinadas principalmente ao grande número de países que, por razões de ordem económica ou por darem prioridade a outro tipo de problemas, precisavam de recorrer à comparação internacional.

A importância destes novos métodos foi tal, que o próprio BIPM decidiu corrigir o valor que até aí atribuía ao volt, diminuindo-o em $11\ \mu\text{V}$. E foi assim que a partir de 1 de Janeiro de 1969 se criou o volt designado por $V_{69-BI} = V_{B.I.P.M.} \times (1 - 11 \times 10^{-6})$, e um pouco depois em 1976, por razões a referir mais adiante, se fez nova correcção com o acréscimo de $2,5\ \mu\text{V}$, surgindo assim o V_{76-BI} .

O volt tem sido conservado nos laboratórios por meio de conjuntos de pilhas de tipo Weston, cuja força electromotriz é avaliada periodicamente; embora haja tendência de as pilhas serem gradualmente substituídas por dispositivos electrónicos de referência, baseados no díodo de Zenner, os quais fornecem tensões fixas de 1V e de 10V e, ainda, uma tensão ajustável, com o valor médio de $1,0180\ \text{V}$.

O ohm é representado por resistências de manganina (84% de Cu+13% de Mn+3% de Ni) mantidas em banho de óleo a temperatura regulada, sendo de tempos a tempos a sua estabilidade comprovada por comparação com resistências de platina à temperatura do ponto triplo da água.

8.1 - OS PRIMITIVOS AMPERES

Desde 1881 que o ampere é definido como a décima parte da unidade electromagnética CGS de corrente eléctrica. No entanto, como o sistema CGS electromagnético foi estabelecido com base no conceito puramente teórico de massa magnética, o ampere não era facilmente realizável por essa via.

Assim, em 1893 no Congresso de Electricidade de Chicago e em 1908, na Conferência Internacional de Londres, foi criado, como representação prática do ampere absoluto, o *Ampere Internacional*, ou seja, a corrente que depositava por electrólise $1,118\ \text{mg}$ de prata por segundo.

Convém, no entanto, frisar que nestas conferências se manteve a definição teórica do ampere absoluto.

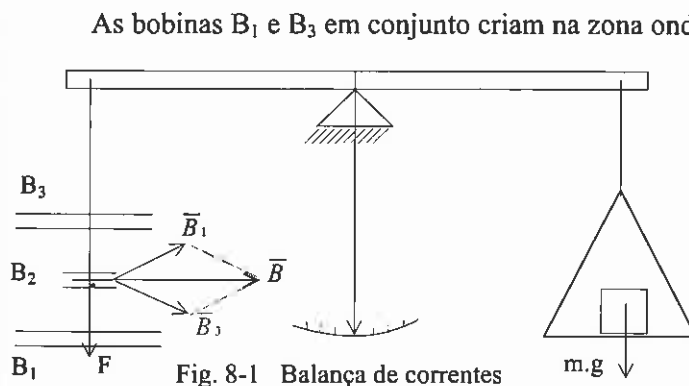
8.2 - O AMPERE DE 1948

Como já foi referido no capítulo 3, em 1948 foi posto de parte definitivamente o *ampere internacional*, e todos os esforços dos laboratórios se concentraram na melhoria da reprodução do *ampere absoluto*, na formação do qual, em termos de análise, em vez do recurso à massa magnética elementar, era utilizado o elemento de corrente, seu equivalente; aliás na sequência das ideias de Faraday e Ampere que punham a corrente eléctrica na origem de qualquer acção magnética.

Nas primeiras décadas do século XX haviam sido desenvolvidas as *balanças de corrente* para medição absoluta do ampere e na década de 50 experimentaram-se outros métodos, o principal dos quais utilizava o *coeficiente giromagnético do próton*. Vejamos em que consistem, um e outro.

8.2.1 - A BALANÇA DE CORRENTES

É uma balança comum (fig. 8-1), que tem ligada a um dos pratos uma bobina B_2 , de eixo vertical, percorrida pela corrente a medir. Esta bobina, fica sujeita à indução magnética B produzida pelas duas bobinas fixas B_1 e B_3 percorridas pela mesma corrente que B_2 , mas em B_3 com sentido ao oposto ao da corrente em B_1 e B_2 . O valor desta indução calcula-se pelas leis do Electromagnetismo, em função da geometria do sistema e da corrente que percorre as bobinas. É um cálculo trabalhoso, mas possível.



$$dF = idl \times B$$

$$(8.1)$$

em que dF é a força exercida sobre um elemento de comprimento $i dl$ do condutor da bobina B_2 .

Em termos finitos e em módulo será: $F = i l B$ em que l é o comprimento do condutor de B_2 , dado que há perpendicularidade entre os vectores B (radial) e idl (circular)

É essa força F que desequilibra a balança e exige que no prato das massas seja acrescida (ou retirada) a massa m , que repõe a balança em equilíbrio,

$$F = m.g \quad \text{ou seja} \quad i = \frac{m.g}{l B} \quad (8.2)$$

sendo g a aceleração da gravidade local. Esta última expressão permite a medição absoluta da corrente i , em função da massa de equilíbrio e dos restantes parâmetros, já definidos.

8.2.2 - O COEFICIENTE GIROMAGNÉTICO DO PROTÃO

No relatório da reunião de 1968 do Comité Consultivo de Electricidade (do BIPM), estão feitas as seguintes considerações: *Existindo actualmente três dispositivos que permitem, ou permitirão em breve, controlar a estabilidade dos padrões que servem para conservar as unidades eléctricas, e que são:*

- 1 - *Aparelho para medição do coeficiente giromagnético do protão, para controlar o ampere,*
- 2 - *Dispositivo para medir o quociente h/e (relação entre a constante de Planck, e a carga do electrão) por meio do efeito de Josephson, e que permite controlar o volt,*
- 3 - *O condensador calculável, para controlar o farad e, indirectamente, o ohm.*

Face a estas considerações e dado que as três unidades referidas estão ligadas pela lei de Ohm, bastaria usar dois dos processos para as definir completamente; porém aconselha-se a que se utilizem todos os métodos ao dispor a fim de verificar a sua concordância.

É sobre o primeiro dispositivo que nos iremos debruçar. Trata-se do aproveitamento do fenómeno da ressonância magnética nuclear. Um protão, ou melhor um núcleo de hidrogénio, de momento magnético μ é colocado num campo de indução magnética B . Há apenas dois estados energéticos possíveis: $+\mu B$ se o momento magnético é anti-paralelo com B , ou $-\mu B$ se é paralelo. Quando o protão passa de um estado a outro a sua energia varia de $\pm 2\mu B$. Isso origina absorção ou emissão (conforme o sentido da transição) de uma radiação de frequência f tal que:

$$hf = 2\mu B \quad (8.3)$$

sendo h a constante de Planck. Desta relação resulta que:

$$f = \frac{2\mu}{h} \cdot B \quad , \text{ mas como } \omega = 2\pi f$$

sendo ω a frequência angular,

$$\omega = \gamma' B \quad \text{em que} \quad \gamma' = \frac{4\pi\mu}{h}$$

é o coeficiente giromagnético do próton (a ' apostada em γ significa, por convenção, que os prótons estão contidos numa amostra esférica de água pura a 25 °C) e, substituindo valores,

$$\gamma' = 2,675\,130\,1 \times 10^8 \text{ Hz T}^{-1}.$$

Se a indução B for produzida por um solenóide percorrido pela corrente I , as leis do Electromagnetismo permitem calcular uma relação entre B e I , baseada na geometria do sistema: $B = k I$, sendo k um parâmetro calculável.

A ligação entre a frequência f e a corrente I será então: $f = \frac{k \gamma' I}{2\pi}$ ou,

$$I = \frac{2\pi f}{k \gamma'} \quad (8.4)$$

expressão que permite a medição absoluta de I .

Na realização prática da experiência, coloca-se um pequeno volume de água (poucos centímetros cúbicos) no eixo de um solenóide percorrido pela corrente a medir. Para se conseguir uniformidade na indução convém que o volume ocupado pela água seja pequeno, mas no entanto que seja suficiente para que o dispositivo tenha sensibilidade.

Como a radiação presente é extremamente ténue, aproveita-se não a emissão mas sim a absorção. Com efeito, o volume de água da experiência ao mesmo tempo que é submetido à indução B , constante, é também atingido por uma radiação produzida externamente e de frequência muito próxima da frequência f a detectar. É por variação desta frequência, que um dispositivo sensível detecta o pico de ressonância, quando as frequências, absorvida e produzida, forem iguais.

Se, por exemplo se aplica um campo de $B = 0,1$ T, substituindo γ' pelo valor acima, a frequência será: $f = \gamma' B / 2\pi$ ou seja $f = 4,257\,601\,8$ MHz.

A determinação experimental de γ' foi levada a cabo nos diversos laboratórios nacionais e com base nesses trabalhos o Comité Consultivo de Electricidade (do BIPM) recomendou que, a partir de 1 de Janeiro de 1969, se usasse, para fins metrológicos internacionais o valor de $\gamma' = 2,675\,12 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$

Este método permite medidas de corrente com a precisão relativa de, quando muito, 1×10^{-6} ; não pelo método em si mas pelas correcções necessárias para calcular a indução.

A precisão na medição da frequência não traz problema, porque medir frequência é medir tempo e um relógio de quartzo com temperatura estabilizada e ligado à rede internacional de tempo – de que há muitos emissores – facilmente permite incertezas da ordem de 10^{-9} .

8.3 - MEDIÇÃO ABSOLUTA DE OUTRAS GRANDEZAS ELÉCTRICAS

8.3.1 - CAPACIDADES CALCULÁVEIS

Em 12 de Maio de 1956 dois cientistas australianos, A. M. Thompson e D. G. Lampard publicaram na revista inglesa NATURE um artigo relatando a descoberta de um novo teorema no âmbito da Electrostática.

Normalmente a capacidade de um condensador depende das suas dimensões e é de esperar que a expressão analítica tradutora dessa dependência só seja válida em primeira aproximação. Seja qual for o tipo de condensador escolhido, há sempre necessidade de fazer correcções nas expressões das respectivas capacidades, para ultrapassar as dificuldades motivadas pela irregularidade do espectro do campo eléctrico nas extremidades das armaduras.

A descoberta atrás referida, considera um condutor em forma de superfície cilíndrica, não propriamente de revolução mas tendo por directriz uma curva qualquer, fechada, cuja forma se mantém constante ao longo de todo o comprimento. A superfície cilíndrica é subdividida longitudinalmente em quatro secções – que podem ser diferentes –, separadas umas das outras por um isolamento extremamente fino, originando assim quatro condutores em presença.

O mérito do teorema, é que faz depender o relacionamento das capacidades entre cada duas secções opostas do cilindro, não da forma ou das dimensões transversais mas apenas do conhecimento de uma única dimensão: o comprimento. Medindo esse comprimento por meio de interferometria consegue-se uma precisão muito notável no cálculo dessas capacidades.

Concretamente, no artigo referido era considerado o exemplo de um cilindro (em sentido lato) de secção quadrada, constituído por quatro faces rectangulares, de largura igual, opostas duas a duas e isoladas umas das outras; cilindro esse que tinha um comprimento bastante maior que as dimensões transversais. Seja C a capacidade parcial

entre quaisquer duas das faces opostas. Suponhamos uma delas ao potencial V e a que se situa em frente, ao potencial zero. As restantes duas faces, não fazendo propriamente parte

do condensador, estariam também ao potencial zero. Diz o teorema enunciado pelos físicos australianos que a capacidade parcial por unidade de comprimento, entre a placa ao potencial V e a placa oposta (ao potencial zero) é:

$$C = \frac{\ln 2}{4\pi^2} \quad \text{em unidades electrostáticas C.G.S.,}$$

ou,

$$C = \frac{\ln 2}{\pi} \epsilon_0 \quad \text{no S I, sendo } \epsilon_0 \text{ a constante eléctrica.}$$

Cita ainda o artigo que a medição das dimensões transversais não é crítica; se a relação entre os lados do quadrado, em vez de igual à unidade for $1+\delta$ sendo obviamente $\delta \ll 1$, a média das capacidades entre os dois pares de faces opostas virá multiplicada por um factor estimado em $(1+3,45.\delta^2)$. Isto pretende significar que a medição das dimensões transversais pode ser feita sem recorrer à meios especiais, dado que influi minimamente no resultado final.

No artigo da revista NATURE já referido admite-se que a secção transversal do condensador tenha que ter, pelo menos, um eixo de simetria; porém em artigos posteriores, da autoria conjunta de G.D.Lampard e R.D. Cutkovsky publicados nos Proc. do I.E.E.E. em 1957 e em 1960 confirma-se a extensão da validade do teorema a uma qualquer forma de secção, bastando que esteja dividida em quatro partes, que nem precisam de ser iguais.

Considerando os chamados condensadores cruzados, cada um formado pela associação de uma face com a face oposta, e designando por C_1 e C_2 as respectivas capacidades por unidade de comprimento, qualquer que seja a forma da secção, afirmam os autores referidos que a relação entre as capacidades é dada por:

$$e^{-4\pi^2 C_1} + e^{-4\pi^2 C_2} = 1 \quad (8.5)$$

sendo C_1 e C_2 referidos ao sistema C.G.S. electrostático.
Fazendo a transição para o S.I. vem:

$$e^{-\frac{\pi}{\epsilon_0} C_1} + e^{-\frac{\pi}{\epsilon_0} C_2} = 1 \quad (8.6)$$

Forçosamente, estas expressões englobam o caso particular de condensadores cruzados iguais; isto é, fazendo $C_1=C_2=C$ vem:

$$2 e^{-\frac{\pi}{\epsilon_0} C} = 1 \quad \text{ou} \quad \frac{\pi}{\epsilon_0} C = \ln 2$$

e como ϵ_0 e μ_0 estão relacionados por: $\epsilon_0 \mu_0 = c^{-2}$ sendo c a velocidade da luz no vazio,

substituindo vem:

$$C = \frac{\ln 2}{\pi \mu_0 c^2} \quad (8.7)$$

E como $c = 299\,792\,458$ m/s e $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ F/m vem para a capacidade o valor:

$$C = 1,953\,549\,043 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

Não consta que tenha havido uma demonstração cabal do teorema, mas pela leitura do primeiro dos artigos mencionados, fica-se com a ideia de que todas as vezes que as capacidades cruzadas puderam ser calculadas pelas leis clássicas da Electrostática,

mostraram estar de acordo com a expressão que, segundo o teorema, as liga. Este tipo de cálculo é extremamente trabalhoso e por isso apenas se esboçará o estudo de um caso simples, como é o do condensador de secção rectangular, concretizando-se depois o cálculo para o caso particular da secção quadrada.

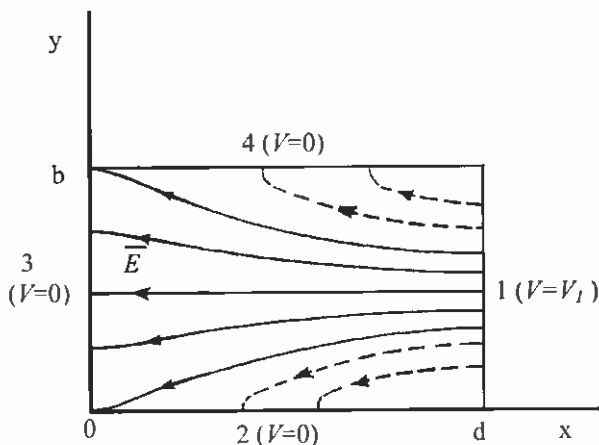


Fig. 8-2 Espectro do campo eléctrico num condensador calculável

A figura 8-2 representa a secção recta de um condensador formado por quatro lâminas condutoras, duas com a largura b e duas com a largura d , isoladas entre si e numeradas: 1,2,3 e 4.

Supondo a tensão V_1 positiva, as linhas de campo eléctrico nascem na placa 1 e terminam nas placas 2, 3 e 4. Como em cada extremidade de um tubo de linhas de campo as cargas eléctricas são iguais em valor absoluto mas de sinal contrário, a carga na placa 1 vai ser igual e de sinal contrário à soma das cargas nas placas 2, 3 e 4.

4.

A capacidade parcial – por unidade de comprimento – que se pretende calcular será o quociente da carga na placa 3 (em valor absoluto) pela diferença de potencial (valor absoluto) entre as placas 1 e 3; sendo obviamente as cargas referidas à unidade de comprimento do condensador.

Como se viu pelas expressões analíticas já apresentadas, as dimensões transversais nem sequer entram no cálculo; só é preciso que, no caso da secção quadrada, a relação entre elas esteja próxima da unidade. O comprimento, esse sim, precisa ser medido com o maior rigor. Por isso se recorre à interferometria.

Para se chegar à capacidade parcial referida, o primeiro passo é tentar estabelecer uma expressão para calcular o potencial em qualquer ponto do interior da secção transversal do conjunto das quatro placas condutoras. Para isso pode usar-se a equação de Laplace.

$$\nabla^2 V = 0 \quad \text{ou,}$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (8.8)$$

Face à constância da secção transversal o espectro das linhas de campo mantém-se igual a si próprio ao longo do eixo \overline{oz} , que representa a orientação do eixo do cilindro. O potencial V torna-se independente de z e a equação simplifica-se:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (8.9)$$

É evidente que a resolução desta equação não é fácil. Um dos métodos consiste em admitir que a solução da equação é formada pelo produto de duas funções, uma só de x e a outra só função de y . É, aliás, um método usado na resolução de muitas outras equações deste tipo, como por exemplo a de Schrodinger. Essas funções seriam:

$$X = A \cosh \alpha x + B \sinh \alpha x \quad e \quad Y = M \cos \alpha y + N \sin \alpha y$$

em que α^2 é a chamada "constante de separação".

As constantes A, B, M e N são determinadas pelas condições nos limites, isto é pelos valores de V , que será suposto nulo para qualquer ponto de coordenadas $x = 0$ ou $y = 0$ ou ainda $y = b$. Outra condição é o potencial ser igual a V_1 quando for $x = d$.

Não se pode pensar que, nestas condições, seja possível encontrar uma equação única, tal que, substituindo nela V por zero, resulte uma representação gráfica constituída por três segmentos de recta fazendo entre si ângulos rectos (os lados 2,3 e 4).

É um problema que faz lembrar a representação gráfica de uma onda quadrada em função do tempo. Também não existe uma função única que corresponda à relação. Aí a utilização das séries de Fourier resolveu o problema: em vez de uma só função, temos um somatório de funções.

É o que há a fazer também aqui. E é legítimo, porque sabemos que se uma equação diferencial admite várias soluções, a soma dessas soluções é também solução da equação.

A solução surge finalmente na seguinte forma:

$$V = \frac{4 V_1}{\pi} \cdot \sum_{1(\text{impar})}^{m=\infty} \frac{1}{m} \cdot \frac{\sinh(m\pi x/b)}{\sinh(m\pi d/b)} \sin(m\pi y/b) \quad (8.10)$$

No cálculo que vai seguir-se faz-se, para simplificar, $b = d = a$, sendo a o comprimento do lado do quadrado da secção. Esse cálculo contém os seguintes passos:

1º Derivando o potencial, calcula-se o campo eléctrico \overline{E} , para valores de $x = 0$. Por ser perpendicular à superfície equipotencial (a própria face 3), o campo confunde-se com a sua componente segundo o eixo \overline{ox} , a qual é efectivamente calculada.

2° Pela expressão $E = \sigma / \epsilon_0$, que relaciona o campo na vizinhança imediata de qualquer condutor, com σ , densidade de carga do condutor no ponto considerado, calcula-se σ .

3° Conhecida a densidade σ calcula-se a carga d^2Q num elemento de superfície $ds = dy dz$ da placa 3.

4° - A partir da carga d^2Q do elemento de superfície ds , obtém-se a respectiva capacidade, que dividida pelo elemento de comprimento do condensador nos dá a capacidade por unidade de comprimento procurada:

$$d^2Q = \sigma \cdot dy \cdot dz \quad \text{mas } \sigma \text{ é só função de } y, \text{ logo } dQ = dz \int_0^b \sigma dy \quad \text{é a carga na}$$

área da placa 3, de largura b e de comprimento dz : A capacidade respectiva é:

$$dC = \frac{dQ}{V_1} = \frac{dz}{V_1} \int_0^b \sigma dy \quad (8.11)$$

A capacidade por unidade de comprimento será:

$$\frac{dC}{dz} = \frac{1}{V_1} \int_0^b \sigma dy \quad (8.12)$$

Derivemos então V (expressão 8.10) em ordem a x , substituindo b e d por a , para que o estudo prossiga em relação ao condensador de secção quadrada de lado a .

$$E_x = \left| \frac{dV}{dx} \right| = \frac{4V_1}{\pi} \sum_{l(\text{impar})}^{\infty} \frac{1}{m} \cdot \frac{\cosh(m\pi x/a)}{\sinh(m\pi)} \cdot \frac{m\pi}{a} \sin(m\pi y/a) \quad (8.13)$$

$E_{x=0} = \frac{4V_1}{a} \cdot \sum_{l(\text{impar})}^{\infty} \frac{\sin(m\pi y/a)}{\sinh(m\pi)}$ mas o campo eléctrico na vizinhança imediata de qualquer condutor relaciona-se com a densidade σ por: $\sigma = E_{x=0} \cdot \epsilon_0$ logo

$$\sigma = \frac{4V_1}{a} \epsilon_0 \sum_{l(\text{impar})}^{\infty} \frac{\sin(m\pi y/a)}{\sinh(m\pi)} \quad \text{e em face de (8.12)}$$

$$\frac{dC}{dz} = \frac{4\epsilon_0}{a} \int_0^a \sum_{l(\text{impar})}^{\infty} \frac{\sin(m\pi y/a)}{\sinh(m\pi)} dy = \frac{4\epsilon_0}{\pi} \sum_{l(\text{impar})}^{\infty} \left[\frac{-\cos(m\pi y/a)}{m \sinh(m\pi)} \right]_0^a \quad (8.14)$$

e por ser $\cos(m\pi) = -1$ para m ímpar e ser constante a secção transversal do condensador, vem finalmente:

$$\frac{dC}{dz} = \frac{C}{z} = \frac{8 \epsilon_0}{\pi} \sum_{1(\text{ímpar})}^{\infty} \frac{1}{m \sinh(m\pi)} \quad (8.15)$$

Calculado o somatório com seis parcelas (de $m=1$ a $m=11$) o valor obtido é:

$$\frac{C}{z} = 1,953\ 549\ 043 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

igual ao valor resultante da aplicação do teorema de D.G.Lampard, pelo menos até à última casa decimal apresentada.

A utilização prática deste dispositivo, representado na Fig. 8-3, exige que para o condensador seja definido um comprimento. Todavia surge aqui um problema: o espectro do campo eléctrico, que se supôs independente de z , ou seja da terceira dimensão, nas extremidade do condensador não o é. Por outras palavras: as extremidades são responsáveis por diferenças entre os valores reais da capacidade e os valores calculados, dando origem a erros de avaliação

A Fig. 8-3, representa um condensador formado por quatro lâminas: 1, 2, 3 e 4, isoladas entre si, sendo a lâmina 3 dividida longitudinalmente em quatro secções: a , b , c , d .

Os erros apontados podem ser drasticamente reduzidos se as secções extremas da placa 3 (c e d), bem como uma das secções, a ou b , - aquela que não estiver a ser objecto de medição - forem postas à tensão $V=0$. Estando toda a lâmina 3 à mesma tensão, as linhas de campo vindas da lâmina 1 à tensão V_1 , irão fechar-se nas outras lâminas, uniformemente, ao longo de todo o seu comprimento; afastando a distorção do espectro para as extremidades da lâmina (secções c e d), que não têm intervenção na medida.

Mesmo assim, para evitar correcções, sempre difíceis de avaliar, o dispositivo trabalha, não propriamente com as capacidades, mas com diferenças entre elas, permitindo assim minimizar quaisquer erros residuais.

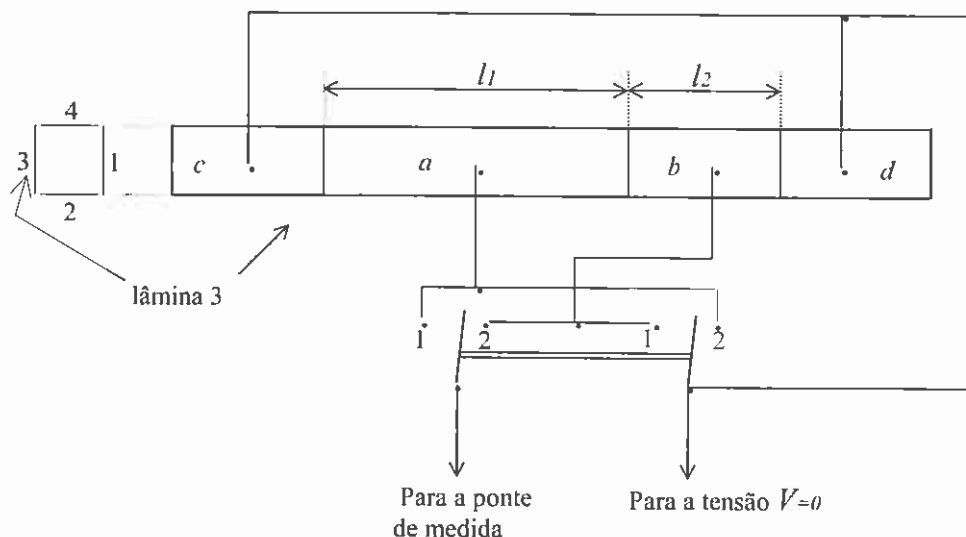


Fig. 8-3 Esquema de ligações num condensador calculável

Conforme se referiu, as duas secções, *c* e *d*, contêm as extremidades da lâmina e não intervêm na medida. As secções centrais (designadas por *a* e por *b* e tendo por comprimentos l_1 e l_2 , respectivamente), conforme a posição do comutador duplo, vão, quer uma quer outra, funcionar como eléctrodos de medida do condensador.

Estando o comutador na posição 1 a capacidade vale:

$$\frac{C}{z} \cdot l_1 \quad \text{e na posição 2 vale} \quad \frac{C}{z} \cdot l_2$$

$$\Delta C = \frac{C}{z} \cdot (l_1 - l_2) = 1,953\,549\,043(l_1 - l_2) \text{ F/m} \quad (8.16)$$

Medindo os comprimentos das placas por meio de interferometria temos a diferença de capacidades.

Na prática este condensador forma um dos braços de uma ponte de medida, da qual o outro braço é um condensador convencional, tal que a ponte esteja em equilíbrio numa das posições do comutador; mudando este de posição, a capacidade que for necessário acrescentar ou retirar ao condensador convencional, é precisamente igual à diferença de capacidades ΔC calculada (Fig. 8-5).

Os principais laboratórios nacionais possuem, desde a década de setenta, o condensador calculável; não como o que foi referido e que apresentava dois valores fixos da capacidade, mas com variação contínua. Estes condensadores trabalham com valores da ordem dos poucos picofarads. Daí a importância que nas comparações internacionais

tomou o condensador padrão de dez picofarads. A partir dele, em pontes de tipo Schering se aferem os valores superiores.

Os condensadores calculáveis tomam muitas outras formas, mantendo porém em comum a característica de serem quatro os elementos fixos, por vezes tubos de eixos paralelos dispostos em quadrado, e de, na parte central, "mergulhar" o elemento móvel (um tubo, por exemplo), que tem por função limitar o comprimento da parte activa do condensador cuja variação de posição é medida por interferometria. É óbvio que, para eliminar a influência da permissividade do ar, todo este conjunto está contido num invólucro onde é feito o vácuo.

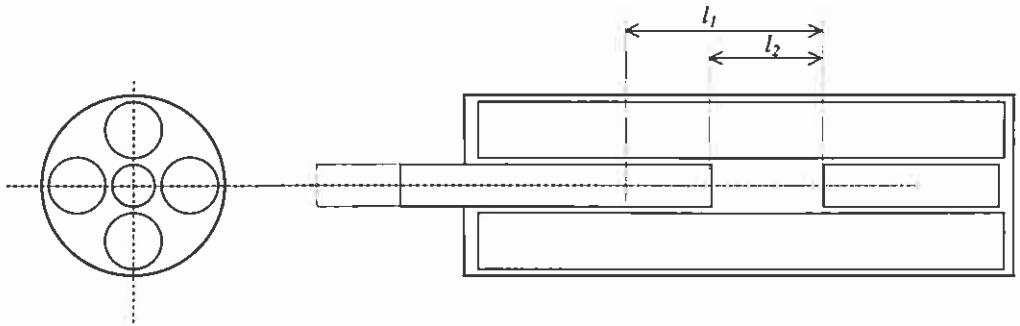


Fig. 8-4 Condensador calculável cilíndrico

Desde que se mantenha a simetria da distribuição de áreas em quadrado, tal como no cálculo que se fez atrás, o valor da capacidade por unidade de comprimento é o mesmo qualquer que seja a forma dos electrodos.

A incerteza na medição do farad por meio do condensador calculáveis é de 1×10^{-8} .

Na figura seguinte mostra-se um esquema de princípio para medição de condensadores usuais através do condensador calculável. No esquema, D representa o detector de zero da ponte e os números 1, 2, 3 e 4 assinalam electrodos em forma de tubo,

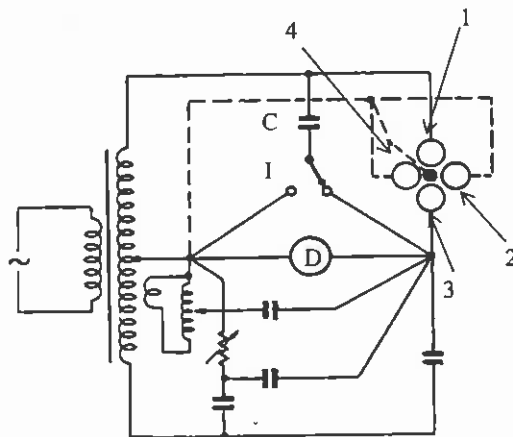


Fig. 8-5 Aferição de um condensador por outro, calculável

correspondentes às lâminas do exemplo anterior. O condensador a medir, C, é proporcional ao percurso do electrodo central, necessário para restabelecer o equilíbrio da ponte, quando o inversor I muda de posição.

8.3.2 - DIFFERENÇA DE POTENCIAL

Como o ampere, também o volt foi definido, nos fins do século XIX, em termos absolutos, como igual a $1/300$ da unidade electrostática CGS.

As dificuldades da medição absoluta do volt levaram a que, tal como em relação ao ampere, na já citada Conferência de Londres de 1908, fosse definido o volt internacional como sendo a tensão que aplicada à resistência de 1 ohm internacional produzisse a corrente de 1 ampere internacional.

O volt, tendo embora uma definição assente nas duas unidades referidas, foi também objecto de materialização: foi representado em termos práticos pela fracção $1/1,0183$ da força electromotriz a $20\text{ }^\circ\text{C}$, da pilha de sulfato de cádmio, ou seja da pilha normalmente designada por "pilha padrão de tipo Weston", criada em 1893.

Convém acrescentar que, em relação às pilhas, não houve nos diversos laboratórios nacionais, aquela enorme soma de pesquisa que houve em relação ao ampere e ao ohm internacionais, para estabelecer a relação com os valores absolutos. De facto a variedade de valores da força electromotriz deste tipo de pilhas é grande: o algarismo representativo da quarta casa decimal é diverso e na terceira, em vez de 8 pode mesmo surgir um 9. Depende muito da pureza dos materiais intervenientes, e da própria constituição da pilha, que em alguns pormenores não é sujeita a uniformidade, e até mesmo da qualidade do vidro em que está contida.

Todos estes factores tornaram, de facto, o padrão muito pouco fiável; no entanto as pilhas têm sido melhoradas ao longo dos anos e continuam formando grupos cuja f. e. m. média conservava o volt nos laboratórios; não pelas pilhas em si, mas por via de uma calibração periódica com dispositivos de medida absoluta muito precisos.

8.3.3 - A PILHA PADRÃO

A pilha original de tipo Weston é uma pilha não polarizável, cujos constituintes são:

Eléctrodo negativo – amálgama de cádmio

Eléctrodo positivo – mercúrio, coberto com uma pasta de $\text{Hg}_2\text{S O}_4$

Electrólito – solução de $3\text{Cd S O}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

A solução pode estar ou não saturada (dentro da gama de temperatura de funcionamento da pilha). No primeiro caso contém, na própria solução, cristais do referido sal e, em qualquer dos casos, para melhorar a estabilidade da força electromotriz junta-se à solução um pouco de ácido sulfúrico (acidez de $0,03\text{ N}$ a $0,05\text{ N}$).

Conforme a solução está, ou não, saturada, assim se originam dois tipos de pilhas, com comportamentos distintos: *pilhas saturadas* e *pilhas não saturadas*, cujas diferenças adiante serão assinaladas; embora, na verdade, a pilha designada por *não saturada* se torne *saturada* abaixo dos 4°C .

Normalmente a pilha está contida num vaso de vidro, em forma de H, como se pode ver na Fig. 8-6. Os eléctrodos ligam para o exterior por meio de condutores de platina que atravessam o vidro.

Para que uma pilha padrão possa ser considerada como tal, tem que estar de acordo com o que dispõe a Publicação 428 da Comissão Electrotécnica Internacional. Nela as pilhas são divididas em seis classes de precisão, classes: 2-5-10-20-50 e 100, significando este número a máxima variação espontânea da força electromotriz, um ano após o fabrico, expressa em partes por milhão

(p.p.m.); o que dá, ao mesmo tempo uma ideia da estabilidade da pilha. Por exemplo, uma pilha da classe 2 que à saída da fábrica tenha a força electromotriz de 1,018 540 V, sendo usada dentro das condições especificadas, ao fim do primeiro ano a sua força electromotriz deve estar compreendida entre 1,018 538 e 1,018 542.

De um modo geral a pilha perde força electromotriz com a idade, embora a variação seja irregular. As pilhas modernas perdem em média alguns décimos de microvolt por ano.

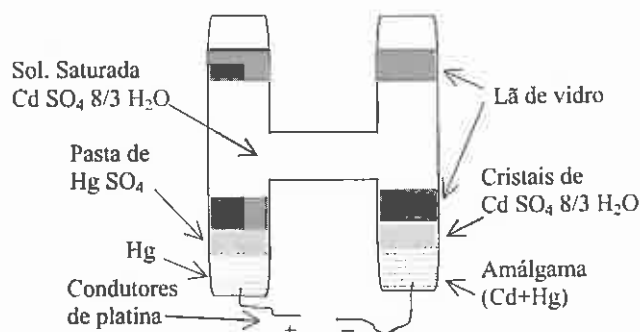


Fig. 8-6 Pilha padrão de tipo Weston

Pilhas Saturadas

Constituem o grupo de maior importância, dado que são elas que mantêm o volt nos laboratórios.

A sua força electromotriz é mais sensível a variações de temperatura do que a das não saturadas e esse inconveniente obriga a que, em funcionamento, tenham que ser conservadas a uma temperatura regulada automaticamente. Até há alguns anos a regulação era feita até à casa das centésimas de grau Celsius; mas posteriormente foi preciso ir até às milésimas, ou pelo menos, até às centésimas mas com um dispositivo electrónico para avaliação do valor momentâneo da terceira casa decimal. No BIPM a estabilidade da temperatura do óleo no qual as pilhas estão submersas, ronda o milésimo de grau Celsius.

Os fabricantes destas pilhas indicam a força electromotriz e a temperatura de referência (20 °C 25 °C ou 28 °C), expressas num certificado, e ainda os coeficientes a b e c da fórmula que permite calcular a força electromotriz E que a pilha apresenta a uma temperatura t qualquer, em função dessa mesma temperatura e da força electromotriz E_0 à temperatura t_0 de referência:

$$E = E_0 \left[a (t - t_0) - b (t - t_0)^2 - c (t - t_0)^3 \right] \quad (8.17)$$

Pilhas Não Saturadas

São menos sensíveis à variação de temperatura, não sendo por isso necessário, para a maior parte das aplicações, fazer qualquer correcção; não obstante haver de facto uma muito pequena variação (negativa) da força electromotriz quando a temperatura aumenta.

Este tipo de pilha é fabricado apenas nas classes de precisão 20, 50 e 100. Até há alguns anos equipavam muita aparelhagem portátil de medida, especialmente pontes; actualmente são substituídas por dispositivos electrónicos baseados no diodo de Zener.

Tanto um como o outro tipo de pilhas, durante o funcionamento não desprendem gases e assim podem ser construídas herméticas. Porém têm uma posição normal de funcionamento e não podem ser invertidas porque se corre o risco de se misturarem os componentes e da consequente destruição da pilha.

Também não devem ser sujeitas a choques porque a força electromotriz pode ser afectada por muito tempo. Por esta razão os ensaios de responsabilidade são sempre precedidos de várias semanas de repouso das pilhas. Isto tem que ver também com o transporte. As pilhas em viagem devem possuir embalagem munida de suspensões cardan, para evitar a inversão. Este problema tem hoje menos importância porque a medição absoluta de tensões por meio do efeito Josephson, nos países que a possuem, evita o deslocamento das pilhas.

Evolução Das Pilhas

Para se poderem aproveitar todas as possibilidades do efeito Josephson, no que toca à exactidão, foram as pilhas objecto de recente investigação no sentido de lhes conferir uma força electromotriz mais estável, principalmente no que respeita à acção da temperatura.

A pilha saturada de construção clássica, tem uma característica de dependência da força electromotriz com a temperatura com pendente (negativa) de cerca de -45 mV/K.

No Japão, em 1972, foi proposta por Hirayama e Shimazaki uma pilha que, no eléctrodo negativo, em vez de amálgama de cádmio (10% Cd + 90% Hg), tinha amálgama de cádmio e chumbo (Cd 10% + Pb 5% + 85% Hg). A pendente passou para -16 mV/K. Em 1976 os mesmos autores surgiram com um novo amálgama (Sn 5% + Pb 5% + Cd 10% + 80% Hg), desta vez já com o coeficiente positivo de $+23$ mV/K.

O alcance desta descoberta é enorme se pensarmos que em vez de usar uma só pilha, podemos associar em série – até com polaridades invertidas – um certo número de pilhas, com coeficientes escolhidos de modo a reduzir drasticamente a variação da força electromotriz com a temperatura. Um exemplo: duas pilhas com amálgama de Sn-Cd em série com uma (invertida) de Cd, mantém, entre 20 °C e 30 °C, um coeficiente de temperatura que não ultrapassa 1 mV/K.

Outra forma de contribuir para a estabilidade da força electromotriz das pilhas é conservá-las em ambiente termo-regulado. Para tal há vários tipos de dispositivos. A maior parte dos laboratórios mantém conjuntos de pilhas, em número variável dentro de tinas contendo óleo de parafina com temperatura regulada (25 a 35 °C), e agitação do óleo. Escusado será acrescentar que estes dispositivos estão instalados em dependências com temperatura já de si regulada entre estreitos limites.

A partir dos primeiros anos da década de 70, os principais laboratórios nacionais e também o BIPM iniciaram o estudo e a realização de caixas de termo-regulação múltipla, nas quais as pilhas, em pequeno número, ocupam o interior, protegidas por espessa camada de espuma de polistireno. Este conjunto é, por sua vez, inserido noutra câmara termo-regulada, a qual pode ainda ser objecto de nova termo-regulação. Nestes dispositivos já não há circulação de óleo mas sim de ar. Conseguem-se estabilidades térmicas da ordem de 20 mK.

As Pilhas do BIPM

Numa sala cuja temperatura é mantida a $20 \pm 0,05$ °C, há (1975) uma tina circular, cheia de óleo de parafina, com capacidade para 120 pilhas, e onde são mergulhadas as pilhas a medir, quer para comparação interna, quer para comparação internacional. A temperatura do óleo, que não tem qualquer regulação – apenas é forçado a circular – pode sofrer variações da ordem de 1,5 mK, se bem que com uma uniformidade de temperatura melhor que 0,5 mK. A temperatura do banho é medida por meio de termómetros de resistência de platina mergulhados no óleo.

Embora no BIPM existam várias dezenas de pilhas padrão (ou células), apenas quatro, que constituem o chamado *grupo de referência*, controladas periodicamente pelo efeito de Josephson, detêm a função de manter o volt. É designado por grupo V.

O grupo V era, de início, constituído por seis células saturadas, fabricadas no PTB, Braunschweig, mantidas em caixa de dupla termo-regulação e com circulação de ar. Partindo de fora para dentro há primeiro uma zona com temperatura regulada para 29 °C e depois um compartimento interior, onde estão as células, regulado para 30 °C. A temperatura interior é medida com termómetro de resistência de platina.

Outro grupo importante é constituído por cinco células saturadas, do mesmo fabrico das anteriores, e designado por grupo N. Foi instalado em 1980 e está contido noutro dispositivo estabilizador de temperatura (± 20 mK) que funciona também por circulação de ar.

Este dispositivo é formado por quatro cilindros de alumínio, concêntricos, separados por espuma de polistireno. Dois deles tem temperatura controlada independentemente. No espaço interior, onde se alojam as cinco células, a temperatura é medida por termómetros de platina.

Embora a sala onde está instalado, no BIPM, tenha uma temperatura de $20 \pm 0,05$ °C, a temperatura no espaço onde estão as células é tão pouco influenciada pela ambiente que, por cada grau que ela aumente a temperatura interior varia de -4 μ K.

O grupo N é comparado com o grupo V logo após a sua calibração e é depois o grupo N que funciona nas restantes comparações, tanto internas como externas.

Em qualquer dos grupos, todas as células tem acesso directo individual, através de condutores de trança de cobre, de secção fina, prateados, isolados a politetrafluoretileno, blindados e com cerca de 4 metros de comprimento. Trata-se de reduzir a influência da temperatura do operador sobre o resultado das medições.

Era este o panorama no fim da década de setenta, no entanto e como já foi referido, a tendência para uma cada vez maior utilização de dispositivos electrónicos baseados no díodo de Zenner, fez com que nos anos 80 e 90 as comparações internacionais de tensões, no BIPM tenham sido realizadas quer sobre instrumentos deste tipo quer sobre equipamentos que usam o efeito de Josephson, a referir a seguir.

8.3.4 - O EFEITO DE JOSEPHSON

O efeito de Josephson (de corrente alternada) propriamente dito, pode ser descrito muito sucintamente, como sendo o aparecimento de uma tensão contínua V aos terminais de uma junção Josephson (dois supercondutores separados por um isolante de espessura muito fina), quando percorrida por uma corrente contínua i , simultaneamente, sujeita à acção de uma radiação de frequência f , tal que:

$$f = (2 e/h) n V \quad (8.18)$$

sendo:

e – a carga elementar

h – a constante de Planck

n – um número inteiro (1, 2, 3 n)

No entanto talvez esta definição peque por exagero de sintetismo. Vejamos o pormenor.

Supercondutividade

Sendo os metais substâncias cristalinas, ou melhor, policristalinas, – o grão metálico é um pequeno cristal – a banda de valência, ou está incompletamente preenchida ou está sobreposta à banda de condução, e daí resulta que os electrões de valência podem deixar o átomo a que pertencem, transformando-o assim num ião.

Isto não significa que todos os electrões de valência estejam permanentemente fora do átomo.

É, no fundo, uma questão estatística. Por exemplo, no alumínio, cujo átomo tem três electrões de valência, falta em média um electrão por átomo.

São esses electrões livres que formam o chamado "gás electrónico", e que quando solicitados por um campo eléctrico ($f=q E$), se movem numa direcção dominante, em sentido oposto ao campo eléctrico (são cargas negativas), e constituem assim a corrente eléctrica de condução.

O movimento individual do electrão não é tão linear como o que é atribuído à corrente a que pertence; antes é errático e irregular; obviamente com uma nítida componente na direcção do campo eléctrico, mas em sentido oposto.

O electrão, acelerado pelo campo eléctrico, interactua com frequência com os iões da rede cristalina, aí deixando a energia cinética própria, sob a forma de efeito de Joule. Esta interacção dá-se não só com os iões mas ainda com anomalias da rede, devidas, quer à presença de átomos de impurezas quer a defeitos da própria estrutura cristalina.

Por outro lado os iões da rede, mesmo antes de estabelecida a corrente de condução e por via da chamada agitação térmica, já oscilavam ao acaso em volta de uma posição média pontual, própria das estruturas cristalinas. Se a temperatura se eleva aumenta a amplitude e a frequência destes movimentos e cumulativamente a probabilidade de interacção dos electrões de condução com a rede. Isto traduz-se, em termos práticos, por um aumento da resistividade do condutor com a subida da temperatura. É o comportamento típico dos metais.

Este raciocínio leva-nos à conclusão lógica de que à temperatura de 0 K todos os metais apresentam resistividade nula. Esta temperatura é considerada inatingível mas, por extrapolação retirada de valores da resistividade obtidos experimentalmente, a temperaturas da ordem dos centésimos de kelvin, mostra a experiência que tal não acontece: há quase sempre um valor residual da resistividade quando a temperatura tende para zero, e tanto maior quanto maiores forem, o teor de impurezas e o número de defeitos da estrutura cristalina.

Não obstante, em 1911, o físico holandês H. Kamerlingh Onnes, da Universidade de Leiden, medindo a resistividade do mercúrio a uma temperatura próxima de 4 K, encontrou uma excepção à regra: a resistividade do mercúrio caía a zero a essa temperatura.

Fazendo depois experiências com outros metais, como o chumbo, o alumínio, e o nióbio, verificou que as resistividades se anulavam quando a temperatura descia aquém de um valor que designou por *temperatura crítica*, T_c , que variava entre 1,2 K para o alumínio e 9,5 K para o nióbio. O fenómeno foi denominado: *supercondutividade*.

Divulgadas as experiências, as imaginações trabalharam rápida e febrilmente, prevendo – pela ausência do efeito de Joule – maravilhas, como correntes eléctricas muito elevadas circulando em fios extra-finos, transportes de energia sem perdas, etc. Porém as primeiras tentativas de aplicação foram completamente desencorajadoras; não bastava manter baixa a temperatura, havia um limite para o campo magnético presente (H_c , o *campo magnético crítico*) e outro para a densidade de corrente (J_c a *densidade crítica*). Aconteceu que para os metais então experimentados, H_c era muito baixo e J_c praticamente nula.

Foi preciso esperar por 1933 para que dois investigadores alemães, K. W. Meissner e R. Ochsenfeld, descobrissem ligas, sobretudo de nióbio, com características diferentes das dos primitivos metais, e que já permitiam condução em termos práticos.

Surgiu um facto novo, o efeito de Meissner que consiste na "expulsão" do campo magnético do interior dos supercondutores, como consequência do seu diamagnetismo perfeito. Mas que vem a ser o diamagnetismo perfeito?

Face à presença de um campo magnético, as substâncias, em geral, reagem de forma a poderem ser agrupadas em seis tipos diferentes de comportamento, dos quais os mais importantes são: o diamagnetismo, o paramagnetismo e o ferromagnetismo. O primeiro, o mais frequente (inclui quase todos os elementos cujo átomo tem número par de electrões e ainda os compostos em que estes elementos sejam preponderantes), caracteriza-se por, face a um campo magnético H imposto, a substância criar o seu próprio campo magnético M (magnetização), em oposição ao campo H , e tal que:

$$M = \chi H \quad (8.19)$$

sendo χ a susceptibilidade magnética da substância, grandeza adimensional, pois relaciona dois campos magnéticos e, neste caso, negativa. Na grande maioria das substâncias diamagnéticas sólidas o valor de χ situa-se entre -10^{-5} e -10^{-4} e assim, com uma resposta (M) tão ténue, face ao campo (H) imposto, é uso dizer-se que tais substâncias "não são magnéticas".

No grupo das substâncias paramagnéticas o valor de χ é da mesma ordem de grandeza, só que com sinal positivo. Em termos práticos a situação é idêntica. No grupo das substâncias ferromagnéticas χ toma valores positivos elevados, da ordem das centenas, dos milhares e, excepcionalmente, ultrapassa o milhão.

Convém aqui recordar que no vazio a relação entre a indução magnética B e o campo H é dada por:

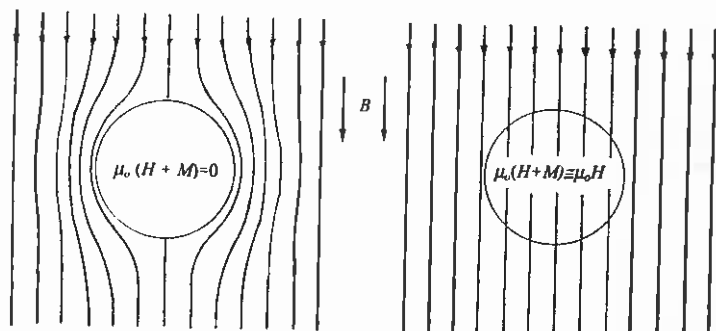
$$B = \mu_0 H \quad \text{sendo } \mu_0 \text{ a constante magnética, uma constante universal.}$$

Num meio material há que somar ao campo H , o campo criado pelo próprio meio, ou seja a magnetização M .

$$B = \mu_0 (H+M) \quad (8.20)$$

Ora, o diamagnetismo perfeito é aquele em que $M = -H$, ou seja, em que $\chi = -1$. Assim sendo, no interior da esfera representada à esquerda na Fig. 8-7, o campo magnético total é: $H+M=0$ e a indução magnética será também nula. É o efeito de Meissner: "expulsão das linhas de indução magnética do interior do superconductor. É esta característica que, transformando o superconductor numa espécie de imã com a polaridade ao invés do campo, explica o fenómeno da levitação magnética. A esfera da direita mostra as linhas da indução num caso de diamagnetismo normal.

Em 1957 os físicos norte-americanos John Bardeen, Leon N. Cooper e John



Robert Schrieffer, da Universidade de Illinois, elaboraram uma teoria que explicava os fenómenos experimentais da supercondutividade. Ficou conhecida como a teoria BCS, das iniciais dos nomes dos autores e valeu-lhes o Prémio Nobel da Física em 1972.

A Teoria BCS

O mecanismo da supercondutividade baseia-se na mecânica quântica, a qual quantifica os níveis energéticos e associa uma onda a cada partícula.

Segundo a teoria BCS a supercondução resulta da formação de pares de electrões (os pares de Cooper), os quais são supostos todos no mesmo estado quântico. Por isso este estado é dito "macroscópico". Os electrões associam-se dois a dois, com os momentos de spin em oposição. Tendo ambos cargas negativas, essa associação só é possível por virtude de um mecanismo de interacção com os iões positivos da rede, a qual, à passagem de um electrão se deforma, aproximando os iões da posição do electrão (Fig. 8-8), com atraso no tempo, devido à grande inércia da rede, em relação à dos electrões.

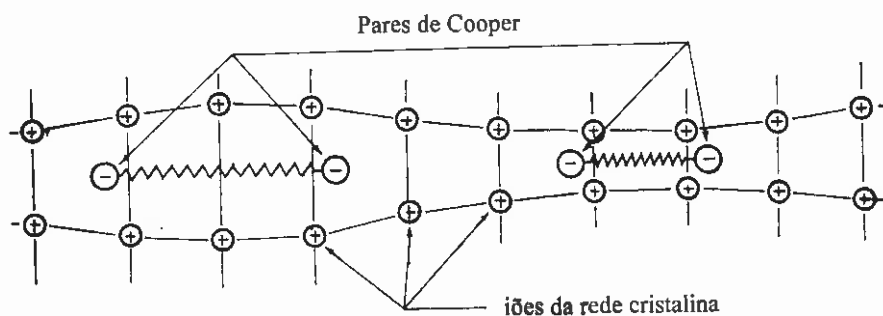


Fig. 8-8 Os pares de Cooper na supercondutividade

A ligação dos dois electrões só é possível à custa da energia de interacção electrão/fonão, sendo este último o quantum de energia de vibração das redes cristalinas.

Trata-se de energia muito pequena, da ordem dos milésimos de electrão-volt, e por isso o par de Cooper pode ser facilmente destruído, se a agitação térmica puser em jogo valores superiores.

Aliás no tempo em que esta teoria foi elaborada, previa-se que, segundo ela, a supercondutividade não seria possível para temperaturas acima de 30 K. A partir de 1986 esse limite foi excedido e como consequência, tem-se procurado modificar a teoria, de modo a faze-la respeitar a experiência.

O estado de supercondução é pois caracterizado pela formação de pares de Cooper. Os dois electrões oscilam permanentemente, aproximando-se e afastando-se um do outro mas mantendo estável o seu centro de gravidade. Porém num tipo de supercondutores, a referir mais adiante (tipo II), pode haver corrente de supercondução e, neste caso, os electrões além de oscilarem entre si deslocam também o centro de gravidade, assegurando assim a corrente. A distância entre os electrões que formam o par é designada por

comprimento de coerência, varia com o material e situa-se entre as dezenas e as centenas de nanómetros.

É evidente que, como se trata de supercondução, não pode, em qualquer dos casos, haver dissipação de energia; na verdade todos os movimentos, tanto as oscilações da rede como as dos pares de Cooper, são de natureza puramente elástica. Isto é confirmado por experiências de medição da resistividade em supercondutores, com aparelhagem sofisticada e extremamente sensível, mas cujo resultado final é sempre o mesmo: resistividade nula.

Esta característica permite concluir que uma corrente de supercondução pode ser produzida, ou por um gerador convencional, desde que haja outras resistências no circuito que limitem a corrente, ou por uma força electromotriz induzida, por exemplo, durante um curto instante por variação num só sentido de um fluxo de indução magnética. Neste último caso essa força electromotriz põe os pares de Cooper em movimento e eles assim podem ficar, durante anos, sem ser precisa qualquer energia adicional permanente.

Parâmetros Característicos

Como já foi referido, cada superconductor tem como características importantes, valores limites designados por: *temperatura crítica* T_c , *campo magnético crítico* H_c e *densidade de corrente crítica* J_c .

Destas três características só as duas primeiras se podem considerar próprias do superconductor; a densidade crítica depende também de factores como a espessura da camada supercondutora, o tipo de estrutura, os defeitos da rede cristalina, o teor de impurezas etc.

Acontece até que numa rede cristalina perfeita a densidade crítica pode ser extremamente baixa, mas, tirando partido de modificações da estrutura, obtidas quer por tratamentos térmicos, quer por sinterização (redução a pó e aglomeração subsequente por compressão e calor) quer ainda por adição de "impurezas", conseguem-se elevados valores (10^4 a 10^6 A/cm²) para a densidade crítica.

Vejamos agora como é possível existir corrente na supercondução.

Tipos de Supercondutores

Nos supercondutores metálicos estudados em 1911 e anos seguintes (tipo I) a relação entre o campo e a magnetização, até se atingir o campo magnético crítico, é $M = -H$ e está representada graficamente na Fig. 8-9 a). Na mesma figura, em b), está representada relação semelhante, mas para supercondutores criados após as experiências de 1933 por Meissner e Ochsenfeld e designados por tipo II. São de uma forma geral ligas, ou melhor, compostos intermetálicos.

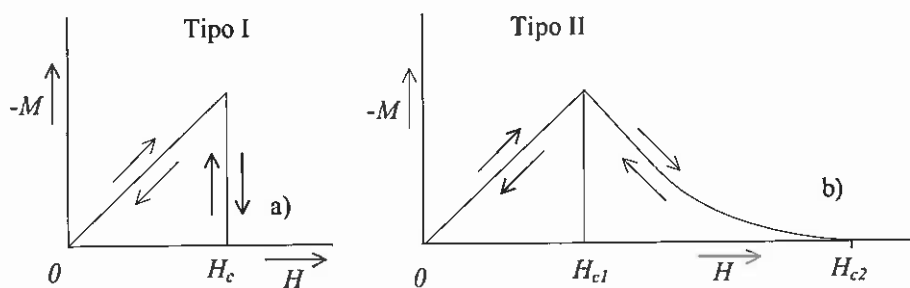


Fig. 8-9 Relação entre magnetização e campo magnético na supercondutividade

Conforme indicam as setas, ambas as relações $-M/H$ são reversíveis. Há no entanto um outro tipo de supercondutores, com uma relação aproximada da do tipo II mas não reversível; isto é quando o campo, após ter atingido H_{c2} diminui, o regresso já se não faz pelo mesmo percurso. São supercondutores classificados como do tipo III. Não tem aplicação no efeito de Josephson, ao contrário dos dos tipos I e II.

Nos supercondutores do tipo I quando o campo cresce acima de H_c há uma passagem brusca à condução normal, mas nos do tipo II — com dois campos críticos H_{c1} e H_{c2} — até H_{c1} o comportamento é igual aos do tipo I, entre H_{c1} e H_{c2} pode haver supercondução e acima de H_{c2} há condução normal.

A característica principal de um supercondutor ou seja o efeito de Meissner (produção de uma magnetização igual e oposta ao campo magnético aplicado) é conseguida através de micro-correntes, de carácter supercondutor, isto é, permanentes e sem perda de energia, que circulam à volta dos *vórtices* ou pontos de entrada dos fluxoides (quantas de fluxo valendo cada um $h/2e \cong 2,07 \times 10^{-15}$ Wb) e penetrando numa profundidade λ (profundidade de penetração), de forma a que se for H a intensidade do campo à superfície do supercondutor, no interior diminui rapidamente segundo uma lei do tipo: $H = H_o \cdot e^{-x/\lambda}$ em que x é a coordenada de penetração.

Nos materiais do tipo I λ é muito pequeno, inferior mesmo ao comprimento de coerência e ultrapassado o valor crítico (H_c) o campo magnético penetra no material e destrói a supercondução.

Nos materiais do tipo II a profundidade de penetração é superior ao campo de coerência e para valores de H entre H_{c1} e H_{c2} , as micro-correntes que se estabelecem à volta dos fluxoides não preenchem o espaço todo do supercondutor e deixam ainda espaço livre, não perturbado pelo campo magnético, onde a supercondução pode ocorrer. O crescimento do campo magnético faz-se à custa do aumento do número de fluxoides, por serem quantas de fluxo, e assim vai diminuindo a distância entre eles até que deixa de haver espaço livre para a supercondução. Esta característica confere aos supercondutores do tipo II a possibilidade de utilização prática, dado que os valores de H_{c2} são já suficientemente elevados para que a presença de campos magnéticos comuns não cause preocupação. Acresce ainda que a posição dos fluxoides, que é variável dada a presença de forças do tipo de Laplace, pode tornar-se menos susceptível de movimentação, pela fixação dos fluxoides por meio da adição de átomos estranhos ao meio e ainda por tratamentos físicos tendentes a criar irregularidades na granulação do material,

conseguindo assim elevar-se o valor da densidade de corrente crítica J_c , com vista a permitir aplicações de potência.

A Junção Josephson

A junção de Josephson é, como já se referiu, constituída por dois supercondutores separados por uma barreira fina isolante, com espessura da ordem dos poucos nanómetros. Se fizermos percorrer a junção por uma corrente contínua, os pares de Cooper atravessam a barreira isolante por efeito de túnel, tudo se passa como se houvesse apenas supercondutores e, nessa condição, a tensão aos terminais da junção é nula.

Isto é verdade para valores da corrente que não excedam a chamada corrente crítica da junção, a qual depende da diferença de fase dos parâmetros de ordem dos supercondutores que a constituem. É o efeito Josephson de corrente contínua.

Porém na medição absoluta de diferenças de potencial não é este efeito que interessa mas sim o efeito Josephson de corrente alternada, que surge para valores da corrente acima da corrente crítica.

O Efeito Josephson de Corrente Alternada

Como também foi referido a teoria BCS apoia-se na teoria quântica. Mas os pares de Cooper não obedecem à mesma estatística dos electrões independentes, e os componentes do par têm tendência para um mesmo estado quântico, cuja função de onda $\psi = \sqrt{\rho} e^{i\theta}$, designada "parâmetro de ordem" é suficiente para o caracterizar. Na expressão, ρ é a densidade dos pares de Cooper e θ é a fase relativa da função de onda.

Assim, num modelo devido a R. P. Feynman, para cada um dos supercondutores da junção teremos:

$$\psi_1 = \sqrt{\rho} e^{i\theta_1} \quad \text{e} \quad \psi_2 = \sqrt{\rho} e^{i\theta_2}$$

admitindo que a densidade ρ é a mesma nos dois supercondutores. Supõe-se ainda que a barreira isolante é suficientemente fina (1 a 5 nm) para que se verifique um certo acoplamento (representado por k) entre os supercondutores.

Tendo em consideração a possibilidade de os dois supercondutores estarem situados a potenciais diferentes, com o auxílio de uma fonte exterior, Feynman obteve as seguintes relações:

$$J = J_0 \sin \theta$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{4\pi e}{h} V$$

relações por vezes designadas por "e



 PEGASY

 14/10/2011 (21)

 22)

 e são:

J – módulo da densidade de corrente

$$J_0 = \frac{4\pi k \rho}{h}$$

$$\theta = \theta_2 - \theta_1$$

h – constante de Planck

k – coeficiente de acoplamento entre os supercondutores ($k \approx 0,8$)

A equação 3(8.21) implica a existência de uma corrente de intensidade I na área de junção:

$$I = I_0 \sin \theta \quad (8.23)$$

e a equação (8.22) traduz a ligação entre a tensão V aplicada à junção e a variação, com o tempo, da diferença de fase nos pares de Cooper, isto é, a ligação entre a tensão e a frequência da oscilação.

Supondo V constante, integrando a equação (8.22) e substituindo em (8.23):

$$I = I_0 \sin \left(\frac{4\pi e V}{h} t + \theta_0 \right) \quad (8.24)$$

em que θ_0 é uma constante de integração da equação (8.22).

A equação (8.24) mostra que se for aplicada na junção uma tensão V , continua, a corrente oscila com uma frequência proporcional e essa tensão. É o efeito Josephson de corrente alternada.

A relação frequência/tensão vale:

$$\frac{f}{V} = \frac{2e}{h} \cong 484 \text{ GHz/mV}$$

Na prática, as tensões utilizadas são da ordem dos poucos milivolts e assim as frequências caem na banda das micro-ondas. As potências envolvidas neste fenómeno são mínimas (da ordem dos nanowatts) e isso torna muito difícil detectar a radiação resultante.

É porém possível tirar partido, da exposição da junção a uma radiação externa, de frequência convenientemente escolhida. Vejamos como o físico I. R. Walker, em Am. J. Phys. Nº 53, Maio de 1985, propôs solução para o problema.

Seja ω a frequência angular da radiação aplicada. Permita-se agora o artifício de a fazer figurar no cálculo, incluída como uma parcela da tensão aplicada V .

$$V = V_1 \cos \omega t + V_0 \quad (8.25)$$

sendo V_1 a amplitude da parcela que representa a radiação e V_0 a componente contínua. Substituindo na equação (8.22), vem:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{4\pi e V_1}{h} \cos \omega t + \frac{4\pi e V_0}{h} \quad (8.26)$$

Integrando e substituindo em (8.23),

$$I = I_0 \sin \left(\frac{4\pi e V_1}{h \omega} \sin \omega t + \frac{4\pi e V_0}{h} t + \theta_0 \right) \quad \text{ou}$$

$$I = I_0 \sin(A + B) \quad \text{sendo:}$$

$$A = \frac{4\pi e V_1}{h \omega} \sin \omega t \quad \text{e} \quad B = \frac{4\pi e V_0}{h} t + \theta_0$$

$$\text{ou ainda:} \quad I = I_0 (\sin A \cos B + \sin B \cos A) \quad (8.27)$$

Desenvolvendo as parcelas entre parêntesis em série de Fourier, tendo como coeficientes funções de Bessel e substituindo vem:

$$\begin{aligned} I = & I_0 J_0 \left(\frac{4\pi e V_1}{h \omega} \right) \sin \left(\frac{4\pi e V_0}{h} t + \theta_0 \right) + \\ & + I_0 \sum_{n=1}^{\infty} J_n \left(\frac{4\pi e V_1}{h \omega} \right) \sin \left[\left(\frac{4\pi e V_0}{h} + n \omega \right) t + \theta_0 \right] + \\ & + I_0 J_0 \sum_{n=1}^{\infty} J_n \left(\frac{4\pi e V_1}{h \omega} \right) (-1)^n \sin \left[\left(\frac{4\pi e V_0}{h} - n \omega \right) t + \theta_0 \right] \quad (8.28) \end{aligned}$$

em que $J_n(x)$ é, o símbolo da função Bessel de 1ª espécie, de ordem n . Porém, convém não confundir J_0 na equação (8.28), - função de Bessel de ordem zero - com J_0 da equação (8.21), uma densidade de corrente.

Observando a equação (8.28), vê-se que se está perante um somatório de sinusóides (em função do tempo) e, como tal, não se vislumbra que o somatório possa ter um valor médio diferente de zero. É preciso descobrir na equação o termo de corrente contínua que

permita definir uma relação entre a tensão contínua V_0 e a frequência ω da radiação aplicada.

Ora, no somatório da equação (8.28) n toma valores desde 1 até ∞ . Escolhamos um deles, $n=m$, e façamos com que a tensão V_0 seja:

$$V_0 = \frac{h m \omega}{4\pi e} \quad \text{ou ainda} \quad \frac{4\pi e V_0}{h} = m \omega \quad (8.29)$$

O termo procurado só pode estar contido na última parcela de (8.28). Com efeito, substituindo (8.29) em (8.28) e fazendo o produto de I_0 pelas parcelas dentro das chavetas, vê-se que a expressão (8.28) continua sendo uma soma de funções sinusoidais, com exceção da última parcela.

A última parcela da equação (8.28) é:

$$I_0 J_m \left(\frac{4\pi e V_0}{h \omega} \right) (-1)^m \sin \theta_0 \quad (8.30)$$

e constitui a parcela não nula procurada.

Em termos práticos, varia-se a corrente I , situando-a, sem grande rigor, dentro dos intervalos que a Fig. 8-10 mostra, e ajusta-se a frequência da radiação de acordo com a tensão contínua pretendida (expressão 8.31). Aumentando I há um momento em que se desfaz o equilíbrio, até que com outro valor de m (equação 8.29) volta a haver estabilidade para V_0 .

A frequência f a escolher para a radiação está implícita na expressão (8.27), na qual figura através de $\omega = 2\pi f$. Temos assim:

$$f = \frac{2 e V_0}{h m} \quad (8.31)$$

$$V_0 = m \frac{h f}{2e}$$

Normalmente utilizam-se frequências da ordem dos 10 GHz, o que com $m = 50$ dá $V_0 \cong 1 mV$, ou com $m = 250$ dá $V_0 \cong 5 mV$

A Fig 8-10 representa a relação corrente contínua/tensão contínua, numa junção Josephson sujeita a uma radiação de microondas, de frequência f . Podem observar-se, a zona inicial, onde se dá o efeito c.c. ($V_0 = 0$) , e a zona em "socialcos", que apresenta o efeito c.a..

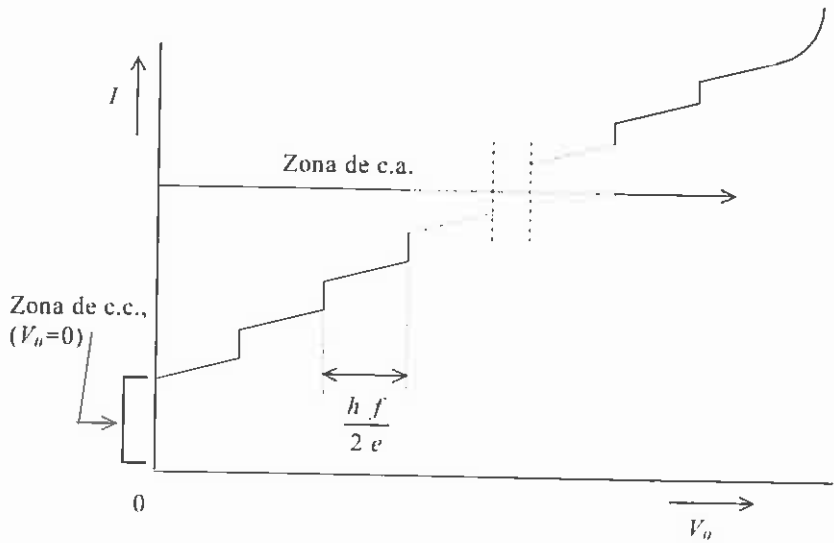


Fig. 8-10 Relação entre a corrente e a tensão contínua numa junção Josephson

A Reprodução do Volt

Para acertar a frequência, de modo a se obter uma corrente que corresponda à tensão V que se pretende reproduzir na junção Josephson, faz-se primeiro um cálculo aproximado dessa frequência e depois, por meio de uma regulação fina, ajusta-se o seu valor até se conseguir que ligeiras variações da corrente contínua medida pelo miliamperímetro que mede a componente contínua, não impliquem variações na tensão contínua.

Para se comparar os cinco ou dez milivolts obtidos pelo efeito de Josephson com um volt e pouco das pilhas padrão, utiliza-se um divisor de tensão com uma relação 1/10; e é depois a décima parte da força electromotriz da pilha que é comparada com a tensão Josephson.

O quociente $2e/h$ era conhecido com uma incerteza da ordem de $2,7 \times 10^{-6}$ mas este valor é insuficiente para a precisão que o método permite. Era, por assim dizer, o seu calcanhar de Aquiles. Por este motivo os diversos laboratórios nacionais (mundiais) lançaram-se na pesquisa de um mais profundo conhecimento deste número. Utilizaram para isso o próprio método de Josephson, tomando a fracção como incógnita e partindo de valores da tensão V_0 medida por outra via. Não obstante terem usado junções com diversos supercondutores (Sn, Ta, Nb, Pb) e com vários isolantes (SnO, PbO, $Al_2 O_3$) o resultado obtido foi sempre idêntico.

Em 1975 o valor aceite como bom, pelo BIPM, expresso em GHz/mV era de 483,593 100, com uma incerteza de 7×10^{-8} . O milivolt em que este número está expresso é um submúltiplo do volt V_{69-91} , que à data era a unidade absoluta, considerada como tal pelo BIPM, e fôra determinado em 1969 pela média dos valores que os sete laboratórios mais importantes atribuíam ao respectivo volt, calibrado já pelo efeito de Josephson.

Para que o volt passasse a ser mais facilmente realizável por outros laboratórios, era conveniente definir um valor exacto para o quociente $2e/h$. O director do BIPM havia, nesse mesmo ano, recomendado o valor de 483,594 MHz/mV e assim ficou esse valor fixado. Até ver...

Mas, vistas bem as coisas, isso ia bulir com o próprio valor do volt. E foi mesmo; criou-se assim o novo volt e chamou-se-lhe V_{76-BI} , porque começou a vigorar em 1 de Janeiro de 1976. Faz do anterior uma pequena diferença; cerca de 2,5 μ V a mais.

Mas ocorre perguntar: pode assim alterar-se o valor de uma unidade sem que daí advenham consequências? Para já, pode. Agora, no dia em que a medição absoluta e directa de grandezas, como a intensidade de corrente, a tensão e a resistência, atingir incertezas da ordem dos 10^{-9} , então haverá que as redefinir a todas, ajustando valores, de forma a não se desprezitar a lei de Ohm.

O futuro dirá. De facto, em 1989, ao quociente da frequência pela tensão de Josephson foi fixado um valor ligeiramente mais elevado e o volt cresceu cerca de 8 μ V, passando a ser designado por V_{J-90} .

8.3.5 - RESISTÊNCIA

A constante de Planck h e a carga do electrão e são duas constantes universais que intervêm na quantificação de um número enorme de fenómenos físicos. Se é lícito escalonar a importância das constantes universais pode afirmar-se que se trata de facto de duas das constantes mais importantes e de maior intervenção.

A primeira vale

$$h = 6,626\,17 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

e a segunda

$$e = 1,602\,19 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Se dividirmos a primeira pelo quadrado da segunda vem:

$$\frac{h}{e^2} = \frac{6,626\,17 \times 10^{-34}}{(1,602\,19)^2 \times 10^{-38}} \text{ J.s/C}^2 \quad (8.32)$$

$$\frac{h}{e^2} = 25\,812,766 \, \Omega \quad \text{valor que mais tarde, por}$$

convenção, foi fixado em:

$$\frac{h}{e^2} = 25\,812,8 \, \Omega \quad (8.33)$$

Inesperadamente deparamos com uma resistência cujo valor, dadas as suas origens, se afigura ter algo de fundamental. É isso que vamos tentar descobrir.

O Efeito de Hall (Convencional)

Segundo o Vocabulário Electrotécnico Internacional (VEI) o efeito de Hall é definido como *uma anisotropia da condução eléctrica num condutor, provocada por magnetização em direcção perpendicular à do vector densidade de corrente. Este último, em vez de ser paralelo ao vector campo eléctrico, forma com ele um determinado ângulo.*

A fig. 8-11a) representa um bloco condutor cujas arestas, de dimensões a , b , e c , são orientadas segundo os eixos oy , ox , e oz , respectivamente. O bloco é percorrido por uma corrente de densidade J com o sentido positivo de ox .

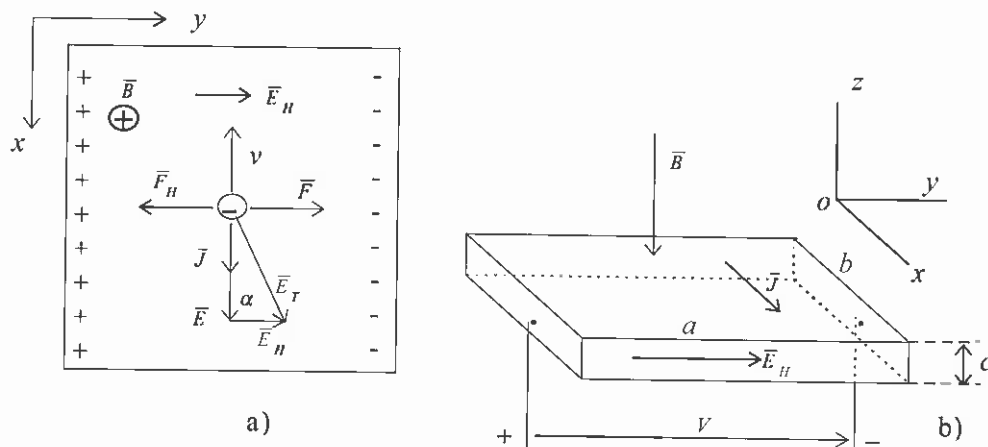


Fig. 8-11 Efeito de Hall (convencional)

É aplicada uma indução magnética B segundo o sentido negativo de oz , a qual vai exercer sobre os electrões em movimento, com a velocidade média v (no sentido de ox negativo) uma força

$$F = (-e) v \times B \quad \text{ou} \quad F = -e v B$$

Esta força tem o sentido positivo de oy e provoca uma concentração de linhas de corrente, e portanto de electrões, na face para a qual se dirige, e obviamente uma concentração de cargas positivas na face oposta. Estas concentrações originam um campo eléctrico, o *campo de Hall* E_H , orientado segundo o sentido positivo de y . O campo eléctrico total $E_T = E + E_H$ fica assim orientado de forma a fazer com a indução J um ângulo α . O campo $E = J/\sigma$ é o campo eléctrico ligado à condução normal e σ é a condutância.

A migração de cargas termina quando a força F_H que E_H exerce sobre as cargas móveis:

$$F_H = (-e) E_H \quad \text{for igual e oposta à força } F \text{ de origem magnética.}$$

$$F = -F_H \quad \text{e igualando os módulos} \quad e v B = e E_H \quad \text{ou} \quad E_H = v B$$

Como a velocidade média das cargas não é em geral um dado do problema, há que exprimi-la em função da densidade de corrente e das características do condutor. Num condutor percorrido por corrente, a velocidade média das cargas é:

$$v = \frac{J}{-en} \quad \text{sendo } n \text{ a concentração de portadores de}$$

cargas (electrões). Substituindo na expressão de E_H :

$$E_H = \frac{1}{-en} J B \quad \text{ou ainda} \quad E_H = R J B,$$

sendo $R = \frac{1}{-en}$ designado por *coeficiente de Hall*, função da natureza do

condutor.

O coeficiente de Hall é condicionado pela presença de portadores, tanto positivos como negativos, sendo o sinal positivo ou negativo, conforme a preponderância de uns ou de outros. É óbvio que na condução electrónica (quase todos os metais) R é negativo.

De uma forma geral será:

$$R = \frac{1}{qn}, \quad \text{em que } q \text{ é a carga elementar.}$$

Na prática para determinar R utiliza-se um pequeno troço de condutor, como o representado na fig. 8-11 b), a que se atribuíram as dimensões a , b e c . Escolhe-se a corrente I que o percorre, mede-se a tensão V_H entre faces laterais opostas, conhece-se a indução B aplicada e, supondo o campo E_H uniforme, resulta:

$$V_H = E_H a \quad \text{ou seja} \quad E_H = \frac{V_H}{a} \quad \text{e substituindo na expressão de } R$$

$$R = \frac{E_H}{JB} = \frac{V_H}{aJB} = \frac{V_H c}{IB} \quad (8.34)$$

Nos últimos anos o efeito de Hall tem sido aproveitado, sobretudo em relação aos semicondutores, para se medir a concentração de portadores de carga.

Efeito de Hall Quântico

É opinião geral entre os estudiosos do assunto que o efeito de Hall quântico teve como ponto de partida o trabalho de uma equipa constituída por K. von. Klitzing, G. Dorda e M. Pepper relatado num artigo que publicaram em Phys. Rev. Lett., vol 45, pag. 494-497, em 1980. Denominava-se "New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance".

Para a maior parte dos condutores, quando submetidos ao efeito de Hall, a resistência de Hall é aproximadamente constante e assim, mantendo constante a corrente aplicada, a representação gráfica de V_H - tensão de Hall - em função da indução B , variável, é uma recta passando pela origem dos eixos (Fig. 8-12,a).

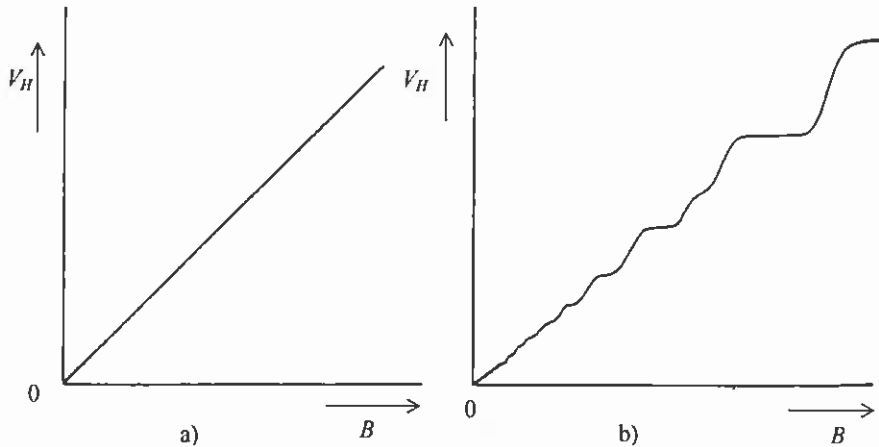


Fig. 8-12 Relação entre a tensão de Hall e a indução nos efeitos de Hall, convencional e quântico

No entanto alguns tipos de semi-condutores apresentam uma linha um pouco diferente (Fig. 8-12,b), com vários "patamares".

Para pôr em evidência o efeito quântico de Hall é necessário trabalhar a temperaturas próximas do zero absoluto, em geral inferiores a 2 K, e além disso, dispor de um condutor de espessura extremamente fina, de modo a que a condução se exerça, num espaço confinado a duas dimensões, o que normalmente se designa por 2DEG (bidimensional electronic gas), isto é, um dispositivo que na direcção da corrente tenha cerca de 1 mm, na direcção transversal tenha 0,1 a 0,2 mm e na direcção da indução magnética, uma espessura de 1 nm a 5 nm.

A realização prática destes dispositivos está representada na fig. 8-13,a), vendo-se os contactos de trabalho 1,2,3,4,5 e 6, bem como os contactos de *source* e de *drain*.

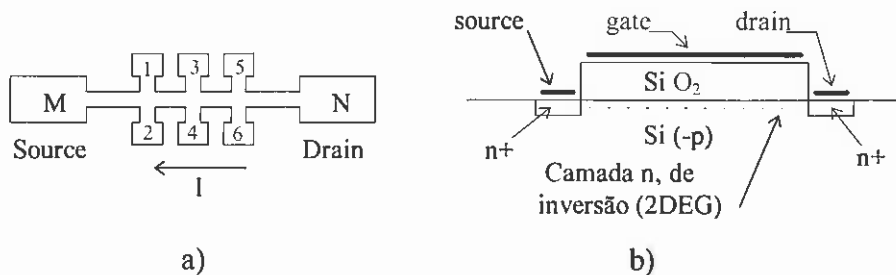


Fig. 8-13 Disposição esquemática dos componentes de um MOSFET

A corrente passa, como indicado, entre os terminais N e M, com valores de 10 a 30 μA , sendo a tensão de Hall medida entre os terminais 3 e 4. Os restantes terminais servem para medir a resistividade longitudinal, que interessa para ajudar a definir os "patamares" da curva da tensão de Hall, por ser aí que esta resistividade apresenta valores muito baixos, da ordem do miliohm, enquanto que fora dos "patamares" tem valores da ordem das dezenas ou das centenas de ohms, chegando mesmo a atingir valores da ordem do milhar.

As induções aplicadas vão até vinte teslas, são produzidas por bobinas supercondutoras e as temperaturas de funcionamento dos dispositivos que aproveitam o efeito quântico de Hall, situam-se entre 0,3 K e 1,8 K.

Os dispositivos utilizados para melhor materializar a extrema mobilidade do gás electrónico (teórico) e evidenciar o efeito quântico de Hall, são de dois tipos: MOSFET (metal oxide silicon field effect transistor) ou heteroestruturas de Ga As/Ga_{1-x}Al_xAs. Qualquer deles apresenta "patamares" de tensão bem definidos (Fig. 8-12,b)

Na Fig. 8-13,b pode ver-se um corte num MOSFET com a indicação da camada que corresponde ao gás electrónico.

Um tratamento analítico simplificado, parte do efeito clássico de Hall, em relação ao qual e como foi referido, a expressão do campo de Hall, em módulo, é:

$$E_H = \frac{1}{n e} J B \quad (8.35)$$

e em que n é o número de electrões (portadores de carga) por unidade de volume, J a densidade de corrente e B a indução, que é perpendicular a J e a E_H campo eléctrico de Hall.

Usando a notação representada na Fig. 8-11,b) pode escrever-se:

$$E_H = \frac{1}{n e} \cdot \frac{I}{a c} \cdot \frac{\Phi}{a b} \quad \text{em que } I \text{ é a corrente e } \Phi \text{ o}$$

fluxo de indução magnética. Ou ainda:

$$E_H = \frac{1}{e n a^2 b c} I \Phi \quad (8.36)$$

$$V_H = E_H a = \frac{1}{e n' } I \Phi \quad (8.37)$$

em que n' ($n' = n a b c$) é o número de electrões contidos no espaço submetido à indução magnética e V_H a tensão de Hall.

A resistência de Hall será, por convenção:

$$R_H = \frac{V_H}{I} = \frac{1}{e n'} \Phi$$

Mas o fluxo Φ é constituído por um certo número N de quanta de fluxo, valendo cada um $\frac{h}{2e}$. Substituindo vem:

$$R_H = \frac{h}{e^2} \cdot \frac{N}{2n'} \quad \text{e se fizermos} \quad i = \frac{2n'}{N},$$

sendo $i = 1, 2, 3 \dots n$ vem para a resistência de Hall:

$$R_H = \frac{h}{e^2 i}$$

$$R_H = \frac{25\,812,821\,35}{i} \, \Omega \quad (8.38)$$

correspondendo a valores inteiros de i , a formação de patamares na evolução da resistência quântica de Hall em função da indução aplicada.

A expressão de R_H mostra a independência do resultado, em relação ao tipo de semiconductor usado. Essa independência está confirmada por experiências, realizadas em condições de poderem ser detectadas diferenças da ordem de uma parte em 10^{16} . No entanto, numa calibração de resistências por este princípio, a precisão conseguida é quando muito de uma parte em 10^8 , entrando em linha de conta com os restantes componentes do circuito comparativo.

Obviamente que o valor de i , representando o dobro da relação entre o número de electrões submetidos à indução e o número de fluxoides por que ela se reparte, é inversamente proporcional à indução magnética e é fixado através dela. Na prática escolhem-se para i números inteiros, em geral pares, situados entre dois e doze, embora sejam mais frequentes dois e quatro, aos quais correspondem os valores de $R = 12\,906,4 \, \Omega$ e $R_H = 6\,453,2 \, \Omega$, respectivamente.

Este cálculo reflecte apenas uma visão muito simplificada do problema; nem sequer explica porque é que a valores inteiros de i correspondem os "patamares" na representação gráfica da tensão em função da indução (Fig.8-12), tanto no caso das heteroestruturas como no dos MOSFET, nos quais a tensão medida é a tensão de "gate". O fenómeno é muito complexo, tem a ver com um ajustamento espontâneo da concentração de electrões, coincidindo com o facto de i tomar valores inteiros, e não é completamente conhecido; aparecem por vezes "patamares" menos nítidos para valores de i não inteiros, como por exemplo $1/3, 2/5, 4/3$, etc..

O valor de R_H para $i=1$ veio mais tarde a ser corrigido e passou a ser expresso por: $K_{K-90} = 25\,812,807 \, \Omega$

Resistências Padrão

As resistências-padrão são em geral resistências de quatro terminais, cujo esquema está representado na Fig. 8-14.

Na figura estão representados os terminais de corrente A e B e os terminais de tensão 1 e 2.

Para efeitos de comparação (ou medida) a resistência é percorrida por uma corrente constante, aplicada nos terminais A e B; a diferença de potencial entre 1 e 2 é posta em oposição, através de um galvanómetro, com uma diferença de potencial conhecida, geralmente proveniente de um padrão de força electromotriz. Quando o galvanómetro indicar zero, as duas d.d.p. são iguais.

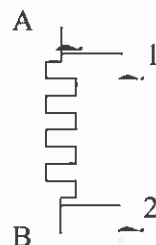


Fig. 8-14 Resistência padrão (de 4 terminais)

Este método implica que as resistências interiores dos fios de ligação, da resistência padrão propriamente dita aos terminais, tanto de corrente como de tensão, não sejam envolvidos na medição; os primeiros por estarem fora do circuito de comparação, os segundos por terem corrente nula (galvanómetro no zero) e portanto quedas de tensão nulas também.

Para o fabrico destas resistências convirá usar condutor cuja resistividade não varie com a temperatura. Simplesmente, isso não é possível, porque não existe nenhum material nessas condições. Há, porém, ligas cuja resistividade, variando pouco com a temperatura, apresenta ao longo dessa variação, "patamares" nos quais a variação é de facto muito pequena. Na Fig. 8-15 mostra-se um exemplo desse tipo de variação.

Estas ligas têm as zonas de "patamar" situadas em regra nas temperaturas ambientes; todavia há materiais preparados para trabalhar a temperaturas da ordem dos 60/80 °C, próprios para o fabrico de *shunts* destinados à medição de correntes contínuas elevadas.

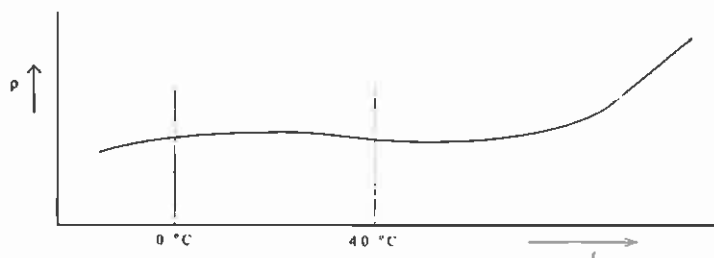


Fig. 8-15 Relação da resistividade com a temperatura em ligas do tipo da Manganina

São exemplos de materiais de baixa

variação: a liga conhecida pela designação de constantan (60% de Cu + 40% de Ni), e ainda um conjunto de ligas com base no manganês conhecidas como manganinas (84/85% de Cu + 13/12% de Mn + 3% de Ni). São estas últimas as mais importantes no fabrico de resistências-padrão, visto que o constantan não é recomendável devido à tendência para formar, com o cobre, forças electromotrizes de Seebeck. Há ainda outras ligas, tais como a de manganês-ouro, a de ouro-crómio (com 2,05% de Cr) e uma outra conhecida pela designação de Evahnnon, também usadas no fabrico de resistências padrão.

Nestas resistências o fio condutor é enrolado sobre uma forma de quartzo fundido e o conjunto, completamente mergulhado em óleo isolante, é fechado hermeticamente em caixa metálica.

O padrão de resistência mais importante para utilização em laboratórios é o de 1Ω , vindo a seguir o padrão de $10\,000\Omega$. A partir destes valores facilmente se aferem os outros, em pontes apropriadas. No entanto isso não impede que uma boa colecção de padrões inclua todas as potências de dez situadas entre aqueles dois valores, como ainda o décimo, o centésimo, o milésimo e o décimo milésimo de ohm.

Em Portugal, desde 1940 que no Laboratório Central Electrotécnico, funcionando no IST, existiam resistências-padrão dos melhores fabricantes norte-americanos, tendo-se-lhe juntado nos anos seguintes, principalmente depois de 1945, outros padrões cujos valores iam desde $0,0001\Omega$ até, $10\,000\Omega$ provenientes dos principais fabricantes ingleses, franceses e alemães., num total de várias dezenas.

Em 1988 o Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (LNETI) adaptou uma tina de óleo já existente, com agitação, e preparou-a para receber diversas resistências-padrão, regulando-lhe a temperatura para $28\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. No mesmo ano começou a aferição regular, em França, com o envio de duas resistências-padrão, uma de 1Ω e outra de $10\,000\Omega$.

8.3.6 - DECISÕES RECENTES

Durante toda a década de oitenta o principal esforço dos laboratórios de vanguarda centrou-se no aprofundamento da pesquisa ligada às aplicações do efeito de Josephson e do efeito quântico de Hall.

Aconteceu nestas pesquisas um facto semelhante ao que tinha acontecido, quando se quis aplicar a enorme reprodutibilidade da medição do segundo ao conhecimento da velocidade da luz. A principal causa de imprecisão era exactamente a limitação na fixação do metro, por meio da lâmpada de cripton.

A solução lógica seria, como se fez, redefinir o metro pela fixação do valor atribuído à velocidade da luz no vácuo.

Vistas bem as coisas, em finais de 1989 estava-se em situação idêntica, no que toca à aplicação do método de Josephson e do efeito quântico de Hall. Os métodos anteriores para medição de forças electromotrizes e de resistências, dificilmente podiam competir com a reprodutibilidade destes e, por outro lado, se se quisesse utilizar as novas constantes com base nos valores convencionais da carga elementar e da constante de Planck esbarrava-se na imprecisão das unidades em que estavam expressas estas grandezas.

O caminho era óbvio: fixar valores para a *constante de Josephson* $K_{J-90}=2e/h$ e igualmente para o que passou a ser designado por *constante de von Klitzing*, $K_{K-90}=h/e^2$.

Uma comissão, nomeada pelo Comité Consultivo de Electricidade, estudou especialmente o assunto e, em 1989, apresentou soluções que no mesmo ano mereceram a aprovação do CIPM e, conforme o que foi acordado, a partir de 1 de Janeiro de 1990 entraram em vigor novos valores para ambas as constantes:

$$K_{J-90} = 483\,597,9 \text{ GHz}$$

$$K_{K-90} = 25\,812,807 \text{ } \Omega$$

Julga-se que estes valores poderão estar afastados dos valores absolutos de menos de 0,4 p.p.m., no primeiro caso, e menos de 0,2 p.p.m. no segundo. Trata-se de uma redefinição que atinge principalmente o volt e que, face ao valor de 483 594 GHz/V convencionado em 1976, o faz sofrer um acréscimo ligeiramente superior a 8 p.p.m..

Também o ohm sofre uma variação, mas muito pequena. Se o valor anteriormente convencionado para a constante era de 25 812,8 Ω o aumento de 0,007 Ω corresponde a um decréscimo de 0,27 p.p.m, no valor do ohm.

Arrastadas por estas duas unidades também outras tiveram que ser remodeladas; tais como o ampere e o watt. Isso levou a que resistências padrão, pilhas padrão, pontes, voltímetros e amperímetros digitais com 6 1/2 dígitos ou mais, tivessem que ser calibrados de novo.

Assim a partir de 1990 todos os padrões nacionais do volt e do ohm puderam ser corrigidos, em relação aos valores teóricos absolutos, com um erro não superior a 5×10^{-7} .

8.3.7 - COMPARAÇÕES INTERNACIONAIS

Até à década de 70, passada, a manutenção dos padrões nacionais era, em qualquer país, assegurada pela comparação de pilhas de tipo Weston (para o volt), de resistências padrão (para o ohm) e de condensadores padrão (para o farad), levadas a efeito regularmente de 3 em 3 anos, com os padrões internacionais mantidos pelo BIPM e cujos valores iam sendo corrigidos por confrontação com as médias dos padrões dos laboratórios mais importantes e ainda com o resultado de medições absolutas do ohm, do ampere e do volt realizadas nesses laboratórios e no BIPM.

Para as comparações internacionais os padrões tinham que viajar e isso afectava-os, principalmente as pilhas. A preocupação daí resultante levou a que logo em 1935 o Comité Consultivo de Electricidade - CCE tomasse a resolução de solicitar ao CIPM que transmitisse aos governos dos países interessados um pedido de autorização *para que os instrumentos muito delicados, e em particular os padrões, quando em viagem, fossem incluídos na mala diplomática*. As pilhas exigiam ser transportadas dentro de contentores munidos de suspensões cardan, para que a sua inclinação não excedesse estreitos limites. O movimento da pilha afectava a sua força electromotriz e antes de poder ser submetida a medição precisava de um demorado repouso. E além disso, tanto as pilhas, como as resistências, como os condensadores eram ainda afectados pela temperatura.

O aparecimento no fim dos anos 60 dos padrões de força electromotriz baseados no diodo de Zenner, apresentando tensões de saída estáveis de 1 V, 10 V e de 1,018 V (esta última tensão variável, para permitir a comparação com pilhas padrão), solucionou em grande parte o problema do transporte das pilhas e permitiu que os padrões nacionais de

força electromotriz mais se aproximassem do do BIPM. Mas o factor que maior contributo deu foi a adopção, por parte de muitos laboratórios nacionais, do método de Josephson para medir tensões. Para se ter ideia do salto evolutivo resultante desta medida basta referir que os valores do volt, em oito dos laboratórios mais importantes, nas comparações internacionais de 1967, distribuíam-se em redor do volt BIPM, por uma faixa com a extensão de $14 \mu\text{V}$, enquanto que na comparação seguinte, a de 1970, ficaram confinados a um espaço de $3 \mu\text{V}$.

Em 1999 estas diferenças já não se exprimiam em microvolts mas em nanovolts; contudo a evolução foi lenta. Assim, em 1975, um equipamento pertencente ao BIPM, constituído por uma junção Josephson associada a um gerador de energia e a um conjunto de resistências (uma rede Josephson) com a tensão de saída de 1V, foi enviado à Alemanha, ao PTB em Braunschweig. A comparação do volt do BIPM com o do PBT foi realizada, medindo ambos os equipamentos uma pilha Weston, em absoluto repouso e com temperatura regulada. A comparação revestiu-se de enorme interesse dado que se tratava de dois equipamentos funcionando em condições bastante diferentes. No do BIPM a frequência da microonda era de 9 Mhz e no do PBT de 70 MHz, a temperatura criogénica era de 1,5 K, contra 4,2 K do equipamento alemão e a tensão de Josephson era de 10 mV no BIPM e de 3 mV no PBT. A diferença encontrada entre ambos os volts foi de aproximadamente 40 nV, ou seja de 4 partes em 10^8 . Em 1978 foi o equipamento Josephson do BIPM transportado ao NPL (Inglaterra) e comparados ambos os volts. Iguamente serviu de comparador uma pilha Weston. O volt do BIPM superava o volt do NPL em 70 nV ou seja em cerca de 7 partes em 10^8 .

Entretanto o dispositivo Zenner foi sendo aperfeiçoado e nos anos 80 a sua aceitação como padrão viajante era geral, tornando-se correntes as comparações, quer entre dois países quer entre qualquer país e o BIPM. Para esta última hipótese o BIPM passou mesmo a possuir padrões Zenner disponíveis para o efeito. Por exemplo em 1996 foi medida a diferença entre o volt do IEN (Itália) e o do BIPM, sendo de 22 nV a diferença. Em 1997 as comparações BIPM-NML (Irlanda) e BIPM-JV (Noruega) entre as tensões de 1,018 deram uma diferença de 22 nV para o NML e de 43 nV para o JV, o que corresponde a cerca de 2 partes e 4 partes em 10^8 , respectivamente.

Em face da facilidade das comparações internacionais e da importante redução das diferenças entre países verificada, em 1998 o CIPM sugeriu que as comparações internacionais de grandezas eléctricas passassem a ser feitas apenas de dez em dez anos.

O passo seguinte foi a comparação directa entre as tensões de saída de duas redes Josephson ligadas em série e oposição por meio de um galvanómetro sensível. O SQUID (Superconducting Quantun Interference Device), basicamente um detector de campos magnéticos, é o elemento importante do galvanómetro sensível, que lhe permite uma resolução de 1 pV (10^{-12}V). Em 1996 no BIPM foram comparadas, uma rede Josephson de 1,018 V de saída, com outra rede pertencente ao IEN. Concluiu-se que a tensão desta último era 0,1 nV superior à do BIPM, com uma incerteza de medição de 0,2 nV. Em 1997 foram comparadas no BIPM duas redes Josephson de 10 V, uma fabricada pelo NIST (E.U.A.) e outra pelo PTB (Alemanha), ambas oferecidas ao BIPM. A diferença foi de 0,05 nV com uma incerteza de 0,11 nV. No mesmo ano e pela primeira vez, assistiu-se

no PTB a uma comparação de três redes de 10V; duas executadas no PTB e a terceira de origem sueca (SP). A incerteza geral foi de 1 parte em 10^9 .

Pode afirmar-se que, nas melhores condições de trabalho, a reprodutibilidade do volt, pelo efeito de Josephson, é actualmente de algumas partes em 10^{10} , mas que só está disponível na comparação directa das redes, uma vez que os padrões viajantes do tipo Zenner não têm estabilidade comparável.

No que diz respeito aos padrões de resistência era também usual a comparação trienal efectuada no BIPM, em regra sobre padrões de 1Ω e de $10\text{ k}\Omega$. O panorama da comparação internacional teve uma primeira melhoria na passagem do triénio 1967/1970 (consequência indirecta do efeito de Josephson) e teve um segundo salto qualitativo quando surgiu o efeito quântico de Hall e com ele a possibilidade de medição absoluta de resistências. A comparação internacional entre os países que possuem o equipamento comumente designado por QHR (Quantized Hall Resistance) começou em 1987 com um padrão viajante de 1Ω . Em 1990 houve segunda comparação internacional, já com padrões de 1Ω e de $10\text{ k}\Omega$ e entre 1996 e 1999 houve no BIPM comparações de padrões de $10\text{ M}\Omega$ e de $1\text{ G}\Omega$.

Actualmente a reprodutibilidade do QHR anda por algumas partes em 10^9 , enquanto que a estabilidade das resistências viajantes não excede 3 ou 4 partes em 10^8 . Também neste caso se procurou evitar os inconvenientes dos padrões viajantes, construindo o BIPM um equipamento QHR montado sobre uma viatura, na qual segue também uma resistência padrão de 100Ω , num contentor com regulação térmica. Essa resistência, medida pelo equipamento do BIPM e pelo do laboratório visitado, colocados lado a lado, estabelece a diferença entre os respectivos valores do ohm. As primeiras comparações deste tipo ocorreram entre Dezembro de 1993 e Outubro de 1995 e envolveram, além do BIPM o LCIE (França), o OFMET (Suíça) e o PBT.

No que respeita à capacidade, antes da descoberta do teorema de Thomson-Lampard, a comparação internacional era trienal e realizada no BIPM sobre condensadores viajantes de $0,1\mu\text{F}$ (com dieléctrico de mica) e, posteriormente sobre condensadores de 10 pF (com dieléctrico de sílica), tendo entretanto o condensador de $0,1\mu\text{F}$ dado lugar ao de 100 pF .

Embora a capacidade seja susceptível de medição directa absoluta, em 1997 no BIPM foi realizada uma ponte de impedâncias, de relação 10:1, que servirá como elo de ligação entre a medição de QHR, com corrente alternada de frequência baixa (1 592 Hz), e de condensadores padrão, ou seja, que medirá capacidade à custa da impedância e da frequência. A ponte foi experimentada de colaboração do PTB, com resultados satisfatórios, usando condensadores de 10 pF e de 100 pF previamente medidos em ambas as instituições.

9

A MOLE

As primeiras concepções sobre a natureza e a constituição da matéria ocorreram na Grécia antiga há cerca de dois mil e quinhentos anos. Foi lá que se forjou a ideia da indestrutibilidade da matéria, a qual assentaria, em última análise, num único elemento: a água, o ar ou o fogo.

Empédocles (450 a.C.) dizia que as "raízes", ou elementos, eram: terra, ar, água e fogo, as quais, combinadas em proporções diferentes, podiam explicar todas as inúmeras espécies de matérias conhecidas.

Leucipo e Demócrito (460 a.C) sustentaram que a matéria era composta por partículas pequenas e indivisíveis, a que chamaram átomos (que significa indivisível), como hipótese alternativa à de um simples elemento, e acreditavam que existiam diferentes tipos de átomos para cada material. Segundo Demócrito "*de acordo com a convenção, há um doce e um amargo, um quente e um frio, assim como há a cor; mas, de facto, o que existe são átomos e um vazio*".

A esta teoria opôs-se Aristóteles (384-322 a.C.) que acreditava que a matéria era contínua. As suposições deste grande compilador do conhecimento científico de então, foram aceites até ao século XVII. Assim, durante a Idade Média a teoria atómica conservou-se em suspenso e só foi retomada efectivamente depois do Renascimento.

R. Boyle (1627-1691) e I. Newton (1642-1727) publicaram artigos nos quais diziam acreditar na natureza atómica dos elementos. No entanto, os seus trabalhos não conseguiam, de facto, provar a existência de átomos uma vez que recorriam a este conceito nas suas especulações físicas e químicas mas não conseguiam fazer previsões.

Em 1808, J. Dalton (1766-1844) apresentou hipóteses lógicas sobre a existência de átomos e nos princípios do século XIX, a teoria atómica foi apresentada como a explicação inevitável das propriedades físicas da matéria, tais como a existência dos

estados sólido, líquido e gasoso e dos factos quantitativos precisos das combinações químicas.

Dalton assumiu os átomos como as menores partículas constituintes da matéria. Contudo, experiências efectuadas ao longo do século XIX e princípio do século XX, por diversos cientistas, revelaram a existência de partículas subatómicas: electrão (com carga eléctrica negativa), protão (com carga eléctrica positiva) e neutrão (electricamente neutro). Os átomos são espécies electricamente neutras, pelo que têm o mesmo número de protões e de electrões; átomos do mesmo elemento têm o mesmo número protões (número atómico) mas podem diferir no número de neutrões (ou seja, podem diferir no número de massa, que é a soma do número de protões e de neutrões). Átomos do mesmo elemento com diferentes número de massa, designam-se isótopos. Um átomo de um determinado isótopo designa-se, nuclídeo.

A representação simbólica convencional de um elemento X , é a seguinte:



sendo, Z o número atómico e A o número de massa.

A massa de um átomo é função do número de partículas subatómicas que o constituem. Os protões e os neutrões têm aproximadamente a mesma massa, enquanto que os electrões têm muito menos massa (cerca de duas mil vezes menos) pelo que, a massa dos átomos é determinada, fundamentalmente, pelo seu número de protões e neutrões. Os átomos do mesmo elemento que diferirem no número de massa, ou seja, os isótopos, têm massas diferentes.

Massa das partículas subatómicas	
Partícula	Massa (kg)
Protão	1.67252×10^{-27}
Neutrão	1.67482×10^{-27}
Electrão	9.10953×10^{-31}

Para exprimir relações quantitativas entre os pesos de cada um dos diversos átomos intervenientes na formação de uma molécula, por uma reacção química, não era cómodo recorrer aos pesos efectivos desses átomos uma vez que estes apresentam valores muito pequenos; assim, procurou-se exprimi-los numa escala relativa de pesos atómicos e pesos moleculares, baseada na atribuição do valor de um peso padrão a determinado átomo. Surgiram as noções de "átomo-grama" e de "molécula-grama", como sendo as quantidades representadas pelos pesos atómico e molecular, expressos em gramas.

Os químicos, nos seus cálculos usam, de facto a massa e não o peso (que é apenas a força de atracção gravítica de um corpo); no entanto, as massas são determinadas relativamente a uma massa de referência, num processo que se designa *pesagem*. Daí a frequente utilização indiscriminada dos termos "pesos" e "massas" atómicas.

As sucessivas bases de expressão das grandezas atómicas serão a seguir mencionadas, por ordem cronológica.

9.1 - PERÍODO DE 1700 A 1900

J. Dalton realizou inúmeras experiências sobre a combinação de gases e constatou que:

- os elementos são constituídos por partículas indivisíveis, os átomos;
- os átomos do mesmo elemento são iguais, pelo que têm a mesma massa;
- os compostos são constituídos por átomos de mais de um elemento;
- as reacções químicas consistem na separação, combinação ou rearranjo de átomos.

Como já foi referido, estes estudos permitiram a aceitação definitiva da teoria atómica da matéria e marcaram o início da era moderna na Química. Contudo, mais tarde constatou-se que os átomos de um dado elemento não são necessariamente idênticos, uma vez que podem possuir várias formas isotópicas que diferem na massa atómica.

Dalton representou simbolicamente os átomos elementares por pontos, cruces e estrelas, desenhados dentro de pequenos círculos e calculou, pela primeira vez, pesos atómicos relativos a partir das percentagens mássicas dos compostos, usando um sistema arbitrário para determinar a composição de cada composto. Embora, esta tenha sido uma contribuição muito importante do ponto de vista científico, verificou-se pouco tempo depois que muitos dos seus cálculos não estavam correctos. A principal fonte de erro, de Dalton no cálculo dos pesos atómicos, foi o facto de não considerar que átomos do mesmo tipo pudessem reagir entre si. Ou seja, ele não concebia a existência de moléculas como H_2 , O_2 , N_2 , Cl_2 , etc.. Esta ideia era reforçada pelos cientistas H. Davy (1778-1829) e M. Faraday (1791-1867) que de acordo com os seus estudos electroquímicos, consideravam que os metais eram positivos e os não-metais eram negativos, pelo que as espécies não metálicas, especialmente do mesmo tipo, repelir-se-iam. Assim, para Dalton, por exemplo a fórmula química da água era HO e, de acordo com os seus cálculos, a massa atómica relativa do oxigénio era 8.

Nesse tempo os elementos conhecidos eram, em número, cerca de vinte, e isso obrigava a imaginar outros tantos tipos de átomos, o que era demasiado para a época. Assim, para tornar a dificuldade, em 1816, o inglês W. Prout (1785-1850), admitiu que os átomos de todos os elementos seriam constituídos por agrupamento de um só tipo de átomo: o átomo de hidrogénio e, que teriam pesos diferentes por serem constituídos por diferente número de átomos de hidrogénio. Daí a suposição que, atribuindo ao peso atómico do hidrogénio o valor 1, todos os outros átomos deveriam ter pesos expressos por números inteiros.

O trabalho de Dalton foi prosseguido pelo seu discípulo, o químico sueco J. J. Berzelius (1779-1848) que determinou, com rigor, a massa atómica dos elementos conhecidos na altura e a composição elementar exacta de um grande número de compostos. No seu trabalho, usou o oxigénio como referência, considerando o seu peso 100 e verificou que o peso dos compostos não eram múltiplos inteiros do átomo de hidrogénio. O oxigénio era uma melhor referência que o hidrogénio, uma vez que forma compostos com muito mais elementos pelo que, apenas com uma medida era possível obter massas relativas de mais elementos.

Motivado pelo seu extenso trabalho na determinação de pesos atómicos, Berzelius, introduziu o sistema de símbolos químicos hoje usado, no qual os elementos são

abreviados por uma ou duas letras a partir do seu nome em Latim e no qual os símbolos representam, também, a massa relativa de um elemento, correspondente ao seu peso atómico. Assim, na equação de uma reacção química, H, representa não apenas hidrogénio, mas uma massa de hidrogénio igual a 1 (um grama, um quilograma, ou outra unidade que se queira); enquanto que, por exemplo, o símbolo O representa uma massa de oxigénio igual a 16, expressa nas mesmas unidades. Durante o Século XVIII foram ainda propostos, como base da escala de pesos atómicos, outros elementos: O=1, O=15,96, O=16, O=100 e Ag=1.

Entretanto, em 1809, o químico francês, J. L. Gay-Lussac (1778-1850) apresentou uma lei, na sequência de uma série de reacções efectuadas com gases, segundo a qual, a temperatura e pressão constantes, os volumes dos reagentes e produtos gasosos se encontram numa razão de número inteiros pequenos. Poucos anos mais tarde, em 1811, o físico italiano A. Avogadro (1776-1856), enunciou o que hoje se conhece como Hipótese de Avogadro que diz que, *nas mesmas condições de temperatura e pressão, iguais volumes de diferentes gases contêm o mesmo número de partículas*. A Hipótese de Avogadro em conjunto com a lei enunciada por Gay-Lussac, eram a chave para uma melhor compreensão da diferença entre átomos e moléculas e, conduziam à conclusão da validade, das fórmulas químicas de, por exemplo: hidrogénio (H_2), oxigénio (O_2) e água (H_2O). No entanto, estas ideias eram tão revolucionárias para a época que só foram aceites, em 1860, por proposta de Stanislaw Cannizzaro (1826-1910) na primeira conferência internacional de Química, em Karlsruhe, Alemanha. Este cientista tornou, ainda, clara a diferença entre átomos e moléculas.

9.2 - PERÍODO DE 1900/1960

Cerca de 1900 surgiu a palavra *mole*, introduzida por W. F. Ostwald (1853-1932) para designar uma quantidade de matéria cuja massa, em gramas, era igual ao seu peso molecular ou atómico. No entanto, uma vez que gramas é a unidade de massa, era pouco explícito a grandeza da qual, a mole era a unidade. Alguns anos mais tarde, Ostwald tornou o conceito mais claro, ao relaciona-lo com os gases ideais, dizendo que uma mole era a quantidade de qualquer gás, que nas condições normais, ocupa um volume de 22414 ml.

Em 1902, por proposta da Comissão Internacional para os Pesos Atómicos, e tal como já anteriormente havia sido sugerido pelo químico belga J. S. Stas (1813-1891), passou a considerar-se, como base de referência, o peso do oxigénio igual a 16; entendendo-se o oxigénio, como o oxigénio natural, ou seja, a mistura natural de isótopos.

Esta convenção originou, durante o tempo em que esteve em vigor -até 1961- alguma confusão, motivada pelo facto existirem duas escalas:

- uma, usada pelos físicos que atribuía o valor 16 à massa - do oxigénio $^{16}_8O$;
- a outra, a "escala química", usada para avaliação dos resultados das reacções químicas, e cuja unidade era 1,000 272 vezes maior. Isto devia-se ao facto de os químicos atribuírem o mesmo valor à massa do oxigénio que se encontra na atmosfera, e que é uma mistura dos isótopos 16, 17 e 18.

9.3 - PERÍODO DE 1960 A 1970

Em 1959/60 a União Internacional de Física Pura e Aplicada (I.U.P.A.P.) e a União Internacional de Química Pura e Aplicada (I.U.P.A.C.), com o objectivo de ultrapassar as discrepâncias verificadas pelo facto de se considerarem duas escalas diferentes baseadas no oxigénio, propuseram que se considerasse, exactamente, 12 a massa atómica relativa do isótopo de carbono cujo número de massa é 12 ($^{12}_6\text{C}$). Assim, a unidade unificada de massa atómica (u) define-se como sendo 1/12 avos da massa do $^{12}_6\text{C}$, ou seja, um átomo de $^{12}_6\text{C}$ tem 12 u. Experimentalmente, determinou-se que a massa de um átomo de $^{12}_6\text{C}$ é 1.9926×10^{-26} kg, pelo que $1 \text{ u} = 1.6605 \times 10^{-27}$ kg. Esta unidade, que no campo da Bioquímica é designada *Dalton*, com símbolo Da, não é propriamente uma unidade SI mas é aceite pelo Sistema.

Contudo, as amostras de matéria contêm normalmente, um grande número de átomos e, ainda, não estava estabelecida uma unidade que definisse a quantidade de matéria. Na sequência de propostas da U.I.P.A.P., da U.I.P.A.C. e da I.S.O., o CIPM definiu, em 1967, e confirmou em 1969, a unidade *mole*, nos seguintes termos:

- *Mole* é a quantidade de matéria de um sistema contendo tantas entidades elementares (átomos, moléculas, iões, electrões, outras partículas ou, agrupamentos especificados de partículas) quantos os átomos que existem em 0,012 kg de $^{12}_6\text{C}$.
- Quando se usar o termo *Mole* devem ser especificadas as entidades elementares, podendo ser átomos, moléculas, iões, electrões, outras partículas, ou grupos especificados de tais partículas.

Técnicas modernas, permitiram determinar esse valor com rigor, como sendo $6.02214199 \times 10^{23}$ átomos, e a este número designou-se por *número de Avogadro*, N_A . Uma mole de qualquer substância consiste em 6.0221499×10^{23} unidades dessa substância.

Assim, por definição, uma mole de uma substância química é o número, em gramas, correspondente à massa atómica ou molecular, em unidades de massa atómica.

9.4 - DEPOIS DE 1970

A reunião da 14ª CGPM, em 1971, assinala a subida da mole à categoria de unidade de base do Sistema Internacional de Unidades. Assim, às seis unidades fundamentais já existentes, foi reunida mais uma: a mole, cujo símbolo é mol, e com definição algo semelhante à já referida mole proposta por Ostwald, mas com âmbito mais alargado. Foi então decidido que:

- 1—A mole é a quantidade de matéria dum sistema que contém tantas entidades elementares quantos átomos existem em 0,012 quilogramas de carbono 12; tem por símbolo o termo "mol".
- 2—Quando se usa a mole, devem ser especificadas as entidades elementares, que podem ser átomos, moléculas, iões, electrões, outras partículas, ou grupos especificados de tais partículas.
- 3—A mole é uma unidade de base do Sistema Internacional de Unidades.

Em 1980, o CIPM aprovou um relatório da CCU, especificando que a definição se refere a átomos carbono 12 não ligados, no seu estado fundamental e em repouso.

No que respeita ao grau de precisão possível, na medição da massa de uma mole de uma dada substância, ele depende fundamentalmente do grau de precisão com que forem conhecidas as massas atómicas relativas dos diversos elementos, o qual, em alguns casos, atinge, quando muito, o valor de uma parte em 10^7 . Desde 1920, a IUPAC publica relatórios, normalmente bianualmente, com os pesos atómicos recomendados. A partir de 1979, estes valores passaram a designar-se, "pesos atómicos padrão" e, desde 1969, todos os valores têm sido publicados com os graus de incerteza estimados.

Assim, de acordo com a definição a massa relativa de um determinado átomo, A_r , é a sua massa comparada com 1/12 da massa de carbono 12:

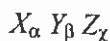
$$A_r = \frac{\text{massa do átomo}}{1 \text{ u}} = \frac{12 \times \text{massa do átomo}}{\text{massa de um átomo } {}^{12}_6\text{C}} \text{ u}$$

A massa atómica de um elemento é a média ponderada das massas atómicas dos isótopos desse elemento, que ocorrem naturalmente. Por exemplo, o carbono tem dois isótopos principais, o ${}^{12}_6\text{C}$ e ${}^{13}_6\text{C}$. De acordo com a definição o ${}^{12}_6\text{C}$ tem exactamente 12 u.m.a. e constitui 98,89% do carbono que ocorre naturalmente; o ${}^{13}_6\text{C}$, cuja massa é 13.00335 u.m.a., constitui 1,11% (existem ainda vestígios, em quantidade desprezável, do isótopo radioactivo ${}^{14}_6\text{C}$). Assim, a massa atómica relativa do carbono, tal como este ocorre naturalmente, é:

$$A_r(C) = \frac{(98.89 \times 12.000) + (1.11 \times 13.00335)}{100} = 12.01115 \text{ u}$$

A abundância relativa dos isótopos depende, muitas vezes, do meio onde se tira a amostra e do estado físico em que o elemento se encontra (sólido, líquido ou gasoso) pelo que a massa atômica média pode variar.

No caso geral, a massa molecular relativa, $M_r(A)$, de um composto A cuja fórmula química seja,



é:

$$M_r(A) = \left[\alpha \frac{m(X)}{m({}^{12}_6\text{C})} + \beta \frac{m(Y)}{m({}^{12}_6\text{C})} + \chi \frac{m(Z)}{m({}^{12}_6\text{C})} \right] \times 12 \text{ u}$$

que é equivalente a,

$$M_r(A) = \alpha \times A_r(X) + \beta \times A_r(Y) + \chi \times A_r(Z) \text{ (u)}$$

sendo $m(X)$, $m(Y)$ e $m(Z)$ as massas atômicas dos elementos X , Y e Z , respectivamente, $m({}^{12}_6\text{C})$ a massa atômica do carbono 12, e A_r as massas atômicas relativas.

Massa molar é a massa, em quilograma, de uma mole de átomos, moléculas, ou outras partículas.

De acordo, com a definição de mole a massa molar de um elemento, ou de um molécula, expressa em grama é numericamente igual à massa atômica, ou molecular, expressa em unidades de massa atômica, uma vez que:

$$A_r \text{ é } (6.02214199 \times 10^{23} \text{ átomos } {}^{12}_6\text{C}) \left(\frac{12 \text{ u}}{\text{átomos } {}^{12}_6\text{C}} \right) = 12 \text{ g} \Leftrightarrow 6.02214199 \times 10^{23} \text{ u} = 1 \text{ g}$$

AS UNIDADES FUNDAMENTAIS DO SISTEMA INTERNACIONAL
- *ASPECTOS HISTÓRICOS E TÉCNICOS* -

10

O KELVIN

10.1 - RESENHA HISTÓRICA

Na história da humanidade, desde muito cedo que a sensação de calor, colhida directamente através dos sentidos, intrigou os filósofos e foi, por isso, objecto de tentativas de explicação.

Segundo uma das hipóteses mais antigas, o calor era materializado na forma de um fluido imponderável e invisível, denominado *calórico*, que, em pequeníssimas partículas, emanava dos corpos quentes, projectando-se em todas as direcções e a qualquer distância.

Nesta ideia comungavam espíritos ilustres, tais como Newton, Laplace, Lavoisier, Gay-Lussac e outros.

Convém no entanto acrescentar que, a princípio, a noção de calor não tinha o sentido exacto que tem hoje; andava associada e confundida com a noção de temperatura.

Coube ao inglês Joseph Black (1728-1799) o mérito de ter desfeito a confusão até então existente, apresentando calor e temperatura como duas entidades distintas, às quais chamou *quantidade de calor* e *intensidade de calor*, respectivamente.

Não ficou por aqui a acção de J. Black; estudou a mudança de estado do gelo em água e desta em vapor, deu-se conta da existência dos calores latentes correspondentes a estas mudanças de estado e formulou ainda uma teoria sobre o calor específico.

A partir do princípio do século XIX, novas ideias surgiram, dando forma a uma outra hipótese denominada então *das ondulações*, em oposição à anterior que era designada por *da emissão*.

Segundo a nova teoria as moléculas que formam os corpos estão animadas de um movimento rápido, de muito pequena amplitude, o qual constitui a essência do calor. A

sua transmissão à distância explicava-se, ao tempo, pela intervenção de um meio perfeitamente elástico e que preenchia todo o Universo: o *éter*.

Por motivo do movimento das moléculas, tomou a teoria o nome de *teoria dinâmica do calor* ou ainda *teoria termodinâmica*.

Não deixa de ser curioso referir que Newton, embora por princípio aceitasse a teoria do *calórico*, acreditava que a origem do calor residia no movimento dentro dos corpos.

Porém, foi só nos anos quarenta e cinquenta do século XIX que se deu o passo fundamental do relacionamento entre o calor e a energia e que tiveram expressão, tanto teórica como experimental, as transformações de trabalho em calor e vice-versa.

Em 1839 o francês Seguin, numa obra sobre caminhos de ferro, anunciava que *a força mecânica desenvolvida durante o arrefecimento de um vapor é a medida do calor perdido*; em 1842 o professor alemão Mayer formulava a primeira relação analítica entre trabalho mecânico e o calor necessário para o produzir; finalmente em 1843 Joule, professor em Manchester, determinou o equivalente mecânico do calor. Estava lançada a "teoria dinâmica do calor", em relação à qual, uma melhor compreensão da natureza electromagnética da radiação térmica permitiu, já no século XX, recusar qualquer significado à ideia do "éter".

10.2 - ESCALAS TERMOMÉTRICAS

A construção dos primeiros termómetros tem sido atribuída a diversos nomes notáveis, tais como Galileu, o médico holandês Drebbel, o médico veneziano Sanctórius, nos finais do século XVI, ou ainda ao francês G. Amontons, no século seguinte. Este último, contemporâneo de Boyle e de Mariotte, completou o trabalho de ambos, chegando mesmo a admitir a existência de um zero absoluto que, supõe-se hoje, corresponderia a cerca de -240°C . Houve assim uma antecipação ao trabalho de Charles e de Gay-Lussac que, um século mais tarde, fixariam o valor em -273°C .

Os primeiros termómetros funcionaram por dilatação de ar, depois por dilatação de álcool e, finalmente, por dilatação de mercúrio.

A generalização do emprego do termómetro só se deu no século XVIII, sendo dessa época a criação das três escalas termométricas que chegaram até aos nossos dias. Qualquer delas é completamente arbitrária e repousa na escolha de duas temperaturas, afastadas entre si, a uma das quais era atribuído o valor zero, enquanto que à outra se atribuíam um valor elevado.

Em 1714 o alemão D. G. Fahrenheit (1686-1736) adoptou uma escala, que tem o seu nome, muito expandida depois na Inglaterra, Holanda e E.U.A.. O seu ponto inferior era obtido misturando em pesos iguais, neve e cloreto de amónia; o ponto mais elevado era a temperatura de ebulição da água. Na graduação, atribuíam-se zero ao ponto mais baixo e 212 ao mais elevado.

Quando mergulhado no gelo fundente marcava 32 °F, o que equivalia a uma relação da temperatura expressa em graus Fahrenheit $t_{(°F)}$ com a temperatura Celsius $t_{(°C)}$, de:

$$t_{(°C)} = [t_{(°F)} - 32] \times \frac{100}{212 - 32} = \frac{t_{(°F)}}{1,8} - 17,78$$

A razão de ser do número 212 reside no facto de se ter pretendido atribuir à temperatura normal do corpo humano o valor de 100 °F. Porém, substituindo este valor na fórmula de conversão para graus Celsius encontra-se uma temperatura um pouco superior. A explicação por vezes apontada é que Fahrenheit, criador do primeiro termómetro funcionando por dilatação de mercúrio, quando estabeleceu a escala que tem o seu nome, talvez estivesse com problemas de saúde; mas muito provavelmente o desvio ficou a dever-se à imprecisão com que funcionam as misturas refrigerantes do género da que foi utilizada para marcar o zero da escala Fahrenheit.

Em 1731 R. Reamur (1683-1757), físico francês, criou uma nova escala cujo ponto mais baixo é a temperatura do gelo fundente e cujo ponto mais alto é a temperatura de ebulição da água à pressão normal. O intervalo entre estes dois pontos é dividido em 80 graus. A relação com a escala Celsius é:

$$t_{(°C)} = \frac{100}{80} \times t_{(°R)} = 1,25 \times t_{(°R)}$$

Finalmente em 1742 o físico e astrónomo sueco A. Celsius criou a escala com o seu nome, hoje usual, e que tem por zero a temperatura do gelo fundente e por ponto mais elevado a temperatura de ebulição da água à pressão normal.

Caído um tanto no esquecimento, o proponente desta escala, – logo de início designada por escala centígrada – foi em 1945, quando da 9ª CGPM, homenageado com a aprovação da designação de *grau Celsius*, com o símbolo (°C), para o, anteriormente designado, *grau centígrado*.

Mas se consultarmos manuais de Física ou até as próprias publicações da CGPM, além da referência ao grau Celsius, surgem também expressões como: *temperatura absoluta* e *temperatura termodinâmica*. Vejamos em que consistem.

10.2.1 - TEMPERATURA ABSOLUTA

A ideia de uma temperatura absoluta, ou melhor, da existência de um verdadeiro zero na escala da temperatura, vinha já do século XVII; embora rodeada de uma certa dose de imprecisão. Foram as experiências com a dilatação de sólidos, líquidos e gases, – e principalmente a determinação dos coeficientes de dilatação destes últimos –, que levaram à conclusão inevitável da existência do zero, ou seja, de um limite absoluto no decrescer da temperatura.

A experiência havia demonstrado que aquecendo uma determinada massa de gás num recipiente em que era mantido constante o volume, a relação entre a pressão média p e a temperatura t , em graus Celsius, era uma relação linear, do tipo:

$$t = A p + B \quad (10.1)$$

em que A e B são constantes. Se forem p_i e p_s , as pressões às temperaturas $\theta = 0$ e $\theta = 100$, respectivamente, vem:

$$\begin{aligned} 0 &= A p_i + B \\ 100 &= A p_s + B \end{aligned} \quad (10.2)$$

Resolvendo o sistema e substituindo A e B em 10.1) :

$$t = 100 \times \frac{p - p_i}{p_s - p_i} \quad (10.3)$$

Há assim uma temperatura θ_0 para a qual a pressão p se anula, e isso constitui um limite físico da experiência - sabendo-se que a pressão resulta das colisões das moléculas contra as paredes do reservatório que as contém, uma pressão negativa não tem sentido físico. É pois:

$$t_0 = - \frac{100 p_i}{p_s - p_i}$$

Experiências realizadas com diversos gases e em diferentes condições conduziram todas ao valor $t_0 = -273,15$, que seria o ponto zero da escala absoluta.

Esta escala ficaria, por conveniência, com graus iguais aos da escala Celsius. A relação entre os valores de uma temperatura, expressa quer na escala Celsius: t , quer em valor absoluto: T será então

$$T = (t + 273,15) \text{ } ^\circ\text{K}$$

sendo $^\circ\text{K}$ o símbolo do *grau kelvin* (como se escrevia até 1967 - 13^a CGPM), e que a partir desta data é designado apenas por *kelvin* com o símbolo K

Ao contrário do que sucede com as escalas de Fahrenheit, de Reamur e de Celsius, para definir uma escala absoluta não são precisos dois pontos de referência; basta apenas ligar um ponto da escala à temperatura de um fenómeno natural. Escolheu-se para tal o ponto triplo da água que, pela sua elevada reprodutibilidade ($\pm 0,0001$ $^\circ\text{C}$) permite uma melhor definição. Rigorosamente, este ponto, na escala Celsius vale cerca de 0,0098 graus, mas para simplificar convencionou-se atribuir-lhe o valor de 0,01 $^\circ\text{C}$ ao fixar-se em 273,16 a sua temperatura absoluta.

Conforme já foi referido quando se definiu o kelvin, entende-se por ponto triplo de uma substância simples, o conjunto de valores bem definidos da pressão e da temperatura, para o qual, as fases, sólida, líquida e gasosa da substância podem coexistir em proporções arbitrarias. Estes valores para a água são: $t = 0,01$ $^\circ\text{C}$ e $p = 611,3$ Pa.

É em grande parte com apoio nos pontos triplos de diversos elementos, em grau muito elevado de pureza, que actualmente se estabelecem os pontos de referência da escala de temperatura termodinâmica. As restantes referências são: pontos de solidificação de alguns metais e também pontos de fusão e de ebulição de outros.

10.2.2 - TEMPERATURA TERMODINÂMICA

De um modo geral, as publicações da CGPM, especialmente a partir de 1954, quando se referem à temperatura, juntam -lhe sempre o adjetivo *termodinâmica*. Vejamos o que significa.

Um caminho directo e seguro é a consulta ao Vocabulário Electrotécnico Internacional, o qual, no capítulo 111 (Física e Química), na secção 01 (Noções Físicas), na definição 111-01-06, (Temperatura Termodinâmica, T) diz: *uma variável de estado, proporcional à energia térmica de um corpo em equilíbrio*.

Há que concordar que a definição, sendo naturalmente correcta, é escassa de significado físico imediato. Para que se chegue a uma ideia de mais fácil acesso é preciso atentar um pouco nos princípios da Termodinâmica, especialmente o segundo. É possível exprimir este princípio de várias formas. Uma delas diz simplesmente: numa transformação termodinâmica a variação da entropia total ou é positiva ou nula; respeitando esta última hipótese às transformações reversíveis.

Imagine-se pois uma certa massa de um gás perfeito contida num volume variável e com possibilidade de ser posta em contacto com qualquer uma de duas fontes de energia térmica, supostas a temperaturas constantes, T_1 (fonte quente) e T_2 (fonte fria).

Façamos então uma transformação reversível - um ciclo de Carnot - constituído por duas isotérmicas, A-B (T_1) e C-D (T_2) e por duas isentrópicas B-C e D-A, conforme representado na Fig. 10-1.

A entropia S é, por definição $dS = dQ/T$, sendo Q a energia trocada com a fonte, à temperatura T . O segundo princípio da Termodinâmica, segundo a formulação de Clausius é, para transformações reversíveis, representado pela equação:

$$\Delta S = \int dS = \int \frac{dQ}{T} = 0$$

$$\Delta S = \int_{AB} \frac{dQ_1}{T_1} + \int_{BC} dS + \int_{CD} \frac{dQ_2}{T_2} + \int_{DA} dS = 0$$

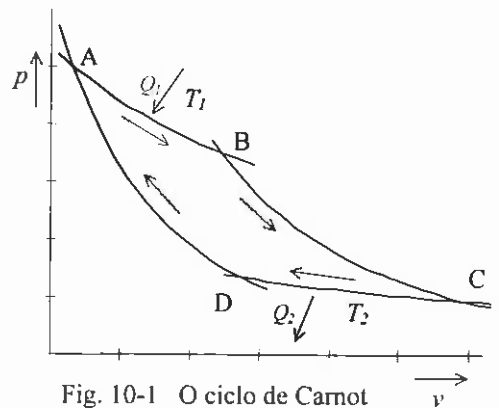


Fig. 10-1 O ciclo de Carnot

A segunda e a quarta parcelas são nulas por se tratar de transformações isentrópicas ($dS=0$); na primeira e na terceira, por serem transformações isotérmicas, T_1 e T_2 (constantes) são postos em evidência e fica:

$$\frac{1}{T_1} \cdot \int_{A B} dQ_1 = -\frac{1}{T_2} \cdot \int_{C D} dQ_2 \quad (10.4)$$

$$\frac{Q_1}{T_1} = -\frac{Q_2}{T_2} \quad (10.5)$$

O sinal negativo que afecta o integral de dQ_2 significa energia térmica cedida pelo sistema, enquanto que dQ_1 , positiva, é energia recebida da fonte quente.

De uma forma geral a expressão (10.5) pode escrever-se:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{|Q_1|}{|Q_2|}$$

Uma vez fixada uma das temperaturas, como temperatura de referência, pode calcular-se a outra, conhecidas que sejam as energias térmicas Q_1 e Q_2 . É portanto uma medição absoluta de temperatura, obtida à custa da medição de quantidades de calor. Por isso a designação de temperatura termodinâmica.

Se se convencionar para o ponto triplo da água (temperatura de referência) $T = 273,16$ os valores obtidos experimentalmente para outras temperaturas irão coincidir com os da temperatura absoluta. De facto não havia necessidade de criar uma nova escala, com as respectivas fórmulas de transferência. Trata-se pois de duas escalas absolutas, concebidas por vias aparentemente diferentes, mas que por razões de ordem prática se fizeram coincidir. Na verdade são apenas dois aspectos de uma mesma realidade.

A escala da Temperatura Termodinâmica foi sancionada pela CGPM na sua 10ª reunião, em 1954

10.3 - TERMÓMETROS

O primeiro termómetro de que há notícia era constituído por um balão de vidro ligado a uma das extremidades dum tubo rectilíneo fino, que conservava a outra extremidade aberta. O balão era cheio de gás (em geral o ar), e no tubo era colocado um pequeno embolo de mercúrio que se deslocava quando, por variação da temperatura, o gás dentro do balão se dilatava ou se contraía. Não era propriamente um termómetro mas antes um termoscópio.

Mais tarde o gás foi substituído por líquido, como o álcool corado e ainda por mercúrio e o tubo foi fechado na extremidade oposta ao balão.

O termómetro de mercúrio, embora para os usos correntes seja ainda hoje muito utilizado, não é famoso no que toca a precisão. Pelo contrário o termómetro de gás, incómodo pelas dimensões que por vezes toma, continua sendo a base da termometria de precisão.

Além dos termómetros de dilatação a que nos vimos referindo, existem outros tipos que também são de considerar: os que medem diferenças de temperatura na forma de uma força electromotriz de natureza termoeléctrica, que lhes é aproximadamente proporcional, outros que medem diferenças de temperatura por variação de uma resistência eléctrica e, no campo das temperaturas mais elevadas, os que medem a temperatura de um corpo por medição da própria radiação térmica. A escolha depende principalmente do campo de medida que se pretende atingir.

Cada um destes tipos de termómetro será objecto de estudo separado.

10.3.1 - A CONSTANTE DE BOLTZMANN

Conforme foi referido em 10.1 – **Resenha Histórica**, a ideia de atribuir as causas do calor dos corpos ao movimento rápido das moléculas que os compõem, base da então chamada "teoria das ondulações", vem já dos fins do século XVII; e a sua confirmação experimental, embora indirecta, não tardou muito.

Foi o caso de o botânico inglês J. Brown, ao observar, em 1827, ao microscópio uma suspensão, em água, de grãos de pólen extremamente finos, ter constatado que os grãos não estavam fixos, como seria de esperar, mas que apresentavam um movimento permanente irregular. De momento atribuiu o fenómeno a qualquer trepidação vinda do exterior.

Intrigado com o sucedido, Brown repetiu a experiência nos dias seguintes, usando então outros líquidos em vez de água e outros tipos de pólen. O resultado foi idêntico, com a diferença que quanto maior o grão de pólen menor a amplitude do movimento.

Este movimento espontâneo de partículas suspensas em líquidos ficou sendo conhecido com o nome de "movimento browniano" e a sua explicação reside no movimento permanente e irregular das moléculas, neste caso, de água. Sendo o grão de pólen pequeno, as inúmeras colisões que, num dado instante, recebe por parte das moléculas do líquido, circundantes, traduzem-se numa resultante que origina o movimento; se o grão é grande, entra em funcionamento a lei dos grandes números, a resultante tende para zero e com ela o próprio movimento.

Equação de Estado dos Gases Perfeitos

A lei de Boyle-Mariotte afirmava a constância do produto da pressão pelo volume de uma massa de gás mantida a temperatura constante. Diversos experimentadores se lançaram na verificação dessa lei e conseqüentemente na pesquisa do passo seguinte: a relação entre o produto da pressão pelo volume e a temperatura.

Surgiu assim a Equação de Estado dos Gases Perfeitos

$$p V = n N_a k T \quad (10.6)$$

na qual são:

p - pressão do gás

V - volume ocupado

n - número de moles do gás

N_a - número de Advogadro

k - constante de Boltzmann

T - temperatura termodinâmica

Se fizermos $N_a k = R$ a equação fica

$$p V = n R T$$

em que R é a constante dos gases perfeitos, expressão que constitui a forma mais corrente da Equação de Estado dos Gases Perfeitos.

Vejamos como se chegou a esta expressão. Os primeiros experimentadores quando tentavam verificar a lei de Boyle-Mariotte, $p V = C^{te}$, para uma determinada temperatura, observaram que a constante variava linearmente com essa temperatura, segundo uma lei com a seguinte forma:

$$p V = p_0 V_0 (1 + \alpha t)$$

sendo α o coeficiente de dilatação do gás, p_0 e V_0 a pressão e o volume de uma mole de gás à temperatura de 0°C e sendo p e V , respectivamente, a pressão e o volume da mesma mole mas à temperatura t .

A expressão acima pode escrever-se

$$\frac{p V}{1 + \alpha t} = p_0 V_0 \quad (10.7)$$

Se imaginarmos a mesma quantidade de gás mas em condições diferentes, definidas por p' , V' e t' será:

$$\frac{p' V'}{1 + \alpha t'} = p_0 V_0$$

A expressão (10.7) pode ser escrita de outra forma:

$$p V = p_0 V_0 \alpha \left(\frac{1}{\alpha} + t \right)$$

Mostrou a experiência que $1/\alpha = 273,15 \text{ }^\circ\text{C}$, logo, fazendo:

$$273,15 + t = T \quad \text{vem:}$$

$$pV = p_0 V_0 \alpha T$$

sendo T a temperatura termodinâmica. Se for $p_0 V_0 \alpha = R$ sendo R a constante dos gases perfeitos, esta expressão pode escrever-se:

$$p \cdot V = R T$$

para uma mole de gás. Se em vez de uma mole forem n moles será:

$$p V = n R T \quad (10.8)$$

Equação de Estado dos Gases Perfeitos, na qual V já não é o volume da mole mas o volume ocupado pelas n moles. A expressão (10.8), deduzida por via empírica, fornece a relação da temperatura, com a pressão e o volume molar, mas nada diz sobre a relação da própria temperatura com a energia das moléculas do gás; a qual relação será objecto de estudo nas alíneas seguintes.

Teoria Cinética dos Gases

Desde meados do século XIX que é ideia assente o facto de existir uma dependência íntima entre a temperatura e a agitação das moléculas constituintes dos corpos. Coube a Boltzmann, estabelecer a definição analítica dessa dependência, por meio da constante (k) que tem o seu nome.

Imagine-se uma determinada massa de gás, formada por N moléculas. cada uma com a massa m , submetida à pressão p , e contida num reservatório de volume V , unitário. Vamos supor ainda que as moléculas estão animadas da velocidade linear v e que estão entre si suficientemente afastadas para que não seja de considerar qualquer interacção.

Na Fig.10-2 representa-se um reservatório e um sistema de eixos coordenados $oxyz$, cujo eixo ox se fez coincidir com a normal a uma das paredes do reservatório. Cada molécula contida no reservatório tem a sua velocidade:

$$\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3, \dots, \vec{v}_i, \dots, \vec{v}_N$$

O módulo da velocidade v , pode ser expressa nos das suas componentes cartesianas:

$$v_i^2 = v_{ix}^2 + v_{iy}^2 + v_{iz}^2$$

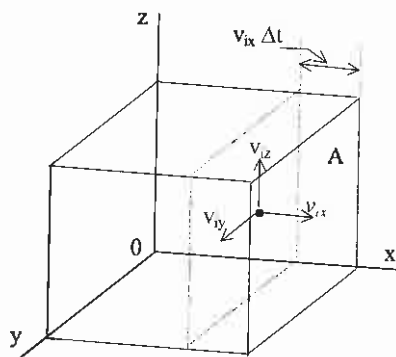


Fig. 10-2 Reservatório de gás de volume unitário

Como no movimento das moléculas não há direcções privilegiadas, admite-se que em média:

$$v_{ix}^2 = v_{iy}^2 = v_{iz}^2 \quad \text{ou seja que} \quad v_i^2 = 3 v_{ix}^2 \quad (10.9)$$

Derivando a quantidade de movimento em ordem ao tempo determina-se a força f_i que uma molécula exerce quando, com a velocidade v_i , colide com a parede do reservatório perpendicular ao eixo ox .

$$\bar{f}_i = \frac{d(m\bar{v}_{ix})}{dt}$$

ou, como se trata de grandezas finitas, se bem que muito pequenas,

$$\bar{f}_i = \frac{\Delta(m\bar{v}_{ix})}{\Delta t} \quad (10.10)$$

em que $(m\bar{v}_{ix})$ é a quantidade de movimento da molécula de velocidade \bar{v}_{ix} , ao colidir com a parede, e Δt o tempo de percurso.

Como se admite que o choque é perfeitamente elástico, há inversão de movimento e só a componente da velocidade segundo ox passa de v_{ix} para $-v_{ix}$ (as outras componentes mantêm-se). A variação da quantidade de movimento será portanto:

$$\Delta(m\bar{v}_i) = -m v_{ix} \hat{x} - m v_{ix} \hat{x} = -2m v_{ix} \hat{x}$$

onde \hat{x} é o versor do eixo ox . Ou, em virtude da eq. (10.10) o módulo da força f_i é:

$$|\bar{f}_i| = \frac{2m v_{ix}}{\Delta t} \quad (10.11)$$

Vejamos agora quantas moléculas atingem a parede no intervalo de tempo Δt . Naturalmente só a atingem as que estão a uma distância igual ou menor que $v_{ix} \cdot \Delta t$, ou seja as que com velocidade v_i , cabem dentro da zona representada na Fig. 10-2, à direita do plano definido pelas linhas a tracejado, imediatamente próximo da parede do reservatório. Calculemos o seu número.

Seja N o número de moléculas por unidade de volume e seja N_i o número de moléculas por unidade de volume com a velocidade v_i e seja A a área da parede do reservatório situada à direita e perpendicular ao eixo ox . Dessas N_i moléculas admite-se que, num dado intervalo de tempo, metade delas tenha velocidade com componente segundo ox positiva e a outra metade negativa.

O número de moléculas que se dirige para a direita (na figura) é $N_i/2$ e dessas, atingem a parede as que se situam dentro do volume limitado pela parede e por um plano paralelo a ela e distante $v_{ix} \Delta t$ (Fig. 10-2)

Esse número será igual ao produto desta distância pela área A da parede, e por $N_i/2$ ou seja:

$$v_{ix} \Delta t A N_i / 2$$

Multiplicando este número pela força exercida por uma só molécula (eq.10.11), obtem-se a força exercida pelo conjunto das moléculas com velocidade v_i .

$$F_i = \frac{2 m v_{ix}}{\Delta t} \cdot \frac{v_{ix} \Delta t A N_i}{2}$$

$$F_i = m A v_{ix}^2 N_i$$

e a força total exercida na parede:

$$F = m A \sum_{i=1}^{i=N} v_{ix}^2 N_i \quad \text{ou} \quad F = m A N \sum_{i=1}^{i=N} \frac{v_{ix}^2 N_i}{N}$$

$$F = m A N \overline{v_x^2} \quad \text{e a pressão média é} \quad p = \frac{F}{A} = m N \overline{v_x^2}$$

mas, por via de (10.9):

$$p = \frac{m N \overline{v^2}}{3} \quad (10.12)$$

Relacionemos agora a pressão média com o volume. Se, como se refere a princípio, estão dentro do reservatório, N moléculas por unidade de volume, o número total de moléculas é igual ao produto $N.V$ e também igual ao produto do número de moles n pelo número de Avogadro,

$$N V = n N_a \quad \text{ou seja:} \quad N = \frac{n N_a}{V} \quad \text{que substituído em (10.12)}$$

$$pV = n N_a \frac{m \overline{v^2}}{3} \quad (10.13)$$

sendo p o valor médio.

O produto de uma pressão por um volume representa energia do gás; no segundo membro de (10.13) o produto $n.N_a$ é o número total de moléculas, logo a expressão contida na fracção significa a contribuição energética de cada molécula; ou seja 2/3 da sua energia cinética média.

Igualando os segundos membros das equações (10.8) e (10.13)

$$kT = \frac{\overline{mv^2}}{3} = \frac{2}{3} \frac{\overline{mv^2}}{2} \quad (10.14)$$

A equação (10.14) mostra assim a relação entre a temperatura termodinâmica e a energia média das moléculas do gás, relação essa que constitui o propósito desta alínea.

O Significado da Constante de Boltzmann

A equação (10.14) mostra que a temperatura termodinâmica de um gás é proporcional à energia cinética média de translação das moléculas. Esta expressão, além de por em evidência o real significado da constante de Boltzmann, permite compreender melhor a definição que o Vocabulário Electrotécnico Internacional (VEI) dá para "temperatura termodinâmica": *variável de estado proporcional à energia térmica de um corpo em equilíbrio*. Desta equação e da sua dedução, podem tirar-se algumas conclusões com interesse:

1 - O estudo feito é válido tanto para gases monoatômicos como poliatômicos. De facto no cálculo da pressão sobre as paredes do reservatório, a quantidade de movimento da molécula pode entender-se como pertencendo ao seu centro de massa, qualquer que seja a composição. Por outro lado, a suposição de haver choque elástico com as paredes do reservatório implica ausência de transferência de energia entre ambas, ou, seja, implica equilíbrio térmico.

2 - Os valores normalmente atribuídos, tanto à constante de Boltzmann como à constante dos gases perfeitos, que são constantes universais, foram arbitrados quando se escolheu o valor de $273,16 K$ para temperatura do ponto triplo da água.

De facto no segundo membro da eq. (10.14), se aplicada a um gás a essa temperatura, figura a energia cinética da molécula, a qual nada tem a ver com o valor numérico que se atribui à temperatura; se o valor escolhido (arbitrariamente) para T fosse diferente, diferente teria de ser k , para que o produto $k.T$ se mantivesse. E como $R = N_a \cdot k$, também R seria diferente.

3 - No tempo de Boltzmann, e mesmo muito depois, entendia-se que a relação entre a energia do movimento das moléculas e a temperatura, era constante para qualquer valor desta. No entanto, à medida que se foram gradualmente produzindo, em laboratório, temperaturas cada vez mais baixas, verificou-se que o movimento das moléculas, em vez de tender para zero, se mantinha; mesmo próximo do zero absoluto; e com uma certa energia, designada *energia do ponto zero*.

Esta energia é responsável por anomalias na curva experimental da variação do calor específico com a temperatura, em relação aos valores clássicos previstos, e ainda por outros fenómenos, em especial na zona das temperaturas da ordem dos poucos kelvins. É o caso do hélio, cuja energia do ponto zero é de tal modo elevada que a essa temperatura, e à pressão normal, as moléculas devido à energia que possuem, não estão suficientemente

próximas para se poder formar o hélio sólido; o que só acontece quando a pressão atinge as 25 atm.

4 - No cálculo efectuado não se entrou em conta com qualquer espécie de interacção; o que na prática pressupõe um gás um tanto ou quanto rarefeito, no qual as moléculas estão suficientemente afastadas, para se poder desprezar essa interacção.

Mas a verdade é que o termómetro de gás, que se baseia precisamente na eq. (10.8), é um utensílio fundamental na medição de temperaturas termodinâmicas. Isso implica a escolha de um gás com moléculas de pequena dimensão, como o hidrogénio, trabalhando com grande separação entre si (pressão baixa), e por consequência, afastado da fase líquida ($T > 33$ K). Mesmo assim é preciso dotar a equação das necessárias correcções.

Não obstante, os intervalos entre pontos de referência de temperaturas inferiores a 33 kelvins são também avaliados através da variação de pressão, num termómetro onde, em vez de estar apenas a fase gasosa, estão presentes simultaneamente as fases líquida e de vapor, quer do hidrogénio, quer do hélio – embora nessa situação o termómetro perca o carácter de primário. A presença simultânea das duas fases afasta mais ainda as grandezas de estado, da relação simples representada pela equação dos gases perfeitos, sendo, neste caso, necessário abandonar esta equação e seguir a equação de Clausius-Clapeyron.

10.3.2 - GASES PERFEITOS E GASES REAIS

Aplicando a equação de estado dos gases perfeitos, estudada no capítulo anterior, a uma mole de gás, a sua representação gráfica segundo os eixos de p e de v , e tendo T por parâmetro, traduz-se numa família de curvas hiperbólicas (as isotérmicas), tendo os referidos eixos por assíptotas, Fig. 10-3 a).

Por outro lado, nas curvas com idêntico significado, mas obtidas experimentalmente a partir de um gás real e representadas na Fig. 10-3 b), constata-se que a disposição das isotérmicas se afasta do padrão hiperbólico, tanto mais quanto mais baixa for a temperatura, relativamente à temperatura designada por *crítica* (T_c) no gás real.

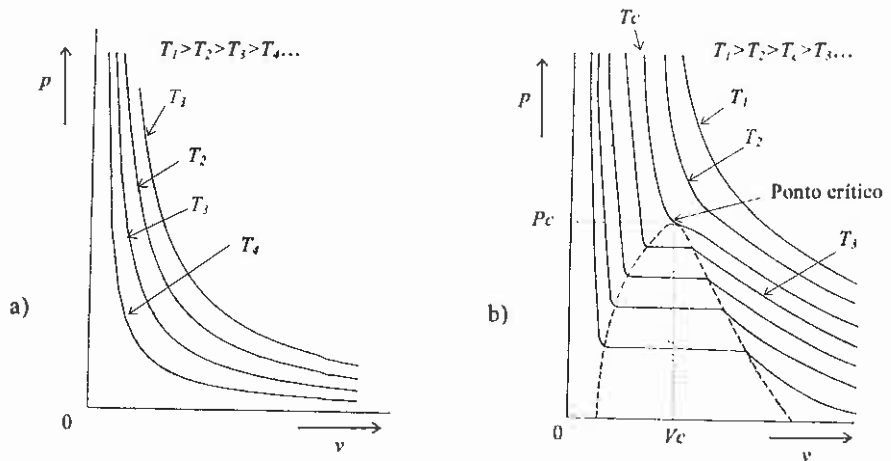


Fig. 10-3 Relação entre pressão e volume, em função da temperatura, num gás perfeito e num gás real

A causa principal desta diferença reside na interacção das moléculas do gás, a qual pode levar à formação de uma fase líquida ou mesmo até uma fase sólida.

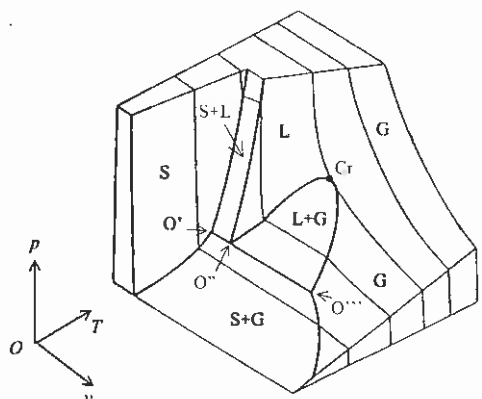
Quem primeiro se debruçou sobre o assunto foi van der Waals, que procurou introduzir na equação dos gases perfeitos, correcções no sentido de conseguir uma representação mais adequada do comportamento dos gases reais. Para isso subtraiu ao volume v o espaço ocupado pelas próprias moléculas do gás e somou à pressão p uma parcela que representa a atracção entre moléculas, figurada por meio de um acréscimo de pressão.

O diagrama da Fig.10-3 b) mostra a relação típica pressão/volume molar num gás real, tendo como parâmetro a temperatura. Trata-se portanto de uma família de curvas isotérmicas.

A zona do diagrama situada no interior do arco representado a tracejado é a zona da transição líquido/vapor, na qual a pressão, em cada isotérmica, se mantém constante; o que se traduz graficamente por troços rectilíneos de isotérmica, paralelos ao eixo ov . Porém, à medida que a temperatura cresce, o comprimento do troço rectilíneo vai diminuindo até ficar reduzido a um ponto Crítico.

Ficam assim definidos para cada .
Pressão Crítica P_c , e *Volume Crítico V_c*
Temperatura Crítica T_c , da isotérmica que p

Na Fig. 10-4 mostra-se uma persp
 relações entre as grandezas de estado p , v , e T .
 S, L e G representam, as fases sólida, líquida e gas
 uma ideia mais clara da realidade, mostran
 recta (O', O'', O'''), cuja projecção no plan
 designado Ponto Triplo, que já tem sido



especialmente no que toca à temperatura. Por isso é definido *um conjunto de valores da pressão e da temperatura para os quais a substância em causa pode existir em proporções arbitrárias em qualquer das fases: sólida, líquida ou gasosa*. Não se faz referência ao volume molar porque ele não é fixo e vai depender das proporções em que existam as fases.

Equação de van der Waals

Uma zona com grande interesse para a medição de temperaturas à custa da medição de pressões, é a zona de transição líquido/vapor ou seja a zona representada dentro do arco a tracejado, na Fig.10-3 b).

Não se trata propriamente de medições com carácter absoluto – essas são feitas sempre com o fluido no estado gasoso – mas trata-se sim de aproveitar a grande reprodutibilidade da transição líquido/vapor, para fazer medições relativas importantes, como por exemplo para cobrir a faixa contínua de temperaturas entre dois ou mais pontos fixos, previamente escolhidos.

O conhecimento tão exacto quanto possível da equação de estado para os gases reais, é fundamental para a sua aplicação à medição de temperaturas. Isso justifica o interesse pelo assunto.

A primeira tentativa de correcção da equação dos gases perfeitos, deve-se a van der Waals, com a equação

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = R T$$

que tem o seu nome e na qual são:

p - pressão

V - volume por cada mole de gás

T - temperatura termodinâmica

a, b - parâmetros característicos do gás

A modificação introduzida, como foi referido, consiste em criar duas correcções: uma, positiva, aplicada à pressão e outra, negativa, ao volume molar. A primeira é justificada pela existência de uma força atractiva entre moléculas, neutras, que concorrendo para a aproximação das próprias moléculas entre si dificulta o movimento e acaba por funcionar como um decréscimo da velocidade média e portanto da pressão.

Junta-se então à pressão efectiva uma correcção α que depende da natureza do gás. Demonstra-se que α é inversamente proporcional ao quadrado do volume molar, e daí a correcção aparecer na forma a/V^2 .

A outra correcção é, como se disse, aplicada ao volume molar e aparece na forma de uma nova constante b , que se subtrai ao volume. A equação completa fica:

$$\left(p + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT \quad (10.15)$$

Uma explicação simplista consiste em atribuir à constante b o significado do volume ocupado pelas moléculas da mole. É, porém, possível encontrar uma explicação mais racional, sem necessidade de atribuir volume à molécula.

Suponhamos duas moléculas de um gás, neutras, em presença uma da outra. Quando a distância entre os seus centros for da ordem de grandeza de alguns angstroms ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$), surgem entre elas, forças atractivas e forças repulsivas, simultaneamente, ambas variando inversamente com potências da distância entre os seus centros; mas potências de expoentes diferentes.

Seja r_0 - uma característica do gás - o valor da distância entre centros das moléculas para a qual a energia potencial U_0 do conjunto é mínima.

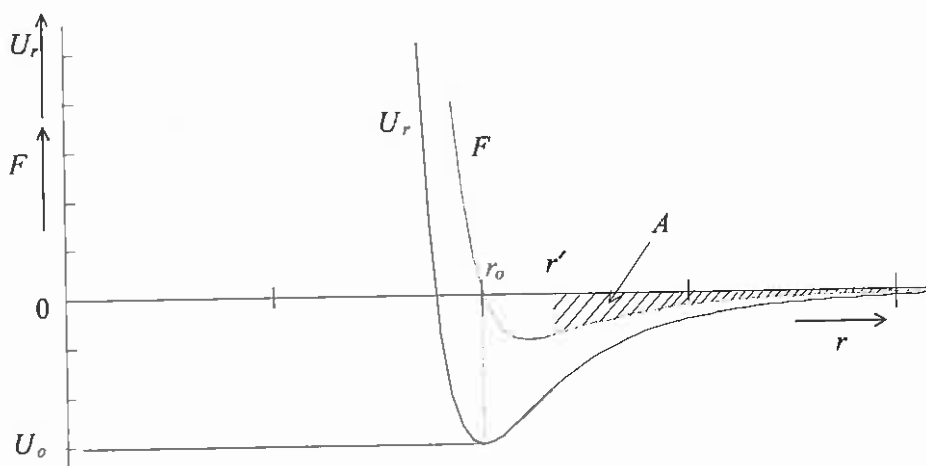


Fig. 10-5 Relação da energia potencial e da força com a distância entre duas moléculas, em presença

No caso de átomos ou moléculas de elementos (Ne, Ar, He, H₂) ou de inúmeros compostos simples, a dependência entre a resultante F das duas forças e a distância r , está representada graficamente na Fig.10-5 por meio de uma linha a tracejado, enquanto que a linha a cheio representa a energia potencial do par de moléculas. À condição de equilíbrio corresponde o valor mínimo U_0 da energia potencial, que é outra característica do gás.

Das forças em presença, as atractivas são forças do tipo van der Waals, ou outras, de um modo geral resultantes de atracções electrostáticas entre cargas de sinais contrários numa e noutra molécula; as repulsivas são originadas pela proximidade dos electrões periféricos das duas moléculas.

A expressão analítica da energia potencial em função da distância entre centros, representada graficamente na Fig.10-5 tem carácter semi-empírico e é devida ao físico inglês Lennard-Jones:

$$U_r = U_0 \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \right] \quad (10.16)$$

A energia potencial do conjunto das duas moléculas em presença, pode avaliar-se considerando essa energia como igual e de sinal contrário, ao trabalho W necessário para afastar uma das moléculas para o infinito, ou seja, para anular a energia potencial.

$$U_r + W = 0$$

Seja F a força e r a distância, entre moléculas. O trabalho elementar num deslocamento dr é: $dW = F.dr$ ou ainda $F = dW/dr$ ou $F = -dU_r/dr$ e portanto:

$$F = -\frac{dU_r}{dr} = \frac{U_0}{r_0} \left[12 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{13} - 12 \left(\frac{r_0}{r} \right)^7 \right]$$

A primeira parcela dentro do parêntesis recto representa a força repulsiva enquanto que a segunda representa a força atractiva.

O trabalho para afastar as moléculas a partir de uma distância qualquer r' até ao infinito será

$$W = \int_{r'}^{\infty} F dr = A \quad \text{ou} \quad U_r = -W = -A$$

sendo A uma energia representada pela área a tracejado na Fig.10-5.

Na expressão da força entre moléculas, vê-se que a força repulsiva, com o seu expoente 13, apresenta um crescimento abrupto, logo que r se torna menor que r_0 . Tal facto funciona como uma barreira quase intransponível à aproximação de duas moléculas; como acontece no contacto de dois corpos sólidos. Daí a comparação corrente da molécula com uma esfera (de raio $r_0/2$) ocupando portanto um determinado volume.

A fórmula de Lennard-Jones voltará a ser considerada mais adiante.

A equação de van der Waals é apenas uma primeira aproximação da equação de estado dos gases reais; os seus resultados afastam-se um tanto da realidade, principalmente na zona de transição líquido/vapor, na qual as isotérmicas em vez de serem representadas graficamente por segmentos de recta paralelos ao eixo OV, apresentam aí ondulações, que não correspondem à realidade.

Além da equação de van der Waals existem outras equações, com a mesma finalidade, todas elas contendo parâmetros a determinar experimentalmente.

Expansão (ou Desenvolvimento) Virial

A equação de van der Waals embora adequada para muitas aplicações, é insuficiente quando se exige elevada precisão nas relações analíticas entre pressão, volume molar e temperatura.

A teoria estatística, com uma formulação complexa mas exacta, conduz a uma expressão para a equação de estado dos gases reais, do seguinte tipo:

$$\frac{p}{k T} = \frac{N}{V} + B \left(\frac{N}{V} \right)^2 + C \left(\frac{N}{V} \right)^3 + \dots \quad (10.17)$$

em que são:

p - pressão

T - temperatura termodinâmica

k - coeficiente de Boltzmann

V - volume

N - número de moléculas contidas no volume V

B, C - segundo, terceiro, etc. coeficientes viriais

Os coeficientes viriais são funções da natureza do gás e da temperatura. É evidente que para os gases perfeitos estes coeficientes são nulos e a equação de estado fica reduzida à equação dos gases perfeitos.

O desenvolvimento virial é uma equação cuja aplicação é recomendada na reprodução das escalas internacionais de temperatura. Os seus coeficientes são calculáveis e não de determinação empírica.

Curiosamente esta equação não traz consigo o nome de qualquer autor mas apenas o adjectivo "virial", vocábulo que nem sequer vem nos dicionários comuns. É, efectivamente, uma palavra de origem latina que significa força; neste caso a força de interacção das moléculas. De facto, é ela a verdadeira responsável pela diferença de comportamento dos gases reais em relação ao comportamento atribuído aos gases perfeitos.

Obviamente, que quanto maior o número de coeficientes viriais utilizados tanto maior será a cobertura analítica do resultado experimental; no entanto, para as baixas pressões, usuais na medição de temperaturas, é quase sempre suficiente apenas o segundo coeficiente (B). Este coeficiente está relacionado com a interacção de duas moléculas, o coeficiente C com a interacção tripla e assim sucessivamente.

O cálculo do segundo coeficiente, B , - e apenas esse será referido - é feito com base na função de Lennard-Jones, ou melhor, numa simplificação dessa função, chegando-se após um longo e fastidioso trabalho à seguinte expressão:

$$B = -2\pi \int_0^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{U_r}{kT}\right) - 1 \right] r^2 dr \quad (10.18)$$

sendo U_r a energia potencial de conjunto das duas moléculas e r a distância entre os centros de uma e de outra.

Ora, conforme (10.16) é

$$U_r = U_0 \left[\left(\frac{r_0}{r}\right)^{12} - 2\left(\frac{r_0}{r}\right)^6 \right]$$

que pode ser escrita de forma simplificada: $U_r = U_0 \phi\left(\frac{r}{r_0}\right)$

Substituindo em (10.18) e dividindo ambos os membros por r_0^3

$$\frac{B}{r_0^3} = -2\pi \int_0^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{\phi\left(\frac{r}{r_0}\right)}{\frac{kT}{U_0}}\right) - 1 \right] \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 d\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad (10.19)$$

A expressão, escrita assim em termos relativos, tanto para r , (r/r_0) , como para kT , (kT/U_0) , como para B , (B/r_0^3) , contém um segundo membro que é só função de kT/U_0 , dado que r/r_0 é a variável. Isso permite que seja válida para qualquer gás. Aliás a confirmação experimental mostra que apenas o hidrogénio, dada a pequena dimensão da sua molécula necessita de uma ligeira correcção de natureza quântica

Conhecidos os parâmetros U_0 e r_0 , respectivamente mínimo de energia das duas moléculas do par e distância entre elas correspondente a essa energia, a expressão (10.20) permite calcular o segundo coeficiente virial B , para uma determinada temperatura T .

De uma forma geral o segundo coeficiente virial é negativo para temperaturas até um pouco acima da temperatura crítica do gás, é positivo daí em diante, passando por um máximo e tendendo depois para zero com o aumento da temperatura. O terceiro coeficiente C é de início negativo, torna-se positivo para temperaturas bastante inferiores à temperatura crítica e mantém-se positivo com o crescer da temperatura.

A função de Lennard-Jones é, como se referiu, semi-empírica (o expoente 12 sofre ligeiras variações de gás para gás) mas permite, através do desenvolvimento virial, obter uma relação muito correcta entre pressão, temperatura e volume molar; relação que é utilizada na determinação da temperatura termodinâmica a partir dos restantes dois parâmetros.

Uma vez calculados os coeficientes convém, para efeitos de aplicação, dar à equação do desenvolvimento virial um aspecto mais próximo do da equação dos gases perfeitos.

Como já foi referido, a equação (10.18) é:

$$\frac{p}{kT} = \frac{N}{V} + B \left(\frac{N}{V} \right)^2 + C \left(\frac{N}{V} \right)^3 + \dots \quad \text{ou}$$

$$p = \frac{kNT}{V} \left[1 + B \frac{N}{V} + C \left(\frac{N}{V} \right)^2 + \dots \right]$$

ou, se se entender por V o volume molar e por N o número de Avogadro, e como $kN = R$, constante universal dos gases perfeitos:

$$pV = RT \left[1 + B \frac{N}{V} + C \left(\frac{N}{V} \right)^2 + \dots \right] \quad (10.20)$$

expressão utilizável no cálculo das temperaturas termodinâmicas.

Estudadas que foram as equações: dos gases perfeitos, de van der Waals e do desenvolvimento virial, qual das três deverá ser usada para a medição rigorosa de uma temperatura termodinâmica, no termómetro de gás de volume constante? É óbvia a exclusão da equação dos gases perfeitos por ser a que mais se afasta da realidade. Entre as duas restantes, a solução mais avisada será provavelmente a de seguir o desenvolvimento virial, aplicando mesmo, além do segundo coeficiente, um terceiro, também calculável.

Para apurar o valor duma temperatura termodinâmica é preciso realizar uma medição com o termómetro de gás de volume constante, que se desdobra em duas experiências. Na primeira o reservatório, que vai conter o gás, é colocado numa fonte térmica à temperatura de referência (ponto triplo da água), é-lhe introduzido o gás e anotada a pressão. Na segunda, o reservatório com o gás é transferido para a fonte cuja temperatura se pretende medir e é anotada a nova pressão resultante da mudança de temperatura. Ao resultado cada uma das experiências é aplicada a equação (10.21); e o quociente das duas expressões, ou seja, o quociente das duas pressões – o volume molar é o mesmo nas duas experiências – fica igualado ao quociente das duas temperaturas, condicionado pelos coeficientes viriais, a calcular para a temperatura de cada experiência. Isso permite calcular a temperatura desconhecida. Se for necessário pode, com o resultado obtido, proceder-se a uma correcção dos coeficientes viriais relativos à temperatura da segunda experiência, os quais foram inicialmente calculados na base de um valor atribuído.

Convirá também repetir a medição, partindo de pressões iniciais sucessivamente menores e, por extrapolação, achar o limite para que tende a temperatura quando a pressão inicial tende para zero, obtendo-se assim a temperatura termodinâmica procurada.

É por esta via que se estabelecem as temperaturas da maior parte dos pontos de referência das escalas internacionais de temperatura termodinâmica.

Equação de Clausius-Clapeyron

O termómetro de gás de volume constante é utilizado, como foi referido, para medições absolutas de temperatura termodinâmica dos pontos fixos das escalas internacionais. Estes pontos dividem-se em duas categorias: os primários, em pequeno número, com valores determinados e atribuídos pela CGPM e os secundários, que constam de extensa lista anexa a cada escala internacional de temperatura termodinâmica, e cujos valores, objecto de pesquisa permanente por parte dos mais importantes laboratórios mundiais, são depois homologados pelo CIPM. Esta pesquisa diz respeito a métodos de medição, aos valores em si e às respectivas correcções, e tem em vista uma aproximação cada vez maior, dos valores atribuídos, aos valores reais da temperatura termodinâmica.

Para que os laboratórios nacionais, em geral, possam aferir temperaturas situadas entre os pontos secundários, recomenda-se por vezes o termómetro de volume constante, com o reservatório preenchido, não por um gás, mas por um fluido em condições de equilíbrio de fases: líquido-vapor ou mesmo sólido-vapor.

Nesta situação a relação analítica entre a temperatura e a pressão (tensão do vapor), é expressa pela lei de Clausius-Clapeyron:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{T(V_2 - V_1)}$$

em que são

p - pressão

T - temperatura termodinâmica

λ - calor latente (molar) da transição de fase

V_1 - volume molar da fase líquida (ou sólida)

V_2 - volume molar da fase de vapor

Dado que o volume molar de uma fase de vapor é sempre muito superior ao da respectiva fase líquida (ou sólida), pode em princípio desprezar-se este último. Assim, representando por V o volume molar da fase vapor, vem:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{TV}$$

Aplicando ao vapor a lei dos gases perfeitos $pV = RT$

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda p}{R T^2} \quad \text{ou} \quad \frac{dp}{p} = \frac{\lambda}{R} \frac{dT}{T^2}$$

Mas o calor latente de transição, só em primeira aproximação se pode considerar independente da temperatura. Se se quiser um maior rigor há que admitir essa dependência, por exemplo na forma:

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_1 T + \lambda_2 T^2 + \lambda_3 T^3 + \dots + \lambda_n T^n$$

sendo $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ constantes do fluido. E então

$$\frac{dp}{p} = \frac{1}{R} \left(\frac{\lambda_0}{T^2} + \frac{\lambda_1}{T} + \lambda_2 + \lambda_3 T + \lambda_4 T^2 + \lambda_5 T^3 + \dots \right) dT \quad (10.21)$$

$$\ln p = \frac{1}{R} \left(-\frac{\lambda_0}{T} + \lambda_1 \ln T + \lambda_2 T + \frac{\lambda_3 T^2}{2} + \dots \right) + C^{te}$$

A técnica de medição da temperatura é idêntica à anteriormente descrita para os termómetros de gás, e assim temos, numa primeira experiência:

$$\ln p_0 = \frac{1}{R} \left(-\frac{\lambda_0}{T_0} + \lambda_1 \ln T_0 + \lambda_2 T_0 + \frac{\lambda_3 T_0^2}{2} + \dots \right) + C^{te} \quad \text{ou}$$

$$\ln p_0 = -A + \frac{\lambda_1}{R} \ln T_0 + C^{te} \quad (10.22)$$

sendo

$$A = \frac{1}{R} \left(\frac{\lambda_0}{T_0} - \lambda_2 T_0 - \frac{\lambda_3 T_0^2}{2} - \frac{\lambda_4 T_0^3}{3} - \dots \right)$$

Na segunda experiência teremos

$$\ln p = \frac{1}{R} \left(-\frac{\lambda_0}{T} + \lambda_1 \ln T + \lambda_2 T + \frac{\lambda_3 T^2}{2} + \dots \right) + C^{te} \quad (10.23)$$

e subtraindo membro a membro a equação (10.22) da equação (10.23)

$$\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = A + \frac{B}{T} + C \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + D T + E T^2 + F T^3 + \dots \quad (10.24)$$

em que B , C , D etc. são facilmente relacionáveis com os coeficientes λ_1 , λ_2 , λ_3 etc..

Nas instruções anexas às Escalas Práticas Internacionais de Temperatura, são expressões deste tipo, por vezes com alguns dos coeficientes nulos, que governam a relação entre a temperatura e a pressão, nas faixas de temperatura compreendidas entre pontos de referência secundários. Concretamente, na Escala de 1968, a IPTS-68, quando se trata de situações de equilíbrio líquido-vapor (H_2 , Ne, N, Ar, O_2 , Xe) ou ainda de equilíbrio sólido-vapor (N, Ar) são preconizadas equações deste tipo.

A determinação experimental das constantes destas equações é feita aplicando a equação a tantos pontos secundários sucessivos – de temperatura conhecida – quanto o número de constantes a calcular, e resolvendo em ordem a essas constantes o sistema de equações algébricas resultante.

É óbvio que, não se tratando propriamente de uma medição absoluta, o método permite avaliar temperaturas de forma contínua, com base em valores, esses sim de medição absoluta, atribuídos a uns tantos pontos de referência.

10.3.3 - TERMÓMETROS PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS

De uma maneira geral os termómetros podem dividir-se em duas classes: termómetros primários e termómetros secundários. A distinção entre eles reside no facto de os primários fornecerem indicações que são apenas função de um único parâmetro mensurável dependente da temperatura, além de constantes universais e de outros parâmetros mensuráveis não dependentes da temperatura, enquanto que nas indicações dos termómetros secundários, além do parâmetro principal estão sempre presentes outros parâmetros, não completamente independentes da temperatura.

São exemplo de termómetros primários, o termómetro de hidrogénio de volume constante e o pirómetro de radiação total; são exemplos de termómetros secundários os termómetros funcionando: por dilatação do mercúrio, por variação de resistência eléctrica (platina) e por efeito de Seebeck (pares termoeléctricos).

Além dos dois exemplos apontados, de termómetros primários, existam ainda mais alguns tipos tais como: termómetros de ruído, termómetros paramagnéticos e outros, a cuja utilização se recorre, por exemplo para avaliar temperaturas próximas do zero absoluto.

Para efeito da organização de uma normalização internacional para a medição de temperaturas, parece que a escolha deveria recair só sobre termómetros primários. E era bom que assim pudesse ser; mas passando em revista a questão da reprodutibilidade, constata-se que, para certas gamas de temperatura, há termómetros secundários com reprodutibilidade cerca de dez vezes superior à dos primários.

Isto levou a que a CGPM, desde muito cedo (1927), estabelecesse por meio de medição com termómetros primários, pontos fixos na escala da temperatura, tais como: pontos triplos, pontos de congelação, pontos de fusão, de diversos elementos, e indicassem o tipo de termómetro adequado – inclusive termómetros secundários – para cada faixa entre esses pontos. São as chamadas Escalas Internacionais Práticas de Temperatura, a primeira das quais foi estabelecida, como se referiu, em 1927.

10.3.4 - TERMÓMETROS DE MERCÚRIO

O termómetro de mercúrio é um termómetro secundário, fácil de construir, de graduar e de utilizar. Daí a sua enorme difusão. Tem um campo de medida amplo que vai desde os $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$, valor próximo do ponto de congelação do mercúrio até temperaturas que podem exceder largamente os $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, ponto de ebulição à pressão normal. Em contrapartida o coeficiente de dilatação do mercúrio que é sensivelmente constante até aos $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, sofre um acréscimo daí para cima.

Por outro lado a essas temperaturas começa a ter papel importante a dilatação do próprio vidro. Por isso nos termómetros de maior precisão utilizou-se (a partir de 1937) o vidro de sílica, que além de ter um coeficiente de dilatação bastante menor que o do vidro comum, libertou os construtores de termómetros de um problema grave: a *instabilidade do zero*. De facto, os termómetros de vidro comum, quando mantidos durante algum tempo a temperatura próxima, por exemplo, de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ e mergulhados depois no gelo fundente, não descem completamente ao zero. O fenómeno resulta, não só de uma interacção física do vidro com o mercúrio mas ainda da contracção residual prolongada do vidro.

O termómetro é de uma forma geral constituído por um tubo de muito pequeno diâmetro interno (tubo capilar) na extremidade do qual se solda um pequeno depósito, também de vidro, que contém o mercúrio. Na extremidade oposta do tubo há um alargamento da secção, formando como que uma outra câmara, bastante mais pequena que a primeira. Esta câmara estaria, em princípio, cheia de vapor de mercúrio, em equilíbrio com o líquido. Porém, num acréscimo súbito de temperatura, o avanço do mercúrio líquido pelo tubo capilar poderia obrigar gradualmente o vapor de mercúrio a liquefazer-se, até que, havendo apenas líquido, incompressível, uma dilatação subsequente poderia fracturar o termómetro.

Para evitar tal inconveniente esta câmara é parcialmente preenchida com azoto, o qual, não se liquefazendo às temperaturas de funcionamento deste tipo de termómetros, mantém a pressão interna abaixo de valores perigosos. Este procedimento permite além disso elevar o limite superior da escala termométrica, possibilitando a existência de termómetros de mercúrio, construídos em vidro de sílica, com um limite superior da escala de, por exemplo $650\text{ }^{\circ}\text{C}$.

10.3.5 - TERMÓMETRO DE GÁS, DE VOLUME CONSTANTE

A equação de estado dos gases perfeitos $pV = RT$ mostra que mantendo constante o volume molar V , há uma relação directa entre a temperatura T e a pressão p . É este o princípio de funcionamento do termómetro de gás a volume constante.

A relação entre aquelas grandezas é assegurada por uma constante universal R e, se se conseguir encontrar um gás que se comporte como um gás perfeito, estar-se-á perante um fenómeno que permite uma medição absoluta de temperatura, ou seja, perante um termómetro primário.

A Fig. 10-6 mostra o esquema de um termómetro baseado no mesmo princípio que o termómetro que funcionou no BIPM até 1966, data em que a medição dos desníveis do mercúrio deixou de ser feita por catetómetro e passou a fazer-se por interferometria de feixes luminosos reflectidos nas superfícies do mercúrio.

Na figura são:

R – reservatório de gás (hidrogénio), com 1000 cm^3 de capacidade, construído de platina iridiada,

A – nível do mercúrio no barómetro normal que faz parte do conjunto,

B – traço no tubo de vidro, que fixa o nível do mercúrio de modo a que o volume total do reservatório de gás se mantenha constante.

D – depósito de mercúrio aberto superiormente,

F – tubo flexível que permite a subida ou descida do depósito D e, por consequência, a reposição do nível do mercúrio à altura do traço B, quando a variação da temperatura do gás no reservatório tenda a desviá-lo dessa posição.

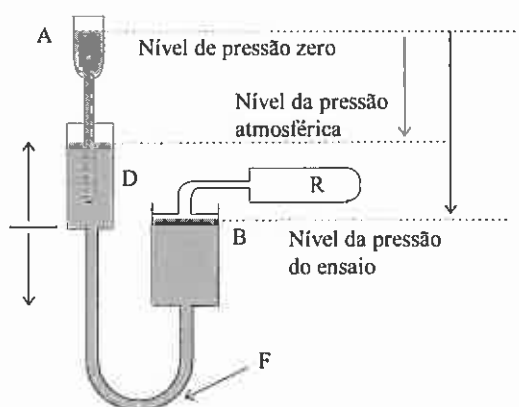


Fig. 10-6 Termómetro de gás de volume constante

Colocando o reservatório R do termómetro numa câmara à temperatura do ponto triplo da água, regula-se a quantidade de gás admitida, de forma a que a pressão seja, por exemplo, de 101325 Pa , isto é, que o desnível entre os pontos A e D na figura seja de 760 mm de mercúrio. Introduce-se seguidamente o reservatório noutra câmara à temperatura que se pretende medir e anota-se o novo valor da pressão, mantendo o nível de mercúrio no traço B. A temperatura desconhecida é calculada com base nos valores da pressão e da temperatura conhecidos, aplicando-se correcções inerentes tanto à fórmula utilizada como às próprias condições experimentais, tais como: a dilatação do reservatório em si e o volume da tubagem que o liga aos tubos de vidro (cerca de $0,5 \text{ cm}^3$ no termómetro original do BIPM) e cujo conteúdo gasoso não está à temperatura da câmara.

Os níveis A e B (Fig. 10-6), cuja diferença representa a pressão no reservatório (expressa em centímetros de mercúrio) ficavam situados na mesma vertical porque a medição do desnível era feita por meio do catetómetro: uma coluna vertical graduada onde desliza um óculo de eixo óptico horizontal, que foca sucessivamente os dois níveis de mercúrio referidos.

A partir de 1966, de uma forma geral, as medições de pressão no BIPM foram objecto de uma melhoria notável, com a substituição do catetómetro por processos de interferometria representados esquematicamente na Fig. 10-7.

Na figura representam:

A,B - níveis de mercúrio cuja diferença se pretende medir;

1 - fonte de luz branca;

2 - receptor luminoso;

3 - espelho fixo;

4 - vidro semi-espelhado fixo;

a,b,g,h - conjunto de espelhos solidários, dispostos a 45° em relação aos feixes luminosos, susceptível de deslocamento rectilíneo, conforme indicado;

c,d,e,f - conjunto fixo de espelhos dispostos a 45° em relação aos feixes luminosos.

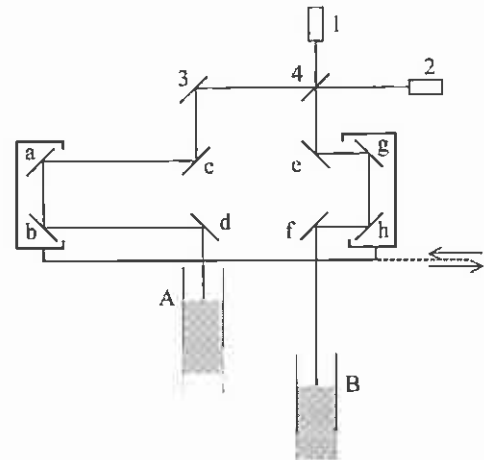


Fig. 10-7 Medição de diferenças de pressão, por interferometria

O feixe de luz branca saído de 1, divide-se no espelho 4 em dois feixes, um dos quais faz o percurso: 4-3-c-a-b-d-A-d-b-a-c-3-4-2 e o outro: 4-e-g-h-f-B-f-h-g-e-4-2. Acabam por se juntar ambos os feixes no receptor 2 e como se trata de luz branca, só se originam fenómenos de interferência, quando os percursos forem praticamente iguais.

O funcionamento do dispositivo é o seguinte: com os níveis A e B na posição inicial desloca-se o conjunto móvel de espelhos até se obter no receptor um sinal de interferência. Provocada a variação do desnível procede-se a novo deslocamento dos espelhos até se produzir outra vez a interferência. O conjunto de espelhos móveis desloca-se frente a uma escala graduada e a diferença entre as duas posições, multiplicada por quatro, dá a variação do desnível. Pode obter-se uma definição inferior a um micron, ou seja 0,13 Pa.

10.3.6 - TERMÓMETRO DE RESISTÊNCIA DE PLATINA

O princípio de funcionamento do termómetro de resistência eléctrica reside na variação com a temperatura, da resistividade do condutor que forma a resistência.

A corrente eléctrica consiste no movimento um tanto ou quanto desordenado dos electrões livres nos metais – o chamado gás electrónico –; electrões que, movendo-se sob a acção do campo eléctrico aplicado, realizam deslocamentos individuais irregulares, mas com uma componente predominante imposta pela acção do campo eléctrico.

Aspectos Teóricos

Num átomo isolado, como por exemplo no caso de um gás, e à luz da Mecânica Quântica, os electrões apresentam níveis energéticos definidos, valores discretos que podem ser assumidos por aquisição ou por cedência de energia. Já nos sólidos cristalinos, a interacção de electrões em átomos contíguos na estrutura causa o desdobramento dos níveis energéticos discretos numa multitude de níveis com energias muito próximas, formando bandas de energia cuja largura vai ser função de diversos factores, entre os quais a distância interatómica, por sua vez função da temperatura. Essas bandas de valores permitidos, umas vezes são separadas por bandas de valores interditos, outras vezes interpenetram-se. Entre as bandas permitidas sobressai a banda normalmente ocupada pelos electrões de valência e que é designada por *banda de valência*.

Nos elementos metálicos a situação desta banda em relação à banda permitida imediatamente a seguir, pode apresentar três aspectos distintos:

- 1 - banda de valência incompletamente preenchida e separada de banda vazia permitida, por banda interdita. É o caso dos metais alcalinos, como por exemplo o sódio.
- 2 - banda de valência completamente preenchida, com interpenetração de banda vazia permitida, como exemplo o magnésio,
- 3 - banda de valência incompletamente preenchida, com interpenetração de banda vazia permitida. Por exemplo o cobre ou a platina.

O nível energético mais elevado ocupado por electrões de valência à temperatura de 0 K é designado nível de Fermi. Para temperaturas superiores, a probabilidade da presença de electrões acima desse nível cresce com a temperatura, de acordo com a estatística de Fermi-Dirac.

São portanto os electrões com energias perto do nível de Fermi que, existindo níveis vagos na banda de valência quando incompletamente preenchida, ou na banda vazia seguinte, desde que sobreposta (bandas de condução), são eles que, accionados pelos fracos impulsos energéticos provenientes da agitação térmica e dum campo eléctrico aplicado, constituem a corrente eléctrica no condutor, através dos seus movimentos erráticos e aleatórios, mas com uma componente predominante na direcção imposta pelo campo.

Resistividade e Mobilidade

Suponhamos um condutor de secção S (Fig. 10-8) percorrido por uma corrente eléctrica de intensidade constante I . Consideremos um troço elementar desse condutor com o comprimento dL e seja $dt=dL/v$ o tempo que os electrões livres, com uma velocidade cuja componente segundo a direcção do campo eléctrico E , que sobre eles actua, tem o valor médio v .

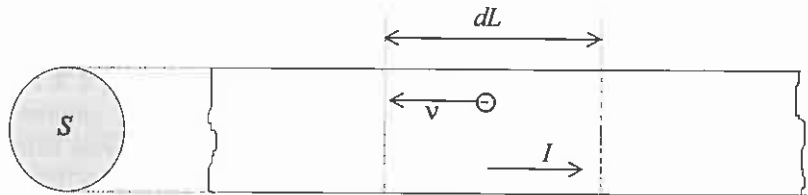


Fig. 10-8 Troço de condutor percorrido por corrente

A carga eléctrica dQ que durante o intervalo de tempo dt passa numa secção transversal do troço é:

$$dQ = N \cdot dL \cdot S \cdot e \quad (10.25)$$

sendo N o número de electrões livres por unidade de volume do condutor e e a carga elementar. A corrente correspondente será:

$$I = \frac{dQ}{dt} = N v S e \quad (10.26)$$

A velocidade v dos electrões é proporcional ao campo eléctrico E , que os movimenta $v = \mu E$, sendo μ a mobilidade. Substituindo v na expressão (10.26) vem:

$$I = N \mu E S e \quad \text{ou} \quad J = N \mu E e$$

sendo $J = I/S$ a densidade de corrente. Por outro lado, a resistividade ρ é, segundo a lei de Ohm específica, $\rho = E/J$, e por consequência

$$\rho = \frac{1}{N e \mu} \quad (10.27)$$

Voltando um pouco atrás, à estatística de Fermi-Dirac, recorde-se que com a elevação de temperatura, aumenta a percentagem de electrões com maior energia. Se isso se traduzir num aumento de N leva a um crescimento da corrente com a temperatura. De facto é essa a regra para os elementos não metálicos. Porém, há outro factor que origina um comportamento oposto. Uma elevação de temperatura causa um aumento da agitação térmica no cristal, ou seja, aumenta a velocidade média dos electrões de condução (cuja

direcção é aleatória) e também aumenta a vibração dos átomos do cristal em redor dos nós da rede. Tal facto aumenta a probabilidade de colisão dos electrões com os nós da rede ou, o que é o mesmo, diminui a sua mobilidade e, acordo com a expressão (10.27), aumenta a resistividade.

Em termos práticos a variação da resistividade com a temperatura nos metais é expressa analiticamente por meio dos coeficientes de temperatura ($\alpha \beta \gamma \dots$), da seguinte forma:

$$\rho = \rho_0 \left[1 + \alpha (t - t_0) + \beta (t - t_0)^2 + \gamma (t - t_0)^3 + \dots \right] \quad (10.28)$$

sendo ρ_0 a resistividade à temperatura de referência t_0 .

Estes coeficientes estão determinados experimentalmente para grande número de metais e de ligas, no entanto em muitas aplicações industriais e sempre que a variação de temperatura em causa não exceda a centena de graus, considera-se suficiente o primeiro coeficiente α e desprezam-se os restantes.

No caso concreto das resistências termométricas (termómetros de platina) e de acordo com a CGPM, a variação da resistência com a temperatura avalia-se, comparando-a com uma variação tipo – ou de referência – e as diferenças existentes são expressas em função da temperatura, por meio de uma somatório algébrico cujas constantes são dadas.

Aspectos Tecnológicos

Tanto os metais como as ligas metálicas são substâncias classificadas como policristalinas; isto é, têm disposição regular de átomos, mas só em pequenos volumes contíguos – os grãos metálicos –, os quais têm em geral dimensões da ordem dos décimos de milímetro e apresentam normalmente eixos de cristalização com orientações diferentes de grão para grão.

Em alguns metais essa disposição, ou mais concretamente, a classe de simetria dos cristais e até mesmo o próprio sistema cristalino, podem alterar-se em função da temperatura. E é lógico que tal suceda, pois a distribuição regular dos átomos no cristal apenas reflecte a sujeição do sistema de energias em jogo, ao princípio geral da mecânica, da tendência para um mínimo da energia potencial; e é natural que sendo a energia térmica uma das energias presentes, a sua variação, ainda que gradual, possa provocar modificações, por vezes bruscas, nas posições relativas dos átomos.

De uma forma geral as propriedades físicas dos metais mostram alguma dependência em relação à sua estrutura cristalina. É o que acontece com a resistividade. Assim, para formar uma resistência termométrica, há que escolher um metal cuja estrutura cristalina não sofra modificação, pelo menos na gama de utilização prevista para o termómetro, de modo a que possa ser assegurada uma resistividade variável sem ressaltos, ou seja, uma variação da resistência com a temperatura, muito próxima da linearidade.

Outro factor importante para a uniformidade desta variação é a ausência de perturbações na estrutura cristalina, causadas quer por átomos estranhos (impurezas

presentes), quer por tensões mecânicas internas, originadas quando da solidificação do metal ou devidas a deformações posteriores.

Na formação das peças metálicas há invariavelmente o recurso à passagem ao estado de fusão e à solidificação subsequente. Acontece normalmente que no arrefecimento após fusão a temperatura não é uniforme em toda a peça e as superfícies exteriores têm tendência a solidificar antes das zonas interiores. Como consequência a contração destas, ao arrefecerem, não pode completar-se e assim permanecem na peça tensões mecânicas internas com as correspondentes distorções na estrutura cristalina. Cria-se então um estado de instabilidade susceptível de originar modificações estruturais, quando de futuras variações de temperatura que a peça venha a sofrer. Esta situação é inconveniente para uma resistência termométrica.

A operação normalmente indicada para regularizar as estruturas deformadas e aliviar as tensões mecânicas inerentes, é o recozimento, ou seja, a sujeição da peça durante algumas horas a uma temperatura de cerca de um terço da respectiva temperatura de fusão (em valores termodinâmicos), seguida de um arrefecimento lento, que chega a durar dias. A essa temperatura a mobilidade dos átomos permite a sua difusão e, com ela, o rearranjo de posições e a regularização das estruturas. Este tratamento é depois completado por um *envelhecimento artificial*, que consiste em submeter a resistência a períodos de uma a duas horas a temperaturas da ordem dos 200 °C a 300 °C, seguidos de arrefecimento lento. Nesta ordem de ideias, sempre que uma resistência termométrica, no seu funcionamento, tenha sido submetida a temperaturas superiores a 420 °C, as instruções suplementares anexas às escalas internacionais de temperatura recomendam a realização de tratamentos térmicos específicos.

Em resumo, pode concluir-se que um metal próprio para formar resistências termométricas, deve satisfazer às seguintes condições:

- 1) - ser um metal e não uma liga metálica, dado que a presença de outro ou outros elementos, pode por si só, criar irregularidades na estrutura,
- 2) - que o metal apresente elevado estado de pureza, pelas razões já expostas em 1),
- 3) - que se apresente numa única estrutura cristalina, pelo menos dentro da gama de temperatura a cobrir,
- 4) - que possua elevada resistividade, de modo a conferir ao termómetro uma maior sensibilidade,
- 5) - que nas condições ambientais em que vai funcionar, não sofra corrosão superficial.

Entre os metais que mais se aproximam das condições descritas, encontram-se o níquel e a platina; o primeiro para soluções em que a economia é factor importante e o segundo, que tem de facto melhores características, para os casos de maior responsabilidade. Por isso são de platina as resistências para medição de temperaturas

termodinâmicas, entre 13,8 K e 961,7 °C, tanto no BIPM como nos laboratórios primários dos diversos países.

A termometria foi, de facto, uma das funções mais antigas no BIPM. No entanto a partir de 1987 as varias actividades ligadas à termometria foram reduzidas, ficando confinadas apenas à provisão de termómetros de resistência de platina, para temperaturas ambientes, destinados ao uso interno do BIPM.

Calibração do Termómetro

Os termómetros de resistência de platina, não podendo ser considerados termómetros primários, precisam de ser calibrados à custa dos pontos fixos da escala termométrica. Todavia a sua reprodutibilidade é tão elevada que desde 1927 tem sido o instrumento consagrado, nas sucessivas Escalas Internacionais de Temperatura, para medição de temperaturas na gama já referida.

Para corresponder a uma tal reprodutibilidade o conjunto: circuito eléctrico de medida e resistência termométrica, tem que ser estudado de modo a não influir no resultado da medição.

O circuito usado no BIPM para a medição da resistência é uma ponte Smith do tipo III, uma versão modificada da ponte dupla de Kelvin, com inversor das correntes (e tensões) na resistência termométrica, a qual é, obviamente, do tipo de quatro terminais.

A calibração de um termómetro de resistência de platina começa por considerar a *função de referência*, $W_r(T)$, estabelecida pelo BIPM para cada Escala Internacional de Temperaturas, e que representa o quociente entre o valor de uma resistência padrão de platina à temperatura T , existente no BIPM, e o valor da mesma resistência à temperatura do ponto triplo da água. A expressão analítica dessa função é apresentada na forma de um somatório de potências de T , com coeficientes indicados.

Com base num certo número de pontos de referência primários da Escala Internacional, cujas temperaturas são conhecidas, cria-se, pela via experimental, uma função idêntica $W(T)$ para o termómetro que se pretende calibrar. A diferença entre estas duas funções, $\Delta = W(T) - W_r(T)$ é designada *função desvio*.

É óbvio que, tanto de $W(T)$ como da função desvio, só se conhecem os valores correspondentes às temperaturas dos pontos de referência escolhidos. Para calcular os valores intermédios desenvolve-se a função desvio segundo um somatório de potências crescentes de $[W(T) - 1]$, com coeficientes em número igual ao número de pontos de referência primários utilizados, os quais se podem determinar resolvendo o sistema de equações algébricas que resulta da aplicação da função desvio a cada um dos pontos de referência.

Terminada a calibração do termómetro, para medir uma temperatura basta medir o valor da resistência termométrica a essa temperatura, dividir pelo valor que a resistência apresenta à temperatura do ponto triplo da água e calcular $W(T)$, após o que se pode conhecer a função desvio que já foi expressa em termos de $[W(T) - 1]$

Em seguida calcula-se $W_r(T) = W(T) - \Delta$, ou seja a relação entre os valores da resistência termométrica do BIPM, às temperaturas de T (K) e de 273,16 K. A dependência entre $W_r(T)$ e T constitui a função de referência já atrás citada e, tanto ela como a sua inversa, são apresentadas pelo BIPM na forma de somatórios de potências com coeficientes dados. Isso permite calcular T a partir de $W_r(T)$, isto é, como se na medição da temperatura interviesse o termómetro do BIPM. Este assunto será retomado mais adiante.

10.3.7 - PAR TERMOELÉCTRICO DE PLATINA/PLATINA RODIADA

O par termoeléctrico formado por um elemento de platina e por outro de platina com 10% de ródio foi credenciado, em todas as Escalas Internacionais de Temperatura anteriores à de 1990, para cobrir a zona de temperaturas entre 630 °C e 1064 °C, temperaturas de solidificação do antimónio e do ouro, respectivamente. A Escala de 1990 abandonou este par termoeléctrico e recomendou que essa zona fosse coberta, em parte (até 961,8 °C) pelo termómetro de resistência de platina e daí em diante pelo pirómetro de radiação. A razão para tal procedimento, que já vinha sendo apontada há alguns anos, reside no baixo valor da reprodutibilidade que o par termoeléctrico apresenta, relativamente ao termómetro de resistência de platina (cerca de um décimo).

Não obstante, e como desde 1927 fez parte de todas as Escalas de Temperatura publicadas, pareceu conveniente fazer-se -lhe aqui referência, se bem que resumida.

Antecedentes

O físico inglês Thomas-Seebeck construiu em 1821 um dispositivo formado por duas barras, uma de cobre e a outra de bismuto, dispostas paralelamente entre si e soldadas nos extremos (Fig.10-9).

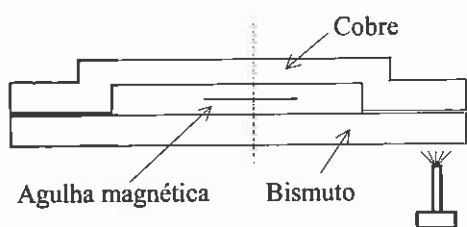


Fig. 10-9 Par termoeléctrico cobre-bismuto

A barra de cobre foi dobrada de forma a deixar na região central um espaço onde era colocada uma agulha magnética cujo eixo, perpendicular às barras, era disposto na posição vertical.

Normalmente a agulha orientava-se na direcção do campo magnético terrestre, mas quando uma das extremidades do conjunto das barras era aquecida por uma chama, a agulha sofria desvio.

Foi este o fenómeno inicial que abriu caminho a uma série de aplicações, em especial na medição de temperaturas, e que, em homenagem a quem o descobriu, foi designado por *efeito de Seebeck*. É evidente que o desvio da agulha magnética na experiência referida, era provocado pelo campo magnético produzido por uma corrente no circuito eléctrico fechado, constituído pelas duas barras ligadas entre si em ambas as extremidades. Essa corrente era devida às forças electromotrizes geradas, tanto nas superfícies de contacto entre metais diferentes (efeito de Peltier) como em cada uma das

barras, ao longo das quais havia um gradiente de temperatura, provocado pelo aquecimento de apenas um dos extremos do conjunto (efeito de Thomson).

Estes dois efeitos, embora estejam ambos presentes no efeito de Seebeck, foram detectados e postos em evidencia separadamente. Quanto ao primeiro foi o físico francês Jean Peltier que em 1834 invertendo o sentido de uma corrente eléctrica numa junção de dois metais diferentes (cobre e bismuto), provocou a variação do efeito térmico produzido na junção. Aliás, cerca de vinte anos antes, já o físico italiano Alessandro Volta, professor em Pavia, ao contradizer a teoria da electricidade animal (de Galvani) para explicar o movimento dos músculos da perna de uma rã, depois de morta, quando tocada pelas duas pontas de um compasso metálico, explicava esse movimento com base na electricidade gerada no compasso e não nos músculos da rã, atribuindo a estes apenas o papel de electroscópio sensível. E principalmente porque o próprio Galvani, embora convencido de que a electricidade presente na experiência era proveniente do animal, reparou que com um compasso formado por dois metais diferentes obtinha resultados mais evidentes. Isto não tira, obviamente, mérito às experiências de Peltier.

Por sua vez, Volta foi também, de certo modo, um precursor no que respeita ao efeito de Thomson. Observou que quando uma lâmina de prata era aquecida num dos extremos surgia entre esse extremo e o outro uma diferença de potencial eléctrico. De facto o efeito de Thomson consiste no aparecimento de uma força electromotriz distribuída ao longo de um condutor cujos extremos estão a temperaturas diferentes, força electromotriz essa que é, em cada ponto, aproximadamente proporcional ao gradiente da temperatura nesse ponto. A este efeito foi dado o nome de William Thomson, mais tarde Lorde Kelvin, notável físico inglês que em 1836 logrou interpretar, sob o aspecto termodinâmico, tanto o efeito de Peltier como o de Thomson.

É importante acrescentar que as forças electromotrices, quer de Peltier, quer de Thomson, não são susceptíveis de ser isoladas e medidas directamente. Qualquer circuito de medição inserido no circuito original iria incluir novos contactos de metais diferentes e novos gradientes de temperatura. Isso levou a que estas forças electromotrices tenham sido postas em evidência pelos primeiros experimentadores, não por medição directa, mas através da variação do efeito térmico produzido quando se inverte o sentido de uma corrente de origem externa, aplicada: quer a um condutor em desequilíbrio térmico, quer a uma junção de dois condutores diferentes.

Relações Quantitativas

Efeito de Peltier

Uma junção de dois condutores de natureza diferente, quer seja realizada por aperto quer por soldadura, apresenta sempre dois aspectos importantes: uma resistência de contacto e uma força electromotriz de contacto.

O efeito de Peltier é quantificado por meio do *coeficiente de Peltier*, que é a energia térmica produzida (ou absorvida) na junção, por segundo, quando a junção é percorrida por uma corrente eléctrica unitária constante.

Em face da definição, o princípio da homogeneidade dimensional das fórmulas físicas leva a concluir que o *coeficiente de Peltier* tem a dimensão de uma força electromotriz, que só pode estar localizada na junção.

Seja então uma junção do condutor A com o condutor B. A força electromotriz pode calcular-se com base no conhecimento dos trabalhos de extracção (de electrões) ϕ_A e ϕ_B de um e de outro condutores

Para retirar um electrão ao condutor B é necessário aplicar o trabalho ϕ_B , e para o introduzir em A é preciso aplicar $-\phi_A$, ou seja um trabalho total $\phi_B - \phi_A$. Por outro lado, as leis do Electromagnetismo estabelecem que para transferir uma carga qualquer q , de uma posição B para outra A é preciso aplicar a energia $q(V_A - V_B)$, sendo V_A e V_B os potenciais eléctricos nos respectivos pontos. No caso presente, como a carga é a do electrão será: $-e(V_A - V_B)$.

Igualando as duas energias:

$$-e(V_A - V_B) = \phi_B - \phi_A$$

$$\Pi_{AB} = V_A - V_B = \frac{\phi_A - \phi_B}{e} \quad (10.29)$$

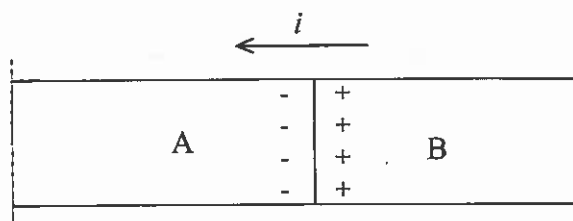


Fig.10-10 Efeito de Peltier entre os metais A e B

Esta diferença de potencial Π_{AB} constitui a essência do efeito de Peltier e vai variar, de forma quase linear, com a temperatura absoluta da junção. Devido ao

aumento, com a temperatura, da percentagem de electrões com excitação elevada, alguns deles vão difundir-se de um condutor para o outro, tendendo naturalmente a baixar o seu nível energético, influenciando assim no valor de Π_{AB} .

A diferença de potencial de uma junção (Fig. 10-10), para todos os efeitos, funciona como a força electromotriz de um gerador. Assim, uma corrente de origem exterior, com o sentido de, por exemplo, o pólo positivo da junção para o negativo, transforma-a num receptor, tal como acontece num acumulador quando recebe carga. Só que na junção não há transformação em energia química (como no acumulador) e a energia recebida vai gerar fonões na rede metálica, isto é, a passagem de corrente com o sentido referido, traduz-se num aquecimento suplementar da junção, além do aquecimento devido ao efeito de Joule. Se a corrente tiver o sentido inverso, a junção passa a funcionar como gerador, mas como não tem apoio mecânico ou químico fornecedor de energia (como tem um gerador típico) vai absorver fonões da vibração térmica da rede estrutural, isto é, vai baixar a temperatura da junção.

Para se aplicar as leis do Electromagnetismo à junção de dois condutores diferentes, A e B substitui-se esta por um conjunto de uma resistência R , em série com uma força

electromotriz Π_{AB} denominada *coeficiente de Peltier* e que, para uma dada temperatura, é função da natureza dos condutores. Fazendo passar pelo conjunto a corrente i , a diferença de potencial V aos terminais é

$V = iR \pm \Pi_{AB}$ + ou -, consoante o sentido da força electromotriz, relativamente ao sentido da corrente aplicada.

Multiplicando ambos os membros da equação por i vem:

$$P = Vi = i^2 R \pm i \Pi_{AB}$$

A potência dissipada na junção é pois:

$$P = P_J \pm P_P$$

Isto é, a potência total na junção tem duas parcelas, P_J que é a potência de efeito de Joule, sempre presente e sempre positiva e P_P a potência de Peltier. Este efeito, com o seu sinal negativo, permite a produção de frio, e quando optimizado pela escolha adequada das componentes do par, - em regra semicondutores - é aproveitado em inúmeras aplicações ligadas à refrigeração, sobretudo para fins científicos.

Efeito de Thomson

Num condutor homogéneo em equilíbrio térmico, o campo eléctrico E é definido como $E = -\nabla V$, sendo V a função potencial. Se no condutor, além do gradiente de potencial houver também um gradiente de temperatura, é preciso juntar mais uma parcela para formar o campo total E_{tot} .

$$E_{tot} = -\nabla V - \mu \nabla T$$

em que μ é uma característica específica do condutor, o *coeficiente de Thomson*, que também apresenta alguma dependência em relação à temperatura.

A segunda parcela do segundo membro desta expressão, por razões ligadas à migração dos electrões por efeito térmico, das secções quentes para as secções contíguas mais frias, traduz-se por outro campo eléctrico, como o primeiro, também distribuído ao longo do condutor. Isso justifica a expressão:

$$E_{tot} = E - \mu \nabla T \quad (10.30)$$

Seja então um condutor percorrido por corrente com a densidade j . Tratando-se de um condutor homogéneo pode admitir-se que as variações da temperatura são nulas de ponto para ponto de uma qualquer secção transversal do condutor, e que só são de considerar na direcção do comprimento l .

Ou seja:

$$|\nabla T| = \frac{dT}{dl}$$

Como ambos os gradientes, o de potencial e o de temperatura, têm a mesma direcção, pode calcular-se a energia térmica total P libertada por unidade de volume e por segundo:

$$P = E_{tot} j = \left(E - \mu \frac{dT}{dl} \right) j = j E - \mu j \frac{dT}{dl}$$

Mas $E = J/\sigma$ (lei de Ohm específica) sendo σ a condutividade eléctrica do material:

$$P = \frac{j^2}{\sigma} - \mu j \frac{dT}{dl} \quad (10.31)$$

A primeira parcela do segundo membro tem a ver com o efeito de Joule típico no condutor e a segunda representa o efeito de Thomson. É de notar que enquanto a primeira parcela, com j elevado ao quadrado é sempre positiva, a segunda pode ser positiva ou negativa, isto é pode originar libertação ou absorção de calor, dependendo do sinal de μ , e do sentido da corrente aplicada, tomando como referência o sentido do crescimento da temperatura.

O *coeficiente de Thomson*, μ tanto pode ser positivo como negativo; no primeiro caso, o calor do efeito de Thomson é positivo (é libertado) se a corrente circula no sentido do decréscimo da temperatura e é negativo (absorvido) se a corrente se inverte; se μ for negativo sucede precisamente o contrário. Aliás o fenómeno é em si complexo; pois se para o chumbo o coeficiente de Thomson é praticamente nulo, há metais em que é sempre positivo (Ag, Cu, Au, Vn, Cd), outros em que é negativo (Pt, Pd, Fe, Sn, Al) e ainda outros, em que sendo positivo até certa temperatura passa depois a negativo (W a 1350 K e Mo a 1040 K).

Os parâmetros relativos, tanto ao efeito de Peltier como ao de Thomson não são completamente independentes entre si; lord Rayleigh estudou o problema com base nas leis da Termodinâmica e apresentou, para um par de condutores A e B, uma relação da seguinte forma:

$$\Pi_{AB} = T \frac{d\varepsilon_{AB}}{dT}$$

$$\mu_A - \mu_B = -T \frac{d^2\varepsilon_{AB}}{dT^2}$$

sendo ε_{AB} a força electromotriz total (duas forças electromotrices de Peltier e duas de Thomson) desenvolvida pelo par, e T a temperatura absoluta.

Imagine-se então um anel formado por duas metades: uma do metal A e a outra metade do metal B. Suponha-se que a temperatura T_2 duma das soldaduras era diferente de T_1 temperatura da outra. A força electromotriz total seria o somatório de duas forças de Peltier e duas de Thomson:

$$\mathcal{E}_{AB} = (\Pi_{AB})_{T_2} - (\Pi_{AB})_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} \mu_A dT - \int_{T_1}^{T_2} \mu_B dT$$

$$\mathcal{E}_{AB} = (\Pi_{AB})_{T_2} - (\Pi_{AB})_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} (\mu_A - \mu_B) dT \quad (10.32)$$

Supondo que tanto $(\Pi_{AB})_T$ como $(\mu_A - \mu_B)$ são funções de T com a forma de polinómios do primeiro grau, obtém-se para \mathcal{E}_{AB} uma função de segundo grau que segue de muito perto o resultado experimental. Existem até tabelas que, dados os metais em presença fornecem valores para os coeficientes numéricos dessa função. No entanto as tabelas da força electromotriz em função da diferença de temperaturas, publicadas pela IEC para um certo número de pares escolhidos, são obviamente mais correctas.

Aspectos Práticos

Num circuito prático de utilização do efeito de Seebeck para medição de temperaturas, na versão mais simples (Fig. 10-11), estão sempre presentes: um par termoeléctrico (ou termopar) com os elementos (A e B) ligados entre si numa das extremidades (1), por simples contacto ou por soldadura, um aparelho indicador (mV), basicamente um milivoltímetro, e condutores de ligação entre a extremidades abertas (2 e 3) do par e o aparelho indicador

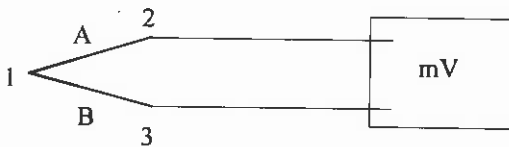


Fig. 10-11 Efeito de Seebeck (esquema de ligações simplificado)

Percorrendo o circuito na sua totalidade vamos encontrar efeitos de Peltier em todos os contactos de metais diferentes (pontos 1, 2 e 3), e efeitos de Thomson pelo menos nos dois elementos que constituem o par.

Evidentemente que consoante o grau de exactidão requerido assim se podem tomar precauções, como por exemplo dispor que cada condutor de ligação seja feito do mesmo material do elemento do par a ligar, ou ainda incluir no circuito uma nova junção (Fig. 10.12) idêntica à primeira e mergulhada numa fonte de temperatura fixa. A indicação recolhida será apenas função da diferença de temperaturas $(T - T_0)$ entre a extremidade soldada do par e a temperatura da fonte fixa, ou no caso da Fig.10-11, de $(T - T_{amb})$, temperatura ambiente, à qual se supõe estar o aparelho indicador.

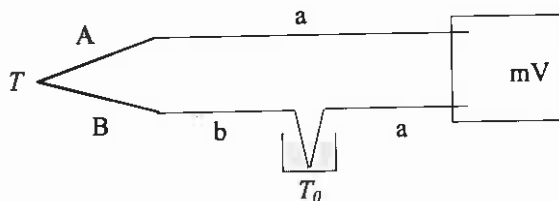


Fig. 10-12 Efeito de Seebeck (esquema prático de ligações)

Na figura estão assinalados os condutores do par A e B, os condutores de ligação, a e b, executados com os mesmos materiais que os elementos respectivos do par, e a fonte de

temperatura fixa T_0 .

Convém no entanto assinalar que na aplicação prática, de entre os pares termoelétricos que a experiência consagrou, cada par tem a sua gama de temperaturas de funcionamento própria, dentro da qual fornece resposta aproximadamente linear.

O par de uso mais corrente é constituído por cobre e por uma liga de cobre e níquel denominada *constantan* e mede até cerca de 350 °C, com um coeficiente de Seebeck (sensibilidade) de 50 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$; enquanto que o par que de 1927 a 1990 foi recomendado nas Escalas Internacionais de Temperatura para medir entre 630 °C e 1064 °C é formado por platina e por uma liga de platina com 10% de ródio, tem um coeficiente de 10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ e mede até 1600 °C.

A Comissão Electrotécnica Internacional interessou-se pelo assunto, seleccionou um certo número de pares de metais ou ligas metálicas, escalonados para as várias gamas de temperatura a medir e fez publicar normalização internacional (Publicação IEC n°60.584), contendo tabelas da força electromotriz em função da diferença de temperaturas nos extremos dos pares escolhidos.

Além da aplicação do efeito de Seebeck à medição de temperaturas há que referir ainda uma outra aplicação: a produção de frio tanto para utilização laboratorial como industrial. É óbvio que nas manifestações térmicas do efeito de Peltier, como nas do efeito de Thomson, estão sempre associadas as perdas de Joule; porém utilizando determinados semicondutores, um de tipo p outro de tipo n, para formar o par, é possível conseguir numa das junções uma absorção de calor bastante superior ao efeito de Joule e obter assim produção de frio. É evidente que na outra junção do circuito vai haver produção adicional de calor; há portanto apenas uma transferência de calor de uma para a outra junção, aliás como acontece nas máquinas frigoríficas por compressão e expansão de fluidos.

10.3.8 - O PIRÓMETRO DE RADIAÇÃO

As Escalas Internacionais de Temperatura têm tradicionalmente disposto que a avaliação de temperaturas acima do ponto de congelação do ouro (1064 °C) se faça através da medição da radiação emitida, tendo como base de cálculo uma lei da radiação.

De 1927, data da publicação da primeira Escala, até 1968, era estipulado o uso da lei de Wien para a radiação do corpo negro, mas com a publicação da Escala Internacional Prática de Temperatura de 1968 (E.I.P.T.-68), passou a usar-se a lei de Planck.

A medição da radiação é feita por comparação do espectro de irradiação do corpo negro à temperatura a medir, com idêntico espectro à temperatura do ponto de congelação do ouro, da prata, ou do cobre. Obviamente que não há necessidade de fazer a comparação na totalidade do espectro; ela é feita apenas numa pequena faixa, obtida por filtragem e centrada num comprimento de onda de $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$ ou, eventualmente, num valor mais baixo. Os filtros utilizados são do tipo interferencial, constituídos por camadas com a espessura de $\lambda/4$, de materiais de elevado índice de refração (fluoreto de magnésio, criolite, sulfureto de zinco), alternadas com camadas muito finas de prata, apresentando o conjunto a largura de banda espectral, a meia altura, de 8 a 15 nm.

O cálculo da temperatura resulta da comparação das áreas de diafragmas reguláveis que intersectam as radiações provenientes, quer de uma cavidade radiante, figurando o corpo negro, mantida à temperatura de congelação de qualquer um dos três metais referidos, quer da fonte cuja temperatura se pretende medir.

A Fig. 10-13- representa um esquema de princípio para a determinação de temperatura por pirometria monocromática.

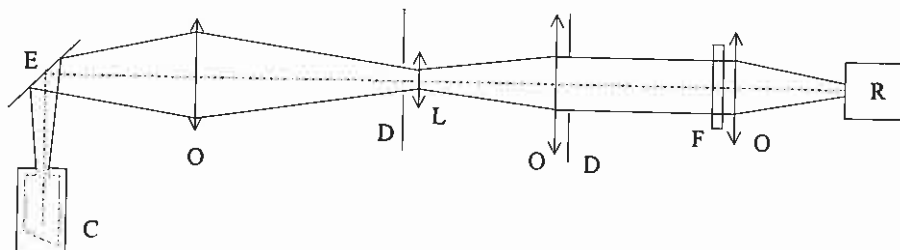


Fig. 10-13 Determinação de temperatura por meio de pirometria monocromática

Na figura representam:

- C - cavidade radiante (corpo negro)
- E - espelho de alumínio em base de quartzo (rotativo)
- O - objectivas
- L - lente de campo
- D - diafragmas
- F - filtro interferencial
- R - receptor

O corpo negro é materializado por um orifício com o diâmetro de 10 mm praticado numa das bases de uma cavidade radiante, ou seja, de uma caixa oca de forma cilíndrica, feita de níquel, cujas superfícies interiores apresentam inúmeras protuberâncias em forma de pirâmides truncadas, de modo a que a radiação, entrada pelo orifício, sofra sucessivas reflexões e não regresse à zona de entrada, figurando-se assim a ausência de reflexão do corpo negro. Os exemplares destas caixas utilizados no BIPM tem uma relação entre a superfície interna de reflexão e a superfície do orifício de entrada, superior a setecentos; o diâmetro exterior é de 70 mm e a altura de 90 mm.

Conforme foi referido, para calcular a temperatura de uma fonte térmica compare-se a radiação proveniente dessa fonte, com a radiação proveniente do orifício da cavidade radiante descrita, a qual foi inserida numa fonte térmica à temperatura do ponto de solidificação da prata (ouro ou cobre), sendo ambas as radiações limitadas a uma estreita faixa de comprimentos de onda, à volta de um valor λ escolhido. As fontes térmicas do BIPM, têm excelente estabilidade de temperatura (constante de tempo de cerca de dez horas) e uma uniformidade de aproximadamente 0,01 K.

A lei de Planck para a radiação do corpo negro estabelece:

$$L_{\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp[C_2 (\lambda T)^{-1}] - 1}, \quad \text{em que são:}$$

L_{λ} - Radiância espectral do corpo negro para o comprimento de onda λ , e à temperatura T

C_1, C_2 - constantes universais

T - temperatura termodinâmica

A relação entre L_{λ} e L_{λ_r} , radiâncias espectrais, da fonte a medir e da fonte de referência, respectivamente, é:

$$\frac{L_{\lambda}}{L_{\lambda_r}} = \frac{\exp[C_2 (\lambda T_r)^{-1}] - 1}{\exp[C_2 (\lambda T)^{-1}] - 1} \quad (10.33)$$

em que T_r é a temperatura da fonte de referência e a constante C_2 , formada por constantes universais, tem valor fixado nas recomendações que acompanham as Escalas de Temperatura.

A expressão permite calcular T , para o que é apenas necessário conhecer o quociente entre as duas densidades espectrais. Sucede porém que ele é igual ao quociente das leituras obtidas no receptor R quando por rotação do espelho E_1 em torno do eixo $\overline{E_1 R}$ (Fig. 10-13), recebe radiação das cavidades radiantes inseridas quer numa fonte quer na outra; podendo ainda recorrer-se à relação das áreas de abertura dos diafragmas, que num e noutro caso intersectam as radiações.

10.4 - ESCALAS INTERNACIONAIS DE TEMPERATURA

10.4.1 - ANTECEDENTES

Vêm de longa data as preocupações da Conferência Geral de Pesos e Medidas - CGPM relativamente à medição de temperaturas. Logo em 1887 o Comité Internacional de Pesos e Medidas - CIPM tomou a decisão (sancionada pela 1ª CGPM em 1889) de adoptar como escala normal a escala do termómetro de hidrogénio de volume constante, como sendo a escala que, na época e para a gama à volta das temperaturas ambientes, mais se aproximava da escala termodinâmica.

Entretanto, em 1913, a CGPM, depois de ter aprovado a materialização e a fixação de um certo número de pontos de referência termométricos, e de se ter declarado pronta a autorizar a substituição da escala normal pela escala absoluta (desde que as tabelas de conversão apresentassem estabilidade), convidou o CIPM a realizar no BIPM, uma reunião dos directores dos vários laboratórios nacionais, reunião que serviria para assentar as bases de uma cooperação internacional no campo da termometria.

A primeira Guerra Mundial fez atrasar todo o esquema previsto, e de tal forma que em 1927, quando reuniu a Conferência de Termometria, os trabalhos empreendidos no BIPM não se encontravam ainda concluídos, e assim os representantes dos laboratórios nacionais da Grã-Bretanha, dos Estados Unidos e da Alemanha acordaram no uso de uma escala comum, comportando pontos fixos e métodos de interpolação. Esta escala veio a ser aprovada, com carácter provisório, pela 7ª CGPM que reuniu no mesmo ano, com a designação: Escala Internacional de Temperatura de 1927, (ITS-27)

Da Conferência de Termometria veio a resultar, em 1937, por proposta do Instituto Internacional do Frio, a criação do Comité Consultivo de Termometria adstrito à CIPM, trabalhando em situação idêntica à de diversos outros Comités Consultivos que integravam a CGPM

Elaboradas já no âmbito deste último organismo e na sequência da ITS-27 foram, em 1948, 1968, 1972 e 1990 publicadas novas versões de escalas internacionais, melhoradas tanto no que respeita à precisão como à amplitude da gama de temperaturas coberta.

A acção do BIPM no campo da termometria foi reduzida, a partir de 1987, ficando limitada à aferição, de elevada precisão, de termómetros de resistência de platina, na faixa parcial de temperaturas entre o ponto triplo da água (0,01 °C) e o ponto de fusão do gálio (29,7646 °C), apenas para uso interno.

10.4.2 - PONTOS DE REFERÊNCIA

O emprego corrente de termómetros primários, concretamente de termómetros de gás de volume constante, na medição directa de temperatura termodinâmica, não é viável, na prática, por várias razões, entre as quais se destacam: o elevado custo deste tipo de termómetros, o elevado tempo de resposta e a utilização complexa e demorada que implica. Isso levou a que desde o estabelecimento da primeira Escala Internacional de

Temperatura, em 1927, tenham sido escolhidas um certo número de temperaturas, mais ou menos fixas, características de determinados fenómenos físicos, e consideradas como *pontos de referência primários*. Essas temperaturas sim, foram medidas em termómetro primário nos laboratórios dos países melhor equipados, como a Inglaterra, os E.U.A., a U.R.S.S., e o Japão e foram aceites, pela CGPM, como a melhor representação possível desses pontos na escala termodinâmica. São em regra temperaturas de pontos de ebulição e de pontos triplos de diversos elementos.

De entre os pontos triplos destaca-se, pela sua importância, o ponto triplo da água. Na prática este ponto é produzido num dispositivo simples (Fig. 10-14), constituído por um tubo de vidro de baixo coeficiente de dilatação, com diâmetro suficiente para nele vir a ser introduzido o elemento sensível de um termómetro.

O tubo é fechado numa das extremidades e é envolvido por uma manga, do mesmo tipo de vidro, que num dos extremos é soldada à parede exterior do tubo e no outro fechada sobre si própria, de modo a originar, no espaço entre o tubo e a manga, uma câmara hermética. Porém, antes do fecho da manga, essa câmara é parcialmente preenchida com água de elevado estado de pureza. Para por a funcionar o dispositivo é preciso rodear o conjunto de uma mistura de água e gelo e introduzir no tubo interior uma vareta metálica previamente arrefecida em azoto líquido, de modo a fazer baixar gradualmente a temperatura da água na câmara hermética, até se produzir gelo, a envolver o tubo interior, simultaneamente com a presença de água no estado líquido e de vapor. Ao fim de algumas horas estabiliza-se a temperatura no ponto triplo da água, podendo manter-se assim durante semanas. O elemento sensível do termómetro a aferir é inserido no tubo interior, depois de retirada a vareta metálica que produziu o arrefecimento e de estabilizada a temperatura.

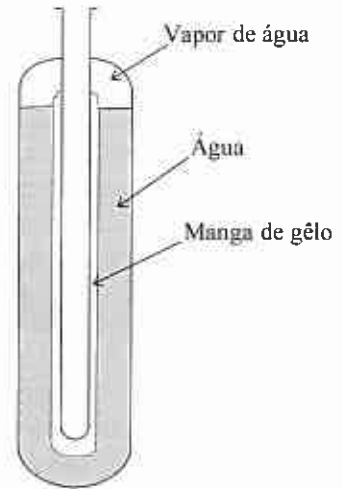


Fig. 10-14 Célula para o ponto triplo da água

Posteriormente, têm sido abandonados – como pontos de referência primários – alguns pontos de ebulição, dada a sua dependência da pressão e, em certa medida, têm sido substituídos por pontos triplos próximos. No caso dos metais deu-se preferência ao ponto de solidificação, em detrimento do ponto de fusão, devido ao facto de a detecção do instante da solidificação poder ser feita dentro de um intervalo de temperaturas bem mais estreito do que no caso da fusão.

A técnica utilizada para se conhecer o momento da mudança de estado, consiste em introduzir num forno eléctrico uma cânula de grafite, no interior da qual se coloca o elemento sensível de um termómetro de platina, cânula que é envolvida por outra, concêntrica, também de grafite, sendo o espaço entre elas parcialmente preenchido pelo metal cujo ponto de solidificação se pretende determinar. O conjunto é envolvido por uma

terceira cânula, metálica ou cerâmica, dotada de vedantes para impedir a fuga do árgon que, para evitar a oxidação, impregna todo o interior.

O forno tem uma grande inércia térmica e à subida lenta da sua temperatura, corresponde subida idêntica do termómetro de platina; excepto no instante da fusão do metal que o rodeia, para o qual a incorporação do calor latente de fusão vai criar um patamar no gráfico representativo do crescimento da temperatura em função do tempo. Patamar idêntico acontece na solidificação, com a devolução, por parte do metal, do calor de fusão, a contrariar a descida de temperatura. Só que neste caso, mostra a experiência que o patamar na linha de temperatura é muito mais nítido do que na fusão, permitindo a fixação do ponto de solidificação num intervalo de valores mais estreito.

Para reproduzir um ponto de solidificação superior ao limite de utilização do termómetro de platina (ponto de solidificação da prata) pode, em vez do termómetro, ser usado um par termoeléctrico adequado. Esta substituição justifica-se porque não se trata de medir uma temperatura (é atribuída pelo BIPM) mas apenas de detectar uma plataforma na sua variação com o tempo; isto é, de realizar uma função de termoscópio e não de termómetro. Para tal o par serve perfeitamente.

A reprodução, relativamente fácil, dos pontos de referência primários, permite aos laboratórios dos diversos países calibrar termómetros secundários, de utilização muito mais expedita e simplificada. No entanto, tendo em vista o relativo afastamento entre os pontos de referência estabelecidos e as dificuldades que daí resultam, foi criada uma segunda tabela de pontos de referência, em maior número que os primários, os quais receberam a designação de *pontos de referência secundários* e que, tal como os pontos de referência primários, fazem parte integrante de cada Escala Internacional. São igualmente constituídos por temperaturas de transformação de fase de diversas substâncias em elevado estado de pureza, e são objecto de uma pesquisa permanente por parte dos laboratórios nacionais melhor equipados, sendo os resultados dessa pesquisa posteriormente comunicados ao BIPM, que quando entende, altera os valores homologados. Só que aos pontos secundários é permitida uma margem de erro um pouco maior que a dos pontos de referência primários. Como exemplo de pontos de referência secundários pode citar-se a Escala Internacional de 1968 (com as adições de 1975), a qual tem adstrita uma tabela com quarenta e duas referências (secundárias), entre as quais figuram: pontos de solidificação, pontos triplos, pontos de ebulição e zonas de transição líquido/vapor e sólido/vapor, com as respectivas fórmulas de dependência entre a temperatura e a pressão – desde o ponto triplo do hidrogénio (13,95 K) até ao ponto de fusão do tungsténio (3 695 K).

As faixas entre pontos de referência, quer primários quer secundários, são cobertas por termómetros secundários (termómetros de transição líquido/vapor ou sólido/vapor, termómetros de resistência eléctrica, pares termoeléctricos e outros), sendo a temperatura relacionada com o parâmetro medido, e que é específico para cada tipo de termómetro (pressão, resistência eléctrica, diferença de potencial), por meio de fórmulas de interpolação cujas constantes, ou vêm referidas na edição da própria Escala Internacional, ou se calculam, resolvendo o sistema de equações algébricas que resulta da aplicação da fórmula em causa a tantos pontos de referência quantas as constantes a calcular.

No nosso País, no Laboratório do Instituto Português da Qualidade existem, entre outro equipamento, células para reproduzir o ponto triplo da água, o ponto triplo do mercúrio e o ponto de fusão do gálio. Há ainda tinas com banhos de: temperaturas reguladas, nomeadamente: de metanol (-80 °C a 0 °C), de água (0 °C a 100 °C) e de óleo de silicone (100 °C a 400 °C). Para temperaturas mais elevadas há um forno que vai a 500 °C e permite obter os pontos de solidificação do Sn e do Zn; um outro até 1070 °C permite obter os pontos de solidificação do Al e da Ag. Para alcançar temperaturas superiores há um forno de corpo negro de grafite que permite fazer a aferição de pirómetros até 2500 °C.

Obviamente que estes dados não passam de uma mera indicação e, como tal, sujeita a correcções e actualizações.

10.4.3 - ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1927 (ITS-27)

Esta escala foi aprovada, com carácter provisório, pela 7ª CGPM com o fim de resolver dificuldades de ordem prática na medição de temperaturas termodinâmicas por meio de termómetros de gás. Proposta inicialmente por três países, E.U.A., Alemanha e Grã-Bretanha, foi depois aceite universalmente, não só pela sua reprodutibilidade como também por permitir obter valores na medição das temperaturas, tão aproximados dos das correspondentes temperaturas termodinâmicas, quanto era possível na época.

A escala começava em -190 °C e tinha seis pontos de referência principais, desde o ponto de ebulição do azoto (-195,79 °C) até ao ponto de fusão do ouro (1063 °C), incluindo, entre outros, os pontos de congelação e de ebulição da água e o ponto de ebulição do enxofre, cujos valores de temperatura foram também fixados.

Como instrumentos de medição estavam previstos, até 660 °C o termómetro de resistência de platina, acima deste valor e até ao ponto de solidificação do ouro o par termoeléctrico Pt / (Pt+Rh) e daí para cima as temperaturas eram definidas em termos da lei de Wien para a radiação do corpo negro. Na aplicação prática era usado o pirómetro de radiação, que foi atrás referido.

Numa época em que a teoria quântica e a lei de radiação Planck já estavam geralmente aceites, difícil se torna explicar a preferência pela lei de Wien em detrimento da de Planck; o que já não aconteceu na escala que se lhe seguiu, a de 1948. Aliás trata-se principalmente de uma questão de princípio, dado que, em termos práticos, os resultados obtidos usando, quer uma lei quer a outra, quase se confundem. A lei de Planck para a radiação total exprime-se por:

$$M_{e,\lambda} = C_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1}$$

em que são:

$M_{e,\lambda}$ - a densidade espectral da excitância radiante do corpo negro,

λ - o comprimento de onda da radiação

T - a temperatura termodinâmica do corpo negro

$$C_1 = 2\pi h c^2$$

$$C_2 = h c/k$$

h - a constante de Planck

c - a velocidade da luz no vácuo

k - a constante de Boltzmann

Nas situações em que $\exp(C_2/\lambda T) \gg 1$ a expressão de Planck pode simplificar-se:

$$M_{e,\lambda} = C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right)$$

resultado a que Wien chegou, por via experimental, poucos anos antes de Planck. Assim, com esta expressão, comete-se um erro relativo inferior a 0.001 quando a exponencial for igual ou inferior a 1000, ou seja, quando $\lambda T < 0,002$ m.K. Como o comprimento de onda da radiação utilizada é próximo de $1\mu\text{m}$ pode concluir-se que, usando a expressão de Wien em vez da de Planck, se comete um erro relativo inferior a 0.001, quando $T < 2000$ K. O erro absoluto equivalente é de 2K, o que para a época era perfeitamente desprezável face às condições experimentais.

10.4.4 - ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1948 (ITS-48)

Esta Escala foi adoptada pela 9ª CGPM e as principais alterações que apresenta em relação à escala de 1927 são:

- a) - descida do limite inferior de temperatura de -190 °C para $-182,97$ °C, valor atribuído à temperatura de ebulição do oxigénio,
- b) - a temperatura que separa as gamas de utilização do termómetro de resistência de platina e do par termoelectrico platina/platina com ródio, passa a ser de 630 °C (ponto de fusão do antimónio) em vez de 660 °C.
- c) - correcção do valor atribuído ao ponto de solidificação da prata,
- d) - ponto de solidificação do ouro substituiu o ponto de fusão do mesmo metal,
- e) - abandono da lei de radiação de Wien e adopção da lei de Planck com correcção do valor atribuído à constante C_2 ,
- f) - a radiação para a pirometria foi restringida à banda visível.

10.4.5 - ESCALA PRÁTICA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1948 (IPTS-48), (Edição acrescida de 1960)

Esta Escala foi adoptada pela 11ª CGPM e apresenta, em relação à ITS-48, as seguintes alterações

- a) – introdução da palavra "Prática" no título da Escala, alteração essa que se manteve nas Escalas posteriores, até à de 1975,
- b) – definição do ponto triplo da água com o valor de 0,01 °C em substituição do ponto de fusão do gelo, como ponto de referência primário,
- c) – consideração do ponto de solidificação do zinco como alternativa preferível ao ponto de ebulição do enxofre,
- d) – retirada da restrição de operar a pirometria apenas na banda visível.

Com a definição do kelvin, aprovada na 10ª CGPM, em 1954, como sendo a *fracção 1/273,16 da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água*, a noção de "escala de temperaturas" perdeu sentido; e a temperatura, a partir desta definição, deixou de ser uma grandeza que necessite do auxílio de uma escala para se poder exprimir e, tal como um comprimento, uma massa ou uma corrente eléctrica, para a caracterizar, basta um número seguido do símbolo da unidade. No entanto por hábito e até por tradição continuou a ser utilizada a palavra "escala", inclusive nas Escalas Internacionais subsequentes.

10.4.6 - ESCALA PRÁTICA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1968 (IPTS-68)

Foi aprovada na reunião do CIPM (Comité Internacional de Pesos e Medidas) que, para tal recebeu poderes por parte da 13ª CGPM (1967/68).

Houve nesta Escala grandes alterações em relação à anterior; concretamente dos valores numéricos de temperatura atribuídos a alguns fenómenos físicos, de forma a esses valores ficarem mais próximos das respectivas temperaturas termodinâmicas. Houve ainda uma extensão da gama de temperaturas abrangidas pela Escala. Em resumo

- a) – o limite inferior da Escala desceu para 13,81 K
- b) – foram definidos seis novos pontos de referência primários:
 - ponto triplo do H₂(eq)13,81 K
 - ponto de ebulição do H₂(eq), a 33 360,6 Pa.....17,042 K
 - ponto de ebulição do H₂(eq).....20,28 K
 - " " " " Ne27,102 K
 - " triplo do O₂54,361 K
 - " de solidificação do Sn231,9681 K

e atribuídos novos valores aos seguintes pontos:

- ponto de ebulição do O₂.....90,188 K
- " " solidificação do Zn.....419,58 °C

-	“	“	“	da Ag.....	961,93 °C
-	“	“	“	do Au.....	1 064,43 °C

Notas: A referência (eq), aplicada ao hidrogénio, significa que há equilíbrio na relação entre as formas orto/para (*spins* paralelos ou anti-paralelos, na molécula) à temperatura mencionada. Os pontos de ebulição, entendem-se à pressão normal (101 325 Pa), salvo outra indicação.

10.4.7 - ESCALA PRÁTICA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1968 (IPTS-68) (Edição acrescida de 1975)

Trata-se de um acréscimo à escala de 1968, aprovado na 15ª CGPM em 1975. As alterações trazidas são poucas; fundamentalmente duas: o facto de o ponto de ebulição do oxigénio ter dado lugar ao ponto de condensação e a introdução do ponto triplo do árgon (83,798 K) como possível alternativa ao ponto de condensação do oxigénio.

10.4.8 - ESCALA PROVISÓRIA DE TEMPERATURA 0,5 K A 30 K - (EPT-76)

Esta escala teve a finalidade de ir ao encontro de duas necessidades: fornecer meios para redução de erros (em relação aos valores correspondentes da temperatura termodinâmica) abaixo de 27,1 K e, por outro lado, cobrir a faixa entre os 5,2 K e os 13,81 K, que não tinha ainda sido considerada em escalas internacionais anteriores. Além disso pretende-se proporcionar uma transição contínua, na sobreposição do extremo mais elevado desta faixa de temperatura, com o início da IPTS-68. Houve assim necessidade de criar novos pontos de referência primários, tais como

-	Ponto de transição supercondutora do cádmio	0,519 K
-	“ “ “ “ “ zinco.....	0,851 K
-	“ “ “ “ “ alumínio....	1,179 6 K
-	“ “ “ “ “ índio.....	3,414 5 K
-	“ “ ebulição do ⁴ He (sob 101 325 Pa)....	4,222 1 K
-	“ “ transição supercondutora do chumbo.....	7,199 9 K

Estas temperaturas são alcançadas:

- por evaporação do hélio líquido a pressões baixas, e consegue descer-se até cerca de 1 K,
- por desmagnetização adiabática de substâncias paramagnéticas cristalinas pode ir-se até 0,01 K.

É evidente que tais temperaturas terão que ser avaliadas por outros tipos de termómetros primários, como o termómetro acústico ou o termómetro de ruído. O primeiro funda-se na relação analítica entre a velocidade do som num gás, contido num reservatório a determinada pressão p , e à temperatura T :

$$v^2 = \gamma_0 \cdot \frac{R T}{\mu} \left[1 + \frac{2 p}{R T} \left(B + \frac{2 T}{3} \cdot \frac{dB}{dT} + \frac{2}{15} T^2 \frac{d^2 B}{dT^2} \right) \right]$$

em que são

v - velocidade do som,

$\gamma_0 = (C_p / C_v)_{p=0}$, relação entre capacidades térmicas mássicas, a pressão e a volume constantes,

R - constante dos gases perfeitos,

T - temperatura termodinâmica do gás,

μ - massa molecular do gás,

p - pressão,

B - segundo coeficiente virial.

Para minimizar a influência dos coeficientes viriais a velocidade v é obtida por extrapolação, para valores da pressão tendentes para zero.

Este termómetro pode medir temperaturas entre 2 K e 200 K. O segundo tipo de termómetro absoluto, para baixas temperaturas, é o termómetro de ruído. Fundamenta-se numa tensão eléctrica, normalmente designada tensão de ruído, que resulta directamente dos movimentos erráticos dos electrões livres; está sempre presente em qualquer resistência e só dependente da temperatura, através da seguinte expressão analítica:

$$\overline{v^2} = 4 k T R f$$

em que são:

$\overline{v^2}$ - tensão quadrática média aos terminais da resistência R

k - constante de Boltzmann

T - temperatura termodinâmica,

f - largura de banda (em Hz) que serviu de base à medição da tensão v

R - valor da resistência

Teórica e experimentalmente provou-se que o ruído *branco* nas resistências (*branco* por analogia com a luz branca, que é formada pela conjugação de frequências de todo o espectro visível) é constituído por um espectro uniforme, que vai até cerca de 10^{13} Hz. Delimitada e conhecida a banda de frequências em que é medida a tensão, calcula-se T . Com este tipo de termómetros podem medir-se temperaturas abaixo de 1 K.

10.4.9 - ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1990 - (ITS-90)

Esta escala foi adoptada pela CIPM na reunião de 1989, de acordo com a Resolução 7 da 18ª CGPM em 1987 e vem substituir a IPTS-68 (edição acrescida de 1975), bem como a EPT-76.

Trata-se de uma escala mais complexa do que todas as anteriores e que, por isso, pede uma descrição com mais pormenor.

Os pontos de referência primários desta escala são:

O KELVIN

- ponto triplo do H ₂ (eq)	13,803 3 K
- " " " Ne	24,556 1 K
- " " " O ₂	54,358 4 K
- " " " Ar	83,805 8 K
- " " " Hg	234,315 6 K
- " " " H ₂ O	273,16 K
- " de fusão do Ga	302,914 6 K
- " " solidificação do In	429,748 5 K
- " " " Sn	505,078 K
- " " " Zn	692,677 K
- " " " Al	933,473 K
- " " " Ag	1 234,93 K
- " " " Au	1 337,33 K
- " " " Cu	1 357,77 K

Além dos pontos fixos constantes da lista anterior, há ainda outros, apresentados sob a forma de equações relacionando a temperatura e a pressão de vapor do hélio; equações que permitem definir por meio do termómetro de equilíbrio de fases líquido/vapor, qualquer temperatura na faixa dos 3 K a 5 K. Os valores das constantes destas equações foram calculados no BIPM com rigor suficiente para que qualquer temperatura, na faixa, possa funcionar como ponto de referência primário.

A ITS-90 cobre temperaturas desde 0,65 K até à temperatura mais elevada que seja praticamente mensurável, em termos da lei de radiação de Planck. Com esta escala pretende-se que a temperatura, referida pelo símbolo T_{90} seja o mais próxima possível da temperatura termodinâmica correspondente. Para tal a escala é dividida em faixas de temperatura e é indicado, para cada faixa, o método ou métodos, a utilizar para a determinação da temperatura. Por vezes as faixas sobrepõem-se, deixando-se assim ao experimentador uma ou duas vias diferentes para medir algumas temperaturas.

De 0,65 K a 5,0 K

Nesta faixa a temperatura T_{90} é definida em termos da relação: pressão do vapor/temperatura do ³He ou do ⁴He, ou seja, do hélio cujo átomo tem dois prótons e um neutrão, ou dois prótons e dois neutrões, respectivamente. Por se tratar de um termómetro de volume constante, em cuja câmara estão presentes simultaneamente as fases, líquida e de vapor, a relação analítica entre temperatura e pressão, filia-se nas equações que foram referidas em 10.3.2.3 (Equação de Clausius-Clapeyron):

$$T_{90} = A_0 + \sum_{i=1}^9 A_i \left[(\ln p - B) / C \right]^i$$

Por não se tratar propriamente de um termómetro primário, os valores das constantes A_0, A_1, \dots, A_9, B e C foram determinados no BIPM e vêm indicados, tanto para o ³He como para o ⁴He, sendo, naturalmente a pressão p expressa em pascal e a temperatura em kelvins.

É curioso referir que é nesta faixa, e em relação ao ^4He , que se situa um valor notável da temperatura, o ponto λ (2,176 8 K). É designado *ponto lambda*, pela circunstância de a curva representativa do calor específico do ^4He em função da temperatura, apresentar nesse ponto um pico elevado, com pendentes abruptas desiguais, à esquerda e à direita, figurando precisamente a letra grega λ . Na Natureza, o ^4He existe misturado com o ^3He na proporção de 10^6 partes para 1 parte, no entanto, a partir da década de 40 as reacções nucleares trouxeram facilidades de obtenção do ^3He .

De 3,0 K a 24,556 1 K

Funcionam aqui novamente os dois isótopos do hélio já referidos, o 3 ou o 4, mas agora como termómetro de gás, que precisará de ser previamente calibrado em três pontos de referência primários: o P.T.(ponto triplo) do Ne, o P.T. do H_2 e uma temperatura entre 3,0 K e 5,0 K, determinada como se especifica para a faixa anterior

Para cobrir completamente a faixa de 3,0 K a 24,556 1 K, a expressão usada é:

$$T_{90} = \frac{a + b p + c p^2}{1 + B(T_{90}) N / V}$$

em que a , b e c são constantes que se calculam aplicando a fórmula às três temperaturas padrão referidas, e em que $B(T_{90})$ é o segundo coeficiente virial, a calcular em função da temperatura, por meio de fórmulas apresentadas e que são diferentes conforme o isótopo do hélio utilizado; N é a quantidade de gás expressa em moles e V o volume da câmara do termómetro.

O símbolo T_{90} representa a temperatura termodinâmica definida de acordo com o estipulado na ITS-90.

Para cobrir temperaturas entre, 4,2 K e 24,566 1 K, com o ^4He , admite-se que o gás se aproxima muito do gás perfeito e, então, por ser $B(T_{90})$ nulo, o segundo membro da expressão fica reduzido ao numerador.

Equações deste tipo foram abordadas em 10.3.2. - *Expansão Virial*.

Do ponto triplo do H_2 (13,803 3 K) ao ponto de solidificação da Ag (961,78 °C)

É o campo de utilização do termómetro de resistência de platina. Não é o valor em ohms da resistência de platina (em geral 25 Ω) que se utiliza na formulação; ele é substituído por um valor relativo, adimensional, $W(T_{90})$ que resulta de

$$W(T_{90}) = R(T_{90}) / R(273,16 \text{ K})$$

ou seja, do quociente entre o valor da resistência do termómetro à temperatura T_{90} e o valor à temperatura do ponto triplo da água.

No BIPM há um termómetro de resistência de platina que é considerado como termómetro de referência e cuja resistência relativa é designada por $W_r(T_{90})$. Esse termómetro foi calibrado nos pontos de referência primários que caem dentro da sua faixa

de utilização, e cada calibração forneceu um par de valores de $W_r(T_{90})$ e de T_{90} . De posse de todos esses pares de valores, foi possível encontrar, através de um somatório de funções simples, tradução analítica adequada da relação entre estas duas grandezas. Na realidade, foram elaboradas, não uma relação mas duas, face à conveniência da subdivisão da faixa em duas faixas parciais: uma de 13,803 3 K até 273,16 K (P.T. da água), e outra de 273,16 K até 961,78 °C (P.C. da prata).

A título de exemplo transcreve-se a segunda das expressões:

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \cdot \frac{(T_{90} - 754,15)^i}{481}$$

da qual são dados os valores de C_0 , e de C_i (desde $i=1$ até $i=9$), sendo T_{90} expresso em kelvins. Juntamente com estas expressões são também fornecidas as funções inversas, que permitem calcular, não propriamente T_{90} em função de W_r , mas uma temperatura "relativa": $T_{90}/273,16$ que, tal como W_r , é adimensional

Para reproduzir o kelvin num qualquer laboratório nacional, prepara-se um termómetro de resistência de platina idêntico ao do BIPM, o qual é aferido nos mesmos pontos de referência, existentes no laboratório nacional. Mas, naturalmente, os valores de $W(T_{90})$ obtidos, para cada ponto de referência, serão diferentes dos valores correspondentes $W_r(T_{90})$ do termómetro do BIPM. Há portanto que elaborar uma *função desvio*, para o termómetro usado como padrão nacional.

$$\Delta = W(T_{90}) - W_r(T_{90})$$

De posse de valores desta função em vários pontos discretos, é essencial torná-la contínua, para que possa ser utilizada na medição de uma temperatura em qualquer ponto da faixa. Para explicitar o desvio de forma contínua, a ITS-90 tem já preparadas funções, ou melhor, somatórios de funções, não propriamente de $W(T_{90})$ mas de $[W(T_{90}) - 1]$.

De facto, são três os somatórios, resultantes da subdivisão da faixa em três intervalos: de 13,8 K a 273,16 K, de 83,8 K a 273,16 K e de 273,16 K a 961,78 °C. Como exemplo transcreve-se a equação respeitante ao primeiro intervalo:

$$\Delta = W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a [W(T_{90}) - 1] + b [W(T_{90}) - 1]^2 + \sum_{i=1}^5 c_i [\ln W(T_{90})]^{i+2}$$

Os coeficientes a , b e c_i ($i=1$ a $i=5$) são calculados, resolvendo o sistema de equações algébricas que resulta da aplicação da expressão do desvio aos pontos fixos, cujo valor é conhecido, por medição directa.

Em resumo: para num laboratório nacional se proceder a uma medição de T_{90} , começa por se obter $W(T_{90})$ fazendo:

$$W(T_{90}) = \frac{\text{resistencia a } T_{90}}{\text{resistencia a } 273,16 \text{ K}}$$

Supondo já preparada a função desvio, com todos os seus coeficientes, introduz-se nela o valor de $W(T_{90})$ e obtém-se Δ . De seguida faz-se a diferença

$$W_r(T_{90}) = W(T_{90}) - \Delta$$

O valor de $W_r(T_{90})$ é o que seria obtido se, nas mesmas condições experimentais, em vez do termómetro do laboratório nacional estivesse a ser usado o termómetro do BIPM +10

Resta agora, através da função inversa de $W_r(T_{90})$, entrar com este valor e calcular $T_{90}/273,16$, que é o valor relativo da temperatura procurada.

Acima do ponto de solidificação da prata (961,78 °C)

É a faixa de acção do pirómetro de radiação, a qual, por sua vez, é relacionada com a temperatura termodinâmica pela lei de Planck. A expressão analítica que liga as duas grandezas é:

$$\frac{M_\lambda(T_{90})}{M_\lambda[T_{90}(X)]} = \frac{\exp\{c_2[\lambda T_{90}(X)]^{-1}\} - 1}{\exp[c_2(\lambda T_{90})^{-1}] - 1}$$

na qual $T_{90}(X)$ é o ponto de solidificação de qualquer dos seguintes metais

$$T_{90}(Ag) = 1\,234,93\text{ K}$$

$$T_{90}(Au) = 1\,337,33\text{ K}$$

$$T_{90}(Cu) = 1\,357,77\text{ K}$$

e em que $M_\lambda(T_{90})$ e $M_\lambda[T_{90}(X)]$ são as densidades espectrais das radiancias do corpo negro no vazio, para as respectivas temperaturas e para o comprimento de onda λ utilizado. O coeficiente c_2 da fórmula de Planck é expresso como $c_2 = 0,014\,388\text{ m.K}$

O quociente das duas leituras do pirómetro, uma para a fonte a medir e outra para a fonte padrão (Ag, Au ou Cu), introduzido na expressão anterior, bem como a temperatura $T_{90}(X)$ escolhida, permite calcular T_{90} .

Nota – Na 21ª CGPM, em 1999, o CIPM foi convidado a preparar uma equação da pressão do ^3He para servir de base a uma extensão da ITS-90, do seu limite inferior anterior de 0,65 K até 1 mK.

A CANDELA

A primeira manifestação conhecida, do interesse científico pela medição da sensação luminosa, foi a publicação, em 1725, da obra: *Essai sur la gradation de la lumière*, da autoria do físico, matemático e astrónomo francês Pierre Bouguer.

Mais tarde, no século XIX, sentiu-se a necessidade de encontrar uma referência, para comparar intensidades de fontes luminosas e, naturalmente, foi escolhida a versão mais simples de uma fonte luminosa, a vela de estearina. Porém, os experimentadores depressa se aperceberam das variações a que estava sujeito o padrão eleito; variações relacionadas com: o diâmetro da vela, as dimensões do pavio, a pureza da própria estearina etc., as quais tornaram evidente a necessidade de se procurar um padrão mais estável.

Assim, em França, foi adoptada como padrão a chama da lâmpada designada por "Carcel", nome do relojoeiro que em 1800 a construiu. A principal característica desta lâmpada era um mecanismo de relojoaria que accionava um êmbolo, que tinha por função, manter constante o nível do combustível no compartimento onde mergulhava o pavio. A lâmpada padrão consumia, por hora, 42 g de óleo, purificado, de sementes de colza, uma planta oleaginosa, semelhante à couve vulgar, que é utilizada na alimentação animal.

Na Alemanha foi escolhida como padrão a chama da lâmpada Hefner (1884), caracterizada por um dimensionamento estreitamente definido e cujo combustível era o acetato de amilo, enquanto que na Inglaterra se veio a usar a lâmpada Vernon-Harcourt (1887), de gás pentano.

Perante tal panorama reuniu-se em França, em 1884, a Conferência Internacional de Electricidade, na qual, sob proposta do francês Violle, foi adoptada como unidade absoluta, *a intensidade da radiação luminosa emitida por 1 cm² da superfície de um banho de platina incandescente, à temperatura de solidificação, na direcção perpendicular a essa superfície*. Ficou convencionado designar-se por *Padrão Violle*.

Em termos práticos, esta unidade mostrou logo de início, ser demasiado grande; e assim em 1889, o Congresso dos Electricistas reunido também em Paris, fixou uma nova unidade, com carácter prático, que recebeu a designação de *vela decimal*; decimal porque

equivale a 1/10, não do Violle mas de uma outra unidade já referida, o Carcel, o qual, por sua vez, valia cerca de metade do Violle.

11.1 - A VELA INTERNACIONAL

No princípio do século XX, não obstante as tentativas de unificação do padrão de intensidade luminosa, cada país decidiu a seu modo. Na intenção de se encontrar um padrão que pudesse ser aceite internacionalmente, reuniram-se em 1909, nos E.U.A., representantes dos laboratórios nacionais de França, da Grã-Bretanha e dos E.U.A. e estabeleceram uma nova unidade que denominaram *vela internacional*, representada e mantida na forma de um certo número de lâmpadas eléctricas de filamento de carvão, que seriam conservadas por esses países.

Porém, com o correr dos anos, foi crescendo a preocupação com a estabilidade das referidas lâmpadas, em relação ao tempo, e assim, em 1931/32 a *vela internacional*, que elas representavam, foi comparada com a *unidade absoluta* de Violle, baseada na platina à temperatura de solidificação. Simultaneamente procedeu-se também à comparação da vela internacional com o padrão Hefner.

A comparação da vela internacional com o padrão Violle foi realizada, em França, no BIPM e na Universidade de Estrasburgo e ainda nos E.U.A. no National Bureau of Standards, NBS com os seguintes resultados, expressos em velas internacionais por centímetro quadrado de platina:

BIPM → 58,96
Univ. Est. → 58,78
NBS → 58,86

Como o erro absoluto atribuído a estas medições era de cerca de 0,2 foi decidido tomar para o padrão Violle, a média dos resultados obtidos, ou seja, o valor de 58,9 velas internacionais por centímetro quadrado de platina. A comparação entre a vela internacional e a chama Hefner mostrou que a primeira é ligeiramente maior que a segunda, sendo de 1,129 a sua relação.

11.2 - A VELA NOVA

O valor do quociente entre as intensidades, da vela internacional e do padrão Violle (58,9), face à circunstância de se situar muito próximo de um número exacto de dezenas (60), de utilização mais cómoda, suscitou a ideia de uma ligeira alteração no valor da unidade, em si, de modo a consagrar a fixação da referida relação neste último valor.

Em 1933, quando da criação do CCP (Comité Consultivo de Fotometria) foi apresentada uma proposta nesse sentido. O problema manteve-se em suspenso e, convictos da conveniência da adopção desse valor, logo na primeira reunião do CCP, em

Junho de 1937, os representantes do NBS (E.U.A.), do NPL (Inglaterra) e do LCIE (França) apresentaram em conjunto uma proposta tendente à adopção de uma nova definição da unidade de intensidade luminosa. E vários foram os nomes sugeridos para a nova unidade: vela universal, vela nova, vela 1937, vela platina, vela normal e vela unificada. Finalmente o CCP adoptou a designação *vela nova*.

O processo de aceitação da nova unidade não foi pacífico; houve posições contrárias, especialmente dos representantes da U.R.S.S., que opinavam ser natural e habitual manter o valor de qualquer unidade quando há que alterar as bases da sua formação e, além disso, que a grande extensão territorial do país tornava a mudança pesada, do ponto de vista económico. A questão arrastou-se e só foi aprovada na reunião de 1946 do Comité Internacional de Pesos e Medidas, (CIPM).

11.3 - A CANDELA (1948)

Pouco tempo teve de duração a designação *vela nova*; em 1948 na 9ª CGPM foi aprovada a alteração do nome da unidade para *candela*, mantendo-se embora a mesma definição de 1946:

a candela é a intensidade luminosa, na direcção perpendicular, de uma superfície de 1/600 000 metros quadrados dum corpo negro à temperatura de solidificação da platina, sob a pressão de 101 325 newtons por metro quadrado (pascal), e que é semelhante à que mais tarde (1967) foi ratificada pela 13ª CGPM:

Em 1979 esta definição foi alterada, embora se tivesse mantido o valor e o nome da unidade.

11.4 - ORGANISMOS SUPERINTENDENTES

Em 1884 o governo francês, no seguimento das conclusões da Conferência Internacional de Unidades Eléctricas, fez elaborar um anteprojecto que visava conferir ao BIPM a construção, a verificação e a conservação dos *padrões eléctricos e luminosos*. O CIPM examinou a proposta na reunião do ano seguinte e, se bem que obtivesse parecer favorável da maioria dos estados representados, a proposta não teve seguimento.

No que respeita a unidades eléctricas, só em 1921 é que o BIPM recebeu, na 6ª reunião do CIPM, a missão de se ocupar *do estabelecimento e conservação dos padrões das unidades eléctricas e dos seus testemunhos,...* A fotometria teve que esperar mais algum tempo, até que em 1929 o CIPM solicitou ao Comité Consultivo de Electricidade – CCE (do BIPM), conselho sobre a hipótese de juntar às tarefas do CCE a metrologia da Fotometria. Assim, o CCE passou a ser designado por CCEP.(Comité Consultivo de Electricidade e Fotometria) e acumulou as funções correspondentes até 1933, data em que foi criado o CCP (Comité Consultivo de Fotometria), distinto do CCE.

A primeira reunião do novo organismo só teve lugar em Junho de 1937 e nela foi solicitada ao CIPM a criação de um laboratório de Fotometria no BIPM *para permitir a comparação de padrões nacionais de intensidade e de fluxo luminoso e cuja finalidade seria a de contribuir para a unificação internacional da importante grandeza física que é a intensidade da luz.*

O papel que, neste campo, o BIPM destinou para si próprio, tanto na época como depois, não foi propriamente a realização do padrão primário, mas sim a conservação dos padrões secundários de referência, sob a forma de lâmpadas eléctricas de incandescência com filamento de tungsténio – mais estável que o filamento de carvão –, sendo os valores atribuídos pelo BIPM a essas lâmpadas, baseados numa “unidade média” resultante das determinações feitas nos laboratórios nacionais que tinham realizado o padrão primário, de platina, e que previamente enviaram ao BIPM um certo número de lâmpadas calibradas, para efeitos de inter-comparação.

Em 1971 a designação de CCP (Comité Consultivo de Fotometria), foi alargada para CCPR. (Comité Consultivo de Fotometria e Radiometria), em face da tendência, já então existente, de substituir a medição das grandezas visuais (Fotometria) pela medição das grandezas energéticas (Radiometria) e englobando, além da radiação visível, a radiação infravermelha e a ultravioleta.

Embora associadas à Fotometria existam outras actividades tais como a Colorimetria, a Óptica, a Fotografia, a Astronomia etc., o papel do BIPM continua sendo limitado, voluntariamente, à metrologia de base.

11.5 - ASPECTOS QUANTITATIVOS (Fotometria - Radiometria)

Quando uma radiação electromagnética incide sobre a pele humana provoca, em geral, uma sensação de calor, mais ou menos intensa, conforme a região do corpo atingida, conforme a intensidade da radiação e conforme a gama de frequências que a compõem. No que respeita à região do corpo e à intensidade da radiação a dependência é óbvia, mas quanto às frequências pode afirmar-se que a sensação de calor é mais notória na parte da gama que corresponde à zona do infravermelho. Há no entanto no nosso corpo duas pequenas áreas, por assim dizer, “especializadas” numa banda de frequências um pouco mais elevadas; e a sensação aí produzida é diferente da sensação térmica: é a sensação luminosa.

Assim, quando um feixe de radiação de frequência adequada incide sobre a vista humana, está-se perante uma energia radiante, que flui no tempo, e se pode exprimir em joules por segundo ou seja, em watts; e, subjectivamente, está-se também perante aquilo que pode ser definido como um fluxo de energia luminosa, a qual, não sendo verdadeiramente uma energia, corresponde ao fluxo de energia radiante tal como é avaliado pela vista humana. Para exprimir quantitativamente este fluxo criou-se a unidade designada por *lúmen*.

É sabido que a sensibilidade da vista humana às chamadas radiações visíveis é variável; para comprimentos de onda inferiores a 380 nm é praticamente nula, cresce daí em diante, atinge um máximo por volta de 550 nm, decresce e volta a ser nula a partir de

700 nm. Naturalmente que este esquema de sensibilidade varia de indivíduo para indivíduo e isso levou a que por volta de 1924 fossem feitas experiências pela Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), utilizando um número elevado de observadores considerados normais, cujos resultados médios, expressos na forma de tabelas ou gráficos passaram a representar a sensibilidade do *observador de referência CIE*, em função do comprimento de onda da radiação.

A grandeza que foi objecto de medição $-V(\lambda)-$ designa-se por: *eficiência luminosa espectral* (de uma radiação monocromática de comprimento de onda λ), é adimensional e define-se pelo quociente entre dois fluxos radiantes (energéticos)

$$V(\lambda) = \frac{\phi_{e,max}}{\phi_{e,\lambda}}$$

sendo $\phi_{e,max}$ um determinado fluxo de radiação monocromática, com um comprimento de onda correspondente à sensibilidade máxima da vista humana (observador de referência CIE) e $\phi_{e,\lambda}$ o fluxo energético de comprimento de onda λ , necessário para produzir no observador uma sensação que, diferente embora na cor, atinja a mesma intensidade visual.

A tabela de $V(\lambda)$ em função do comprimento de onda foi adoptada pela CIPM em 1933.

Em 1951 a CIE adoptou uma segunda tabela, algo diferente da primeira, na qual a grandeza representada $V'(\lambda)$ corresponde à visão *escotópica*, ou visão nocturna. A tabela de $V(\lambda)$ diz respeito à visão *fotópica*, ou diurna, e tem uma utilização muito mais vasta.

Cada um destes dois tipos de visão assenta na predominância de acção de um ou de outro dos dois elementos que constituem a retina humana: as células em forma de cone – os *cones* – e as células em forma de bastão – os *bastonetes* –, respondendo os primeiros pela visão *fotópica* e os segundos pela *escotópica*.

O Vocabulário Electrotécnico Internacional – VEI refere que a visão é *fotópica* quando o olho normal está adaptado a uma luminância de algumas candelas por metro quadrado, diz que a visão é *escotópica* quando o olho normal está adaptado à luminância de alguns centésimos de candela por metro quadrado e ainda que a visão *mesópica* se situa no intervalo das visões anteriores. A tabela da visão *mesópica* está há anos em estudo em Inglaterra, por parte de vários organismos e, depois de discutida com a CIE, deverá ser apresentada numa conferência especial, em Londres.

De uma forma geral a visão fotópica corresponde à situação de iluminação solar diurna, enquanto que a visão escotópica corresponde à situação nocturna, como por exemplo na iluminação de estradas. A visão mesópica cobre a zona intermédia e corresponde, por exemplo, à iluminação de uma rua citadina com montras comerciais de ambos os lados ou ainda aos túneis rodoviários. Os valores de $V(\lambda)$ e de $V'(\lambda)$ constam do quadro que se segue.

AS UNIDADES FUNDAMENTAIS DO SISTEMA INTERNACIONAL
 ASPECTOS HISTÓRICOS E TÉCNICOS -

Comprimento de onda λ (nm)	Visão fotópica $V(\lambda)$	Visão escotópica $V'(\lambda)$
380	0,000 0	0,000 589
390	0,000 1	0,000 1
400	0,000 4	0,009 29
410	0,001 2	0,034 84
420	0,004 0	0,096 0
430	0,011 6	0,199 8
440	0,023	0,328,1
450	0,038	0,455
460	0,060	0,567
470	0,091	0,676
480	0,139	0,793
490	0,208	0,904
500	0,323	0,982
510	0,503	0,997
520	0,710	0,935
530	0,862	0,811
540	0,954	0,650
550	0,995	0,481
560	0,995	0,328 8
570	0,952	0,207 6
580	0,870	0,121 2
590	0,757	0,065
600	0,631	0,033 15
610	0,503	0,015 93
620	0,381	0,007 37
630	0,265	0,003 335
640	0,175	0,001 497

(Continuação)

Comprimento de onda λ (nm)	Visão fotópica $V(\lambda)$	Visão escotópica $V'(\lambda)$
650	0,107	0,000 677
660	0,061	0,000 312 9
670	0,032	0,000 148 0
680	0,017	0,000 071 5
690	0,008 2	0,000 025 33
700	0,004 1	0,000 017 80
710	0,002 1	0,000 009 14
720	0,001 05	0,000 004 78
730	0,000 52	0,000 002 546
740	0,000 25	0,000 001 397
750	0,000 12	0,000 000 760
760	0,000 06	0,000 000 425
770	0,000 03	0,000 000 241
780	0,000 015	0,000 000 139

A curva representativa da tabela de $V(\lambda)$, com valores extremos tendentes para zero e com um valor máximo igual à unidade, para o comprimento de onda de cerca de 550 nm, representa, na verdade, a sensibilidade média da vista humana normal (diurna). Assim, e em termos analíticos, pode considerar-se que a quantificação de um fluxo de radiação visível é convenientemente expressa pelo produto do fluxo energético correspondente pelo factor $V(\lambda)$. Só que uma expressão assim constituída não respeitaria o princípio de identidade dimensional das fórmulas físicas. Falta pois um factor constante Km cuja dimensão permita o acerto. A expressão:

$$\phi_v = \phi_e V(\lambda) Km$$

é a expressão adequada a uma radiação monocromática. Para uma radiação complexa será:

$$\phi_v = Km \int \frac{d\phi_e}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

A constante referida Km , em virtude de $V(\lambda)$ ser adimensional, tem de ser expressa em lúmens por watt. Designa-se por *eficácia luminosa espectral máxima*.

Pode ainda considerar-se uma outra grandeza:

$$K(\lambda) = Km V(\lambda)$$

que é designada por *eficácia luminosa espectral*.

Se se tratar de uma radiação complexa chama-se ainda *eficácia luminosa* da radiação ao quociente:

$$K = \frac{\phi_v}{\phi_e}$$

O valor numérico da constante Km foi determinado com base na definição da candela (anterior a 1979), na tabela de $V(\lambda)$ e na suposição de que a irradiação da superfície da platina à temperatura de solidificação, se faz de acordo com uma lei bem definida, chamada *lei de Lambert*. Para se obter o valor de Km parte-se da sua expressão de definição:

$$Km = \frac{\phi_v}{\int \frac{d\phi_e}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda} \quad (11.1)$$

Ou, para efeito de cálculo numérico, e dividindo o espectro em faixas ($\Delta\lambda$):

$$Km = \frac{\phi_v}{\sum \frac{d\phi_e}{d\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda} \quad (11.2)$$

Determinam-se valores para as grandezas intervenientes fazendo referência à irradiação da superfície de, por exemplo, 1 cm^2 de platina. Calcula-se ϕ_v partindo da intensidade de $I = 60 \text{ cd}$, na direcção normal à superfície (definição da candela) e do valor de $60 \times \cos\alpha$, para intensidades numa direcção fazendo um ângulo α com a normal (lei de Lambert). Integrando os fluxos elementares de forma a cobrir o ângulo sólido $2\pi \text{ sr}$ (espaço frontal à superfície de platina) obtem-se $\phi_v = \pi I$ ou seja, substituindo valores, cerca de $188,5 \text{ lm}$.

O denominador da fracção resolve-se por integração numérica. Divide-se o campo de integração ($380 \text{ a } 870 \text{ nm}$) em 41 faixas de $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$, centradas sobre os comprimentos de onda da tabela de $V(\lambda)$ e tomam-se a meio de cada faixa os valores de $d\phi_e/d\lambda$.

Por definição de excitância radiante é $M_e = d\phi_e/dA$ sendo A a área de irradiação considerada (1 cm^2), mas como no caso presente a distribuição de fluxo pela área é suposta uniforme, pode escrever-se $M_e = \phi_e/A$ ou seja

$$\frac{dM_e}{d\lambda} = \frac{1}{A} \frac{d\phi_e}{d\lambda} \quad (11.3)$$

O somatório que figura no denominador da fracção de Km é então:

$$A \sum \frac{dM_e}{d\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda \quad (11.4)$$

Sendo os valores para $dM_e/d\lambda$ calculados pela lei de Planck (para a temperatura de solidificação da platina), os valores de $V(\lambda)$ tirados da tabela respectiva e $\Delta\lambda=10$ nm.

Obtém-se para Km um valor ligeiramente superior a 680 lúmens por watt; valor que ao longo dos anos tem evoluído, ao sabor dos acertos ocasionais das constantes universais que entram na lei de Planck e, principalmente, das flutuações da temperatura atribuída à solidificação da platina. Por tudo isso em 1979 fez-se nova definição da candela, abandonando-se a solidificação da platina mas, para não se alterar o valor do padrão, manteve-se para Km , como base, o valor de 683 lm.W^{-1} , considerado na época como mais exacto.

Foram já referidas as seguintes grandezas:

ϕ_e - fluxo radiante.....	W
ϕ_v - fluxo luminoso.....	lm
$K_{(\lambda)}$ - eficácia luminosa espectral.....	lm W^{-1}
$V(\lambda)$ - eficiência luminosa espectral.....	adimensional
Km - eficácia luminosa espectral máxima.....	lm W^{-1}
K - eficácia luminosa	lm W^{-1}

no entanto há ainda conveniência em fazer referência a mais algumas.

11.5.1 - INTENSIDADES

Imagine-se uma fonte radiante, supostamente pontual, e seja $d\phi_e$ o fluxo energético contido num cone elementar de ângulo sólido $d\Omega$, com vértice na fonte radiante e o eixo numa direcção qualquer. Pode definir-se uma nova grandeza, com base no fluxo por unidade de ângulo sólido.

$$I_e = \frac{d\phi_e}{d\Omega}$$

É a *intensidade radiante* que caracteriza a fonte na direcção considerada. Exprime-se em *watt por esterradiano*. Paralelamente, em termos luminosos, pode definir-se a *intensidade luminosa*:

$$I_v = \frac{d\phi_v}{d\Omega}$$

que se exprime em *candela* (cd) e, da mesma forma, caracteriza a fonte na direcção escolhida.

11.5.2 - EXCITÂNCIAS

Podem ainda definir-se outras grandezas, relacionando os fluxos com as áreas de emissão das fontes, tais como:

$$M_e = \frac{d\phi_e}{dA}$$

densidade de fluxo radiante ou *excitância radiante* de um ponto numa superfície. Exprime-se em *watt por metro quadrado*.

Paralelamente define-se também a *densidade de fluxo luminoso* ou *excitância luminosa*:

$$M_v = \frac{d\phi_v}{dA}$$

que se exprime em *lúmen por metro quadrado*.

11.5.3 - LUMINÂNCIAS

As fontes luminosas primitivas, como a vela de estearina ou mesmo a lâmpada de incandescência, podem ser aproximadamente consideradas como fontes pontuais, que numa dada direcção, serão caracterizadas, entre outros factores, pela intensidade luminosa. Porém, se se tratar de uma fonte não pontual, como por exemplo uma lâmpada fluorescente ou de uma lâmpada protegida por um difusor, surge a necessidade de recorrer a novas grandezas.

O conceito de *luminância* L define-se por:

$$L_e = \frac{dI_e}{dA \cos \theta} = \frac{d^2 \phi_e}{d\Omega dA \cos \theta}$$

luminância energética ou *radiância*, que se exprime em watts, por esterradiano e por metro quadrado. Em termos luminosos há a *luminância luminosa*, ou *só luminância*, que se exprime em *candela por metro quadrado*:

$$L_v = \frac{dI_v}{dA \cos \theta} = \frac{d^2 \phi_v}{d\Omega dA \cos \theta}$$

Em ambas as expressões o ângulo θ mede a distância angular entre a normal à superfície dA e a direcção da radiação considerada, e o ângulo sólido $d\Omega$ delimita o fluxo $d^2 \phi$, situado em redor dessa direcção.

Os conceitos de *luminância* e de *radiância* aplicam-se tanto à radiação que sai de superfícies emissivas, como à que atinge as superfícies receptoras como ainda à que atravessa superfícies situadas no percurso da radiação

11.5.4 - IRRADIÂNCIA E ILUMINÂNCIA

A iluminação de superfícies receptoras também tem as suas grandezas características. Define-se *irradiância* de um ponto numa superfície, como sendo o fluxo radiante que atinge a superfície, por unidade de área.

$$E_e = \frac{d\phi_e}{dA} \quad \text{que se exprime em watt por metro quadrado, e também:}$$

$$E_v = \frac{d\phi_v}{dA} \quad \text{que se exprime em lúmen por metro quadrado, ou seja, em lux}$$

e se designa por *iluminância* ou também por *iluminação* (num ponto numa superfície).

11.6 - EQUIPAMENTOS DE MEDIDA

As principais grandezas em Fotometria, são: a intensidade luminosa e o fluxo luminoso, e para as medir existe à disposição um conjunto de instrumentos, de entre os quais se estudarão os mais importantes.

11.6.1 - FOTÓMETROS

São aparelhos que medem a intensidade luminosa. Os primeiros fotômetros, como o de BOUGUER, ou o de FOCAULT, eram instrumentos simples, nos quais eram comparadas duas fontes luminosas, – uma delas servindo de padrão – montadas lado a lado no banco fotométrico, de forma a que cada uma iluminasse metade de uma placa translúcida colocada perpendicularmente aos raios luminosos. Do outro lado da placa um observador procurava igualar as iluminâncias de cada uma das metades, actuando sobre as distâncias, da fonte ou do padrão, à placa (Fig. 11-1).

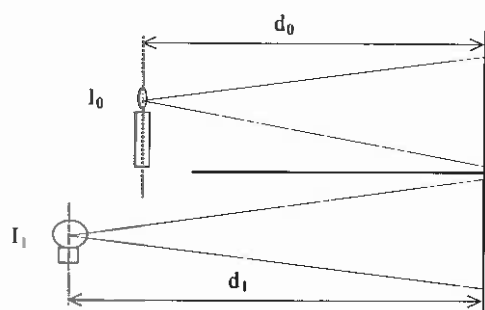


Fig. 11-1 Fotômetro de Bouguer

A comparação entre as intensidades luminosas, I da fonte e I_0 do padrão, tem o seguinte desenvolvimento analítico:

Viu-se que

$$E = \frac{d\phi}{dA} \text{ e também que, por}$$

definição da intensidade I ,

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega}, \text{ sendo } d\Omega \text{ o ângulo}$$

sólido do cone elementar com que a área dA da placa translúcida é vista a partir da fonte luminosa (pontual).

$$\text{Substituindo a segunda expressão na primeira vem, } E = \frac{I d\Omega}{dA}$$

Mas como $d\Omega = \frac{dA}{d^2}$ por haver perpendicularidade do raio luminoso com a placa, sendo d a distância desta à fonte, vem:

$$E = \frac{I}{d^2}$$

Aplicando a expressão às duas fontes luminosas representadas na Fig. 11-1 e igualando as respectivas iluminâncias na placa translúcida E_1 e E_0 obtém-se:

$$E_1 = \frac{I_1}{d_1^2} = E_0 = \frac{I_0}{d_0^2} \quad (11.5)$$

$$I_1 = I_0 \frac{d_1^2}{d_0^2} \quad (11.6)$$

Com esta expressão, conhecida a intensidade de uma das fontes e as distâncias à placa que produzem igual iluminância, pode calcular-se a intensidade da outra fonte.

O fotômetro de LUMMER BRODHUM (Fig. 11.2) representa um aperfeiçoamento do fotômetro anterior, em especial na forma de comparar as iluminâncias. A placa já não é translúcida mas sim opaca e coberta em ambas as faces por uma pintura branca e difusa, sendo cada face iluminada por uma das fontes a comparar.

As duas faces iluminadas, uma pela fonte F_1 e outra pela fonte F_2 , são vistas em simultâneo pelo observador, mercê do conjunto de dois espelhos e de dois prismas rectos, unidos - mas não em toda a extensão - pelas faces correspondentes às hipotenusas das secções transversais.

Desses dois prismas, um deles ou apresenta uma ligeira curvatura na face de encosto ou estrias que não permitem o encosto total da face, Tanto num caso como noutro a intenção é permitir a passagem tanto de raios reflectidos como de raios refractados, isto é, de raios provenientes tanto de uma fonte como da outra.

Em qualquer destes dois tipos de fotómetro há uma intervenção directa do observador, com toda a dose de subjectividade que lhe é inerente; isso levou a que se pensasse na substituição do observador humano e se caminhasse no sentido de uma avaliação por meio de receptores baseados em fenómenos físicos, normalmente eléctricos, abandonando-se assim a *fotometria visual* e substituindo-a pela *fotometria física*. São assim utilizados os chamados *fotómetros físicos*, em oposição aos *fotómetros visuais* para os quais deixa de ser necessária a observação simultânea das duas fontes luminosas, podendo ser medidas em separado, com distâncias ao receptor iguais ou diferentes, bastando para tal que o receptor tenha uma boa linearidade de resposta.

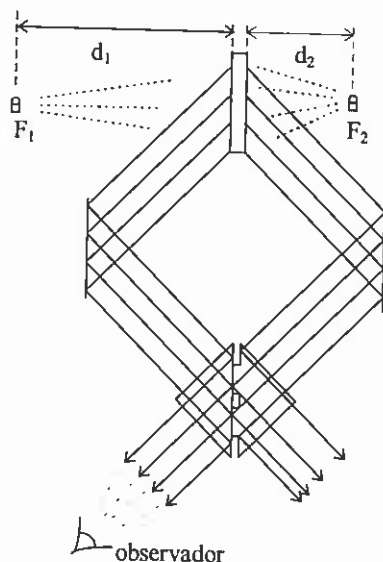


Fig. 11-2 Fotómetro de Lummer Brodhum

11.6.2 - GONIOFOTÓMETROS

Os goniofotómetros são tipos especiais de fotómetros que permitem fazer a rotação da fonte, relativamente ao fotómetro, em torno de um eixo escolhido, de modo a poder conhecer-se a repartição angular das características da fonte.

A medição do fluxo luminoso de uma lâmpada de incandescência é um exemplo de aplicação do goniofotómetro. Na Fig. 11-3 está representada uma lâmpada para a qual foram medidos com o goniofotómetro diversos valores da intensidade luminosa, em relação a outras tantas direcções, definidas pelo ângulo α que fazem com o eixo de simetria que passa pelo casquilho da lâmpada (Fig. 11-3 a).

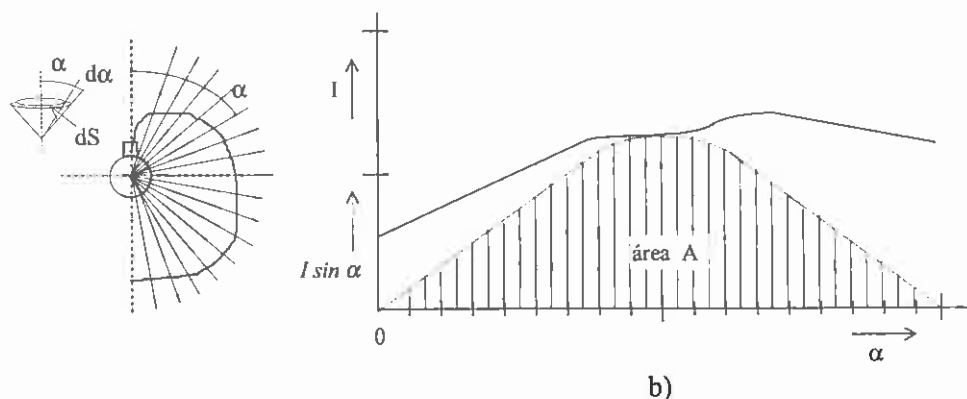


Fig. 11-3 Variação angular da intensidade luminosa de uma lâmpada de incandescência

A Fig. 11-3 b) mostra a curva de variação da intensidade I com o ângulo α e ainda uma outra linha, a tracejada, obtida da primeira multiplicando as suas ordenadas por $\sin \alpha$. A área A compreendida entre esta última curva e o eixo das abcissas, multiplicada por 2π representa o fluxo pretendido

De facto o fluxo é

$$\phi = \int_{\Omega=0}^{\Omega=2\pi} d\phi$$

sendo $d\phi$ o fluxo luminoso correspondente ao ângulo sólido $d\Omega$ compreendido entre os dois paralelos definidos pelos ângulos α e $\alpha + d\alpha$.

$$d\phi = I d\Omega \quad d\Omega = \frac{dS}{R^2} = \frac{2\pi R \sin \alpha R d\alpha}{R^2} = 2\pi \sin \alpha d\alpha$$

$$\phi = \int_{\alpha=0}^{\alpha=\pi} I 2\pi \sin \alpha d\alpha = 2\pi \int_{\alpha=0}^{\alpha=\pi} I \sin \alpha d\alpha = 2\pi A \quad (11.6)$$

sendo R o raio da superfície esférica a que pertence dS (Fig. 11-3 a).

Esta expressão permitiu, em anos passados, o cálculo gráfico, expedito, mas que actualmente está posto de lado.

11.6.3 - ESPECTROFOTÓMETROS

A comparação de grandezas luminosas provenientes de corpos incandescentes (filamentos), a temperaturas diferentes, se levada a cabo por meios visuais, não é problema simples; pelo menos os resultados apresentam sempre uma carga subjectiva. Concretamente, é o que acontece na comparação da intensidade luminosa da superfície da platina no ponto de solidificação, — que representava a candela até 1979 — com a do filamento de uma lâmpada incandescente, padrão secundário da mesma unidade; ou ainda

na comparação de lâmpadas de potências diferentes, e portanto com filamentos a temperaturas diferentes. Uma resposta foi, em tempo, dada pela interposição de um filtro azul numa das radiações a comparar, para as tornar mais próximas, do ponto de vista cromático. O uso do espectrofotómetro constitui uma solução preferível; ainda que muito trabalhosa e demorada, mas dando origem a erros bastante menores.

Segundo a definição do VEI o espectrofotómetro é *um aparelho destinado à medição de grandezas energéticas espectrais*. De facto o espectrofotómetro decompõe as duas radiações a comparar num grande número de faixas espectrais que são comparadas duas a duas, uma de cada fonte, mas comparadas em termos energéticos, havendo depois de entrar em linha de conta, para cada faixa com o respectivo valor da *eficiência luminosa espectral* $V(\lambda)$ Neste dispositivo o erro de comparação é de cerca de 0,3% enquanto a comparação fotométrica, com o emprego de filtros coloridos, não permite um erro inferior a 1% ou 2%.

11.6.4 - RECEPTORES DE RADIAÇÃO VISÍVEL

O aproveitamento do fenómeno físico da emissão fotoeléctrica – que consiste na libertação, sob a acção de radiações, de electrões da superfície de metais e de semicondutores e na consequente produção de correntes eléctricas – permite construir receptores de radiação de sensibilidade elevada, face à sensibilidade obtida na comparação de iluminâncias pela via visual. Além da sensibilidade, há outros factores importantes na qualificação de um receptor: a linearidade na resposta, e a gama de comprimentos de onda de funcionamento. Esta última está ligada à escolha do metal ou do semiconductor a utilizar.

O receptor é normalmente constituído por um tubo metálico que tem disposto, a partir da extremidade de entrada da radiação, um porta-filtros, um diafragma e um sistema de lentes para fazer convergir a radiação sobre o elemento sensível propriamente dito. Este está contido numa ampola hermética, sob vácuo, e é constituído por um cátodo revestido por céσιο, depositado sobre prata oxidada ou antimónio e envolvido por um ânodo, entre os quais é estabelecida uma tensão eléctrica. A corrente resultante da libertação de electrões no cátodo, pela radiação, é depois amplificada e medida.

Este tipo de receptor, que foi usado no BIPM, dispensa a presença simultânea das duas radiações a comparar, bastando fazer duas medições consecutivas, nas mesmas condições.

A presença do porta-filtros torna-se necessária quando se comparam duas radiações que embora provenientes, por exemplo, de lâmpadas de incandescência, possam ter composições espectrais, isto é, cores, um pouco diferentes. Com a interposição do filtro procura-se aproximar a sensibilidade espectral da célula, com a função $V(\lambda)$, para um melhor aproveitamento da linearidade da célula.

Outros receptores utilizam fotodíodos de silício, os quais quando polarizados negativamente, se sujeitos à acção de uma radiação visível, produzem corrente proporcional ao fluxo recebido. Também neste caso se torna necessária a interposição de um filtro para aproximar a sensibilidade espectral do silício à da função $V(\lambda)$.

De utilização mais expedita é a célula de selénio, um receptor do tipo fotovoltaico que sob a acção da radiação visível produz, em circuito fechado, uma corrente aproximadamente proporcional ao fluxo recebido. Tem menor sensibilidade que os anteriores e a sua fraca linearidade de resposta limita a aplicação aos fotómetros de comparação de iluminâncias aproximadamente iguais.

De qualquer forma, os receptores físicos, seja qual for o seu tipo, passaram a desempenhar um papel importantíssimo, por terem contribuído para libertar a Fotometria de factores perturbadores, de natureza não só psicológica como até fisiológica, inerentes à acção do observador humano

11.6.5 - FILTROS

Na comparação de intensidades luminosas em radiações provenientes de fontes diferentes, ou seja, com *temperaturas de repartição* diferentes, tiveram aplicação, até 1979, os chamados *filtros azuis*. Antes de se justificar a presença destes filtros, convém esclarecer o que se entende por *temperatura de repartição*. Segundo o Vocabulário Electrotécnico Internacional, VEI, é a *temperatura do corpo negro para a qual as ordenadas da curva de repartição espectral da sua radiância são proporcionais, ou aproximadamente proporcionais, no domínio do visível, às ordenadas da curva de repartição da radiação considerada*. Isto é, as duas radiações têm a mesma ou quase a mesma, cromaticidade.

Como exemplos, de diversas temperaturas de repartição podem citar-se:

- superfície de platina em solidificação → 2045 K
- lâmpada de incandescência de 40 W → 2650 “
- “ “ “ “ 75 → 2900 “
- “ “ “ “ 100 → 3000 “

No pequeno número de laboratórios nacionais que possuíam o padrão de platina surgiram, logo de início, dificuldades na comparação da radiação da platina (2045 K) com o grupo das lâmpadas de incandescência com filamento de tungsténio, e daí o recurso expedito à interposição de um filtro azulado na radiação de temperatura mais baixa. Este tipo de filtro, a que já tem sido feita referência, foi aceite pelos laboratórios que possuíam o padrão primário e foi especialmente estudado para, quando interposto na radiação de 2045 K, a transformar na radiação de 2357 K. Quando interposto nesta última transforma-a na radiação de 2793 K. Estes dois últimos valores da temperatura de repartição são, por convenção, os escolhidos para as lâmpadas de incandescência representativas dos padrões de intensidade luminosa e de fluxo luminoso, respectivamente.

A necessidade dos filtros azuis vem já do tempo em que a Fotometria era exclusivamente visual e manteve-se ainda na Fotometria física para colmatar diferenças entre as características espectrais da célula receptora e as da vista humana média, ou seja, da função $V(\lambda)$. O coeficiente de transmissão destes filtros era cuidadosamente medido em

toda a gama visível, a intervalos de 10 nm, e entrava, juntamente com a função $V(\lambda)$, na avaliação relativa de intensidades luminosas consideradas aparentemente iguais.

11.6.6 - LUMENÓMETROS

Os lumenómetros, que em rigor se deveriam chamar *fluxómetros*, são instrumentos destinados a avaliar fluxos luminosos, através de uma só comparação. São normalmente constituídos por uma superfície esférica interior coberta por uma camada difusora, geralmente branca ($Ba SO_4$), não selectiva à cor e com um factor de reflexão elevado.

A superfície esférica é provida de uma pequena janela circular, através da qual se pode, por meio de um espelho, medir a iluminância da superfície interior, a qual é proporcional ao fluxo luminoso da lâmpada colocada no centro da superfície esférica (Fig. 11-4).

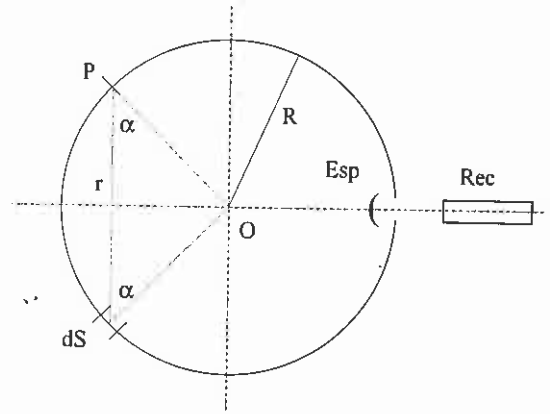


Fig. 11-4 Disposição esquemática duma esfera integradora

Na figura representam:

R - o raio da superfície esférica

P - um ponto qualquer da superfície interior em relação ao qual se calcula a iluminância

E - a iluminância da superfície interior

Rec - receptor físico (eléctrico) de radiação visível

Esp - espelho côncavo que permite medir a iluminância interior da superfície esférica

A proporcionalidade já referida, entre o fluxo ϕ da lâmpada e a iluminância E , suposta constante em toda a superfície esférica, demonstra-se facilmente. A iluminância de um ponto qualquer P da superfície resulta da soma de muitas parcelas: a primeira provém da acção directa do fluxo ϕ da lâmpada sobre a superfície esférica; a segunda da acção do fluxo depois de reflectido $\phi_1 = \rho \phi$, sendo $\rho < 1$ o factor de reflexão difusa; a terceira parcela resulta da segunda reflexão e vale $\phi_2 = \rho^2 \phi$ e assim sucessivamente; a cada parcela de fluxo luminoso corresponde uma parcela na iluminância E da superfície interior A .

Temos pois:

$$E_0 = \phi/A$$

$$E_1 = \rho \phi/A$$

$$E_2 = \rho^2 \phi/A$$

$$\begin{aligned}
 & \dots\dots\dots \\
 & \frac{E_i = \rho^i \phi / A}{E = E_0 + E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_i + \dots} \\
 & E = \phi / A (1 + \rho + \rho^2 + \rho^3 + \dots + \rho^i + \dots) \\
 & E = \frac{\phi}{4\pi R^2} \frac{1}{1 - \rho} \qquad (11.7)
 \end{aligned}$$

A expressão mostra que há proporcionalidade entre o fluxo da lâmpada, colocada no centro da esfera, e a iluminância da parede interior.

Este tipo de lumenómetros, conhecidos pelas designações de *esfera integradora* ou *esfera de Ulbricht*, não é propriamente um instrumento de medida absoluta, mas permite fazer a comparação entre os fluxos de duas lâmpadas, uma das quais poderá ser um padrão de fluxo.

11.7 - ACÇÃO DOS LABORATÓRIOS NACIONAIS

No que respeita à Fotometria, a acção de alguns dos laboratórios nacionais (E.U.A., França e Grã-Bretanha) foi importantíssima, especialmente no que toca à conservação dos primeiros padrões de intensidade luminosa. Desde 1909 que os laboratórios dos três países referidos convencionaram entre si exprimir e conservar a *vela internacional*, sob a forma de lâmpadas de incandescência com filamento de carvão. Entretanto a Alemanha continuava a reger-se pelo padrão Hefnner, já referido, e que valia cerca de 90% da *vela internacional*.

A unificação da unidade de intensidade luminosa só aconteceu por volta de 1933, quando começou a ter aceitação internacional uma unidade baseada na luminância da platina em fusão, que veio a ser consagrada internacionalmente na reunião da CIPM de 1946. Para essa aceitação também contribuiu a criação do laboratório de Fotometria do BIPM cuja construção fora autorizada em 1937 mas que a conflagração mundial atrasou.

11.7.1 - O PADRÃO DE PLATINA

O dispositivo de suporte da platina à temperatura de solidificação consiste, em geral, num cadinho cerâmico de forma cilíndrica, com cerca de cinco centímetros de diâmetro exterior e com oito a dez centímetros de altura. No seu interior, e disposto de forma concêntrica, há um tubo de óxido de tório, com o diâmetro interno de aproximadamente dois milímetros e meio. Este tubo, que é aberto na parte superior, está rodeado de óxido de tório em pó que preenche o restante espaço interno do cadinho, e tem no seu interior um cilindro de platina que, ao atingir a temperatura de solidificação, constitui o elemento radiante do padrão de intensidade luminosa.

O esquema de comparação do padrão com outra fonte luminosa, por exemplo com uma lâmpada de incandescência, tem o seguinte aspecto:

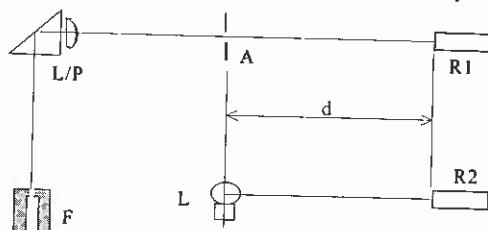


Fig. 11-5 Comparação da intensidade dum a lâmpada com a do padrão de platina

Na figura são:

F - fonte de irradiação, de platina

L/P - conjunto de prisma e lente convergente

A - diafragma, com a área A

L - lâmpada de incandescência, a comparar com a fonte padrão

R_1 e R_2 - receptores físicos de radiação

d - distância da lâmpada e do diafragma, aos respectivos receptores

Para comparar as intensidades luminosas do padrão e da lâmpada é preciso começar por calcular as iluminâncias E_1 e E_2 produzidas à entrada dos receptores R_1 e R_2 , respectivamente.

Para calcular E_1 é útil lançar mão da disposição esquemática representada na figura que se segue,

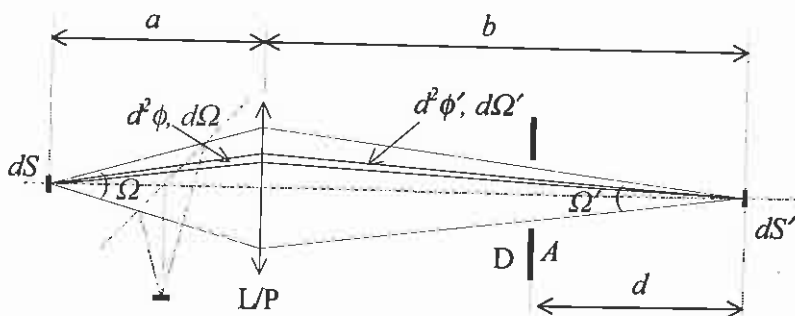


Fig. 11-6 Esquema simplificado da comparação

na qual são:

- dS - elemento de superfície irradiante do padrão de platina, ,
- dS' - elemento de superfície à entrada do receptor R_1 ,
- L/P - conjunto de lente convergente e prisma recto,
- D - diafragma regulável, de área de abertura A ,
- Ω - ângulo sólido que contém o fluxo luminoso emitido,
- Ω' - ângulo sólido que limita o fluxo luminoso que entra no receptor R_2 ,
- $d\phi$ - fluxo luminoso elementar entre a fonte e o conjunto L/P,
- $d\phi'$ - fluxo luminoso elementar que entra no receptor e passa pelo diafragma.

No esquema não se representou o desvio angular recto a que o prisma força a radiação, por não ter interesse para o cálculo; rebate-se esse troço de modo a ficar alinhado com o troço representado à direita; no entanto faz-se intervir no cálculo o coeficiente de transmissão τ do conjunto lente-prisma, definido por:

$$\tau = \frac{d\phi'}{d\phi} \leq 1$$

Por definição, a luminância L de uma fonte é:
$$L = \frac{d^2\phi}{dS d\Omega \cos\theta}$$

sendo θ o ângulo entre a normal à superfície emissora e a direcção de emissão considerada. Como o ângulo sólido em que se situa o fluxo, nestes dispositivos, tem sempre uma abertura muito pequena e como a radiação é normal à superfície emissora, pode admitir-se que $\alpha \approx 0$.

Aplicando a expressão de L ao caso concreto da fonte padrão, de luminância L_0 , temos:

$$L_0 = \frac{d^2\phi}{d\Omega dS} = \frac{d\left(\frac{d\phi}{dS}\right)}{d\Omega} \quad \text{ou} \quad \frac{d\phi}{dS} = L_0 \int d\Omega = L_0 \Omega$$

ou ainda
$$d\phi = L_0 \Omega dS \quad (11.8)$$

O fluxo luminoso $d\phi$ depois de ter atravessado o conjunto L/P torna-se $d\phi'$, tal que,

$$d\phi' = \tau d\phi \quad \text{ou} \quad d\phi' = \tau L_0 \Omega dS$$

Por outro lado, as fórmulas da óptica geométrica para as lentes pouco espessas, estabelecem que um objecto, situado no eixo óptico de uma lente convergente, tem imagem real que se situa também a uma distância da lente superior à distância focal. Nesse caso a ampliação (em valor absoluto), ou seja, o quociente das dimensões lineares da imagem pelas dimensões correspondentes do objecto, é:

$$m = \frac{a}{b}$$

sendo a e b as distâncias da imagem e do objecto, respectivamente, ao plano da lente. Se se pretender uma relação entre áreas, uma na imagem outra no objecto bastará elevar ao quadrado a relação linear. No caso em estudo será:

$$\frac{dS'}{dS} = \frac{b^2}{a^2} \quad \text{ou} \quad dS = dS' \frac{a^2}{b^2} \quad \text{e substituindo}$$

$$d\phi' = \tau L_0 \frac{a^2}{b^2} dS'$$

Na Fig. 11-6, considerando o plano médio da lente como área comum aos dois ângulos sólidos Ω e Ω' , pode escrever-se:

$$\Omega a^2 = \Omega' b^2 \quad \text{ou} \quad \Omega = \Omega' \frac{b^2}{a^2} \quad \text{e fica}$$

$$d\phi' = \tau L_0 \Omega' dS'$$

O ângulo Ω' pode ainda ser definido à custa da área do diafragma A e da distância d ao receptor.

$$\Omega' = \frac{A}{d^2} \quad \text{ou} \quad d\phi' = \tau L_0 \frac{A}{d^2} dS'$$

A iluminância à entrada do receptor R_1 é

$$E_1 = \frac{d\phi'}{dS'} = \frac{\tau L_0 A}{d^2} \quad (11.9)$$

A iluminância no receptor R_2 é $E_2 = \frac{I}{d^2}$ sendo I a intensidade luminosa, na direcção considerada, da lâmpada a comparar. Nos receptores R_1 e R_2 , que são idênticos, — podendo até ser um único que se desloca —, as correntes i_1 e i_2 resultam das iluminâncias E_1 e E_2 , respectivamente. Supondo que há linearidade de resposta, a relação entre correntes e iluminâncias é:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{E_1}{E_2} \quad \text{ou} \quad I = r L_0 A \frac{i_2}{i_1} \quad (11.10)$$

Esta expressão permite conhecer a intensidade luminosa da lâmpada, com base no valor de L_0 estabelecido quando da definição da candela (1946), de $L_0 = 600\,000 \text{ cd m}^{-2}$.

11.8 - ACÇÃO DO BIPM

O BIPM, talvez por ter alcançado um pouco tardiamente a possibilidade de executar trabalhos de Fotometria, - ao contrário do que aconteceu na medição de grandezas de outras espécies - o BIPM terá reservado para si próprio, neste campo, um papel um tanto ou quanto lateral. De facto, foram alguns dos laboratórios nacionais mais importantes, que em 1909 tomaram o encargo de definir a *vela internacional* e de a conservar na forma de lâmpadas - primeiro com filamento de carvão e mais tarde com filamento de tungsténio - e que posteriormente se encarregaram de instalar e manter a unidade baseada na irradiação do corpo negro (platina). O BIPM ficou, de início, apenas com a função de comparar entre si, periodicamente, as lâmpadas padrão (de intensidade e de fluxo) dos principais laboratórios nacionais.

As comparações internacionais dos padrões nacionais de intensidade e de fluxo, realizaram-se no BIPM nos anos de 1948, 1952, 1956, 1961 e 1969, sobre lâmpadas calibradas por cada um dos laboratórios nacionais e enviadas ao BIPM. As lâmpadas enviadas para a comparação de 1952 traziam valores atribuídos pelos laboratórios nacionais de onde provinham, foram inter-comparadas no BIPM e de novo aferidas. Como resultado dessa aferição foram-lhes atribuídos novos valores, de modo a respeitarem as diferenças entre si encontradas no BIPM e de, ao mesmo tempo, conservarem no seu todo, uma média de valores igual à média dos valores que traziam à chegada. Com base nesta comparação o BIPM calibrou também as suas próprias lâmpadas padrão as quais mostraram uma estabilidade notável, comprovada por ocasião das comparações internacionais seguintes.

Só depois de 1979, com a nova definição da candela, o BIPM abandonou o padrão representado pelas lâmpadas e realizou a sua própria candela, por meio de medições espectro-radiométricas, com fotómetros calibrados no NPL, fontes monocromáticas e detectores de silício, preferindo assim a radiometria baseada nos detectores, em detrimento da fotometria.

As lâmpadas padrão eram principalmente de dois tipos: padrões de intensidade luminosa e padrões de fluxo, trabalhando com temperaturas de repartição diferentes. Os filamentos das lâmpadas de intensidade trabalham a 2045 K e a 2357 K, havendo ainda padrões que trabalham a 2859 K e que são especialmente destinados a servir de referência da temperatura de repartição através do conhecimento do seu espectro luminoso, enquanto que os filamentos dos padrões de fluxo trabalham a 2357 K ou a 2793 K. Antes de prosseguir há que fazer um reparo. Na época de 1937 era atribuída à solidificação da platina a temperatura de 2045 K, aliás valor muito próximo do actual de 2042 K, mas ao qual se continua a fazer referência por uma questão de hábito ou tradição; assim, o valor de 2045 K deve principalmente ser entendido como a temperatura do fenómeno físico de solidificação da platina.

A lâmpada de 2357 K (inicialmente 2360 K) é comparada com a de 2045 K num banco fotométrico, com a interposição do filtro azul já referido e a lâmpada de 2859 K é aferida a partir da primeira com a interposição do mesmo filtro. Esta última lâmpada destina-se a servir como padrão colorimétrico.

Nas lâmpadas que são padrão de fluxo a intensidade é medida em inúmeras direcções, através do goniofotómetro – já descrito em 11.6 Equipamento de Medida –, fazendo-se depois a integração em todo o espaço à volta.

A partir da comparação de 1952 pensou-se que uma das razões de algum desacordo entre os padrões dos diversos países pudesse estar ligada a diferenças na avaliação da temperatura de trabalho dos filamentos. Assim foram escolhidas seis temperaturas nominais, 2042 K, 2200 K, 2357 K, 2600 K, 2859 K e 3000 K e para cada uma destas temperaturas foram construídas várias lâmpadas pelos sete laboratórios nacionais mais importantes

Em 1963 procedeu-se no BIPM à medição e confronto das temperaturas de repartição encontradas, tomando como referência, para cada temperatura, a média dos valores previamente atribuídos. Os desvios maiores em relação à média, especialmente nas três últimas temperaturas aproximavam-se das duas dezenas de kelvins. Esta situação proporcionou mais um motivo para o abandono do padrão de platina.

Nas medições de 1969, embora os laboratórios nacionais admitissem um erro inferior a 0,3% na calibração das lâmpadas de tungsténio a partir da platina à temperatura de solidificação, houve desvios entre os valores nacionais da ordem de 0,8%. Isto mostrou a presença de erros sistemáticos importantes na realização do corpo negro, e o resultado das investigações então levadas a cabo para esclarecimento da situação, de certo que contribuiu para a substituição do padrão de platina, o que veio a acontecer em 1979 na 16ª CGPM.

11.9 - A CANDELA DE 1979

Razões já apontadas e outras a referir mais adiante, levaram a que na 16ª CGPM em 1979, fosse aprovada nova definição para a candela, mantendo-se todavia o valor da unidade. Assim, a candela passou a ser definida como *a intensidade luminosa, numa direcção dada, de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540×10^{12} Hz e cuja intensidade nessa direcção é de $1/683 \text{ W.sr}^{-1}$.*

11.9.1 - RAZÕES DA MUDANÇA

Na nova definição desapareceu a referência ao corpo negro levado à temperatura de solidificação da platina, a qual, na verdade, não era um valor único mas uma faixa de valores, se bem que estreita; o que originava, no cálculo do importante parâmetro *eficácia luminosa espectral máxima* K_m valores diferentes, consoante a temperatura atribuída ao referido fenómeno. Na determinação experimental persistia à mesma a dificuldade de determinar o momento da solidificação.

Efectivamente, na alteração havida constata-se a intenção de manter o valor da candela. É disso prova a escolha do valor de $1/683 \text{ W.sr}^{-1}$ para a intensidade radiante referida na definição, o qual é baseado no valor da eficácia luminosa espectral máxima

$Km=683 \text{ lm W}^{-1}$, que em 1977 foi escolhido por consenso, após experiências levadas a cabo por diversos laboratórios nacionais, cujos resultados se situavam entre 681 e 684 lm W^{-1} . Por outro lado à frequência também referida corresponde, para o vazio, o comprimento de onda $\lambda \cong 0,555 \mu\text{m}$, para o qual é máxima $-V(\lambda)=1-$ a sensibilidade visual humana (visão fotópica) ou melhor dizendo, a sensibilidade do *observador de referência CIE*. Consegue-se ainda tornar a definição independente do meio em que se situa a radiação, uma vez que se refere a frequência e não o comprimento de onda, que depende do meio.

Até 1979 a unidade de intensidade luminosa era expressa em termos da comparação de sensações luminosas, daí em diante passou a sê-lo em termos puramente energéticos.

Não contando com as experiências mal sucedidas (Violle) nos finais do século XIX, a intenção efectiva de definir a candela na base da solidificação da platina, teve início por volta de 1930 e culminou com a aceitação internacional em 1948. Nessa época a comparação era visual e é compreensível que se fosse escolher um padrão com uma distribuição espectral próxima da das fontes luminosas mais usuais, as lâmpadas de incandescência. A diversidade actual de fontes luminosas, tais como lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de vapores metálicos, televisão a cores, fotografia, etc., obrigam a ter em consideração as mais variadas repartições espectrais, que obviamente exigem processos de comparação adequados. A nova definição, por ser baseada na intensidade da radiação, facilita os procedimentos, evita a acção interpretativa do observador e reduz a complexidade da vista humana a simples tabelas. Assim, a medição da potência radiante, com a intervenção de apenas os factores $V(\lambda)$ e Km , permite calcular de imediato a intensidade luminosa e, a partir dela, fluxos, iluminâncias e outras grandezas.

Para se avaliar a intensidade de uma radiação monocromática, mas de frequência diferente da que é mencionada na definição, basta medir a radiação em termos energéticos, multiplicar o valor obtido por Km e fazer a correcção cromática multiplicando pelo valor de $V(\lambda)$ correspondente a essa frequência. Se se tratar de uma radiação complexa o procedimento é idêntico, só que nesse caso haverá que decompor a radiação em elementos espectrais e multiplicar a potência de cada feixe elementar pelo valor correspondente de $V(\lambda)$, totalizar a radiação energética e multiplicar esse total por $Km = 683 \text{ lm.W}^{-1}$.

Um procedimento mais expedito, embora talvez de menos rigor, será construir um filtro com um factor de transmissibilidade proporcional à função $V(\lambda)$; a intensidade radiante que o atravessa, multiplicada por 683 e por uma constante do filtro, pode dar directamente a intensidade luminosa.

11.9.2 - RADIÓMETROS PRIMÁRIOS

Para a medição da intensidade radiante é usado como receptor primário, nos principais laboratórios nacionais e no BIPM, o radiómetro criogénico de substituição eléctrica.

Radiómetro Criogénico de Substituição Eléctrica

Este tipo de radiómetro é constituído basicamente por um alvo absorvente (do calor), em forma de cavidade, para o qual é dirigida a radiação a medir, originando-se uma elevação de temperatura do alvo. De seguida, a radiação é cortada e é aplicada uma corrente eléctrica num circuito embebido na própria cavidade, de forma a produzir a mesma elevação de temperatura. A potência medida no circuito eléctrico é igual ao fluxo radiante que atingiu o alvo.

Em geral à entrada do radiómetro existe um diafragma graduado que será mantido com a mesma abertura em ambas as situações para que as trocas de calor com o exterior, através dele, sejam iguais em ambos os casos.

O radiómetro é designado por “criogénico” porque a temperatura de funcionamento da cavidade é muito baixa, à volta de 6 K, obtida por refrigeração por hélio líquido. A essas temperaturas a condutividade térmica dos materiais é menor e o calor específico maior – por várias ordens de grandeza – do que às temperaturas ambientes e isso permite que as perdas térmicas sejam reduzidas para uma parte em 10^4 .

Até quase ao fim da década de noventa o receptor criogénico de substituição eléctrica foi o único geralmente aceite como receptor primário. No entanto este instrumento, sendo o mais preciso até agora utilizado para medir radiações, tem a sua medição baseada em suposições algo imprecisas. Isso impede que seja considerada como rigorosamente absoluta, ao contrário do que acontece com as medições de algumas unidades do Sistema Internacional, que repousam apenas sobre determinadas constantes universais.

Em Inglaterra, no NPL foi construído em 1998/1999 e estava em fase de ensaio um novo dispositivo criogénico designado ARD (Detector Absoluto de Radiação) cuja aferição inclui a medida da energia radiante proveniente de um corpo negro mantido à temperatura do ponto triplo da água. Baseia-se na lei de Stefan-Boltzmann

$$M_e = \sigma T^4$$

onde M_e é a potência total irradiada por metro quadrado de um corpo à temperatura T e σ a constante de Stefan Boltzmann, tal que :

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3}$$

sendo k a constante de Boltzmann, c a velocidade da luz no vazio e h a constante de Planck. Em termos práticos o novo dispositivo faz a medição prévia da radiância de um corpo negro à temperatura do ponto triplo da água, cujo valor pode ser também calculado. Isso permite estabelecer uma relação mais segura entre fluxos radiantes medidos pelo radiómetro de substituição eléctrica e as radiâncias das fontes.

11.9.3 - RADIÓMETROS SECUNDÁRIOS

Os fotodíodos de silício normalmente usados como detectores secundários de radiação luminosa são do tipo PIN, constituídos por uma base de silício n, uma camada de silício p difundida na face que recebe a radiação, tendo interposta entre ambas uma camada de Si puro (condução intrínseca - i), que corresponde à região de depleção. Naquela face é depositado um reticulado metálico constituindo o pólo positivo e na face oposta uma camada condutora, que forma o pólo negativo (Fig. 11-7).

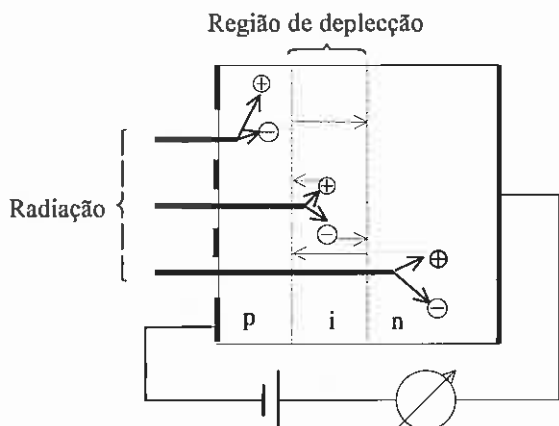


Fig. 11-7 Fotodíodo de silício

O díodo pode estar polarizado negativamente e a corrente que passa no aparelho de medida, praticamente nula na ausência de radiação, é depois proporcional à intensidade da radiação recebida. A polarização usual situa-se entre os 5V e os 50V.

Os fotodíodos de silício por vezes estão reunidos em grupos de três a seis unidades, formando detectores nos quais a radiação incidente sofre múltiplas reflexões dentro do conjunto, de forma a que apenas seja perdida uma fracção

mínima (trap detectors). Estes dispositivos são, nos laboratórios de referência, os padrões de transferência preferidos, estabelecendo a ligação entre os radiómetros primários – com os quais são calibrados por meio de lasers com vários comprimentos de onda dentro da banda apropriada – e os radiómetros ou fotómetros a aferir.

Características dos detectores

Eficiência quântica E.Q. (também representa por η)

Em termos gerais, significa a relação entre o número de eventos resultantes e o número de fótons incidentes que provocam esses eventos. No caso concreto de uma radiação monocromática incidindo sobre, por exemplo, um fotodíodo de silício, a E.Q. é o quociente entre o número de pares electrão-lacuna resultantes e o número de fótons incidentes, num dado espaço de tempo. Costuma ser expresso em termos de percentagem.

Se no díodo for originada a corrente i (foto-corrente), a quantidade de electricidade que passa num determinado tempo t é $i.t$. Expressa em número de electrões será $n_e = i.t/e$, sendo e a carga do electrão. No mesmo período, a potência ϕ_e (fluxo radiante) da radiação incidente corresponde a energia $\phi_e t$, que expressa em número de fótons, de energia $h\nu$, dá $n_f = \phi_e t/h\nu$, sendo h a constante de Planck e ν a frequência da radiação.

A eficiência quântica será pois:

$$\eta = \frac{n_c}{n_f} = \frac{t i h \nu}{e \phi_c t} = \frac{i}{\phi_c} \frac{h \nu}{e} = R \frac{h \nu}{e}$$

Resposta (Responsivity), R

O quociente da foto-corrente pela potência radiante designa-se por *resposta* $R = i/\phi_c$ do fotodíodo e exprime-se em amperes por watt. A resposta é função do comprimento de onda da radiação. No caso dos díodos de silício atinge um valor máximo, para um comprimento de onda λ entre $0,8 \mu\text{m}$ e $0,9 \mu\text{m}$, diminuindo gradualmente para valores menores do comprimento de onda e diminuindo mais bruscamente para valores maiores; garantindo-se assim uma zona de funcionamento razoavelmente linear entre $\lambda=400 \text{ nm}$ e $\lambda=700 \text{ nm}$, que corresponde à banda visível. A explicação deste comportamento reside nos factos de: para comprimentos de onda menores, a radiação ir sendo gradualmente absorvida antes de atingir a camada de depleção do fotodíodo e, no outro extremo, para comprimentos de onda maiores, a energia do fóton deixar de ser suficiente para ultrapassar a banda proibida do semiconductor.

Se η for conhecido em função de λ a explicitação do fluxo energético, para uma dada radiação monocromática, resulta da expressão anterior, substituindo a frequência pelo comprimento de onda:

$$\phi_c = \frac{h c}{e} \frac{i}{\lambda \eta} \quad (11.12)$$

Corrente no escuro (dark current), I_d

Como o próprio nome indica é a corrente no fotodíodo, na ausência de qualquer radiação. Como esta corrente é função da polarização, com a polarização zero fica fortemente reduzida. Por consequência reduz-se também o correspondente ruído e consegue-se assim uma sensibilidade elevada, que por vezes é aproveitada para a detecção de sinais fracos.

Capacidade C

Associada com a acção fotoeléctrica existe também uma capacidade própria do fotodíodo, com cuja influência é preciso contar quando se tratar de sequências de impulsos energéticos. A capacidade é fortemente diminuída com o aumento da polarização.

Aspectos Práticos

Os receptores são em geral formados por uma câmara de recepção da radiação e pelo fotodíodo, com os respectivos difusores. Por vezes a câmara está reunida ao

equipamento eléctrico auxiliar, que consta fundamentalmente de um amplificador que recolhe a corrente do díodo a amplifica e, por vezes, a transforma numa tensão de saída, proporcional, apta a ser utilizada em qualquer circuito de aplicação do radiómetro. Todo o conjunto está inserido numa caixa que muitas vezes contém também a fonte de alimentação (pilhas).

Num receptor “entra” radiação electromagnética e “sai” uma corrente. Nos fotodíodos de silício, esta corrente é linear, relativamente à radiação incidente, por um espaço dinâmico de 10 décadas. E para um receptor de uso geral é preciso que assim seja: num dia de Sol a iluminância chega aos 10^5 lux, um escritório bem iluminado precisa de 10^3 lux, a Lua cheia oferece 10^{-1} lux e uma noite nublada 10^{-4} lux. Isto exige um amplificador de corrente com o mesmo espaço dinâmico, o que não é fácil de conseguir; ou então dispositivos automáticos de mudança de gama de amplificação.

Uma inovação que muitos receptores apresentam é uma medição não contínua, mas com integração por períodos curtos, em geral de meio segundo. Isso permite melhorar a relação sinal/ruído do amplificador.

No que respeita à inserção do feixe luminoso, os receptores usuais dividem-se em três tipos: de *câmara difusora*, de *entrada com lente* e de *entrada para fibra óptica*.

No primeiro caso, o mais geralmente usado, o feixe entra, por uma abertura com um a dois centímetros de diâmetro, para uma câmara esférica parcialmente coberta com uma camada difusora, tal como na esfera de Ulbricht; só que aqui a cobertura é parcial e a dimensão da esfera é da ordem dos poucos centímetros. Na superfície esférica interior, além da abertura para entrada da radiação, há outra pequena abertura para acesso ao fotodíodo, através dos respectivos, diafragma e difusor. O radiómetro com câmara difusora é destinado à radiação em geral, dado não exigir que o feixe luminoso seja normal à entrada da câmara, permitindo, dentro dos limites de erro do próprio aparelho, que a incidência do feixe luminoso se afaste da normal de um ângulo entre vinte a trinta graus.

O receptor de *entrada com lente* destina-se a feixes perpendiculares ao plano do orifício de entrada; não tem câmara de difusão mas apenas uma lente que, através de um pequeno difusor, foca a radiação sobre o fotodíodo.

O receptor de *entrada para fibra óptica* é semelhante à anterior, não possui lente e está equipado com um acessório próprio para acolher a fibra óptica.

Os dois últimos tipos têm sensibilidades idênticas entre si, mas muito superiores à do tipo de câmara de difusão. Em compensação este tipo, por variação do diafragma e da área de difusão, tem várias sensibilidades e pode aceitar valores da radiação muito mais elevados que os tipos de entrada com lente ou para fibra óptica.

A propósito da utilização da fibra óptica e do seu enorme desenvolvimento no País durante a década de noventa, justifica-se uma referência a alguns organismos que se dedicaram à medição de características técnicas da fibra, nomeadamente: Instituto Electrotécnico Português (IEP), Portugal Telecom e CETO (Centro de Ciência e Tecnologia Ópticas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto). Este último organismo dedica-se também a filtros, espectrometria e colorimetria, indo ao encontro de necessidades técnicas sentidas, por exemplo, pela indústria vinícola.

Filtros

Já foi feita referência ao filtro de cor azulada que auxiliava a comparação visual de duas radiações com temperaturas de repartição próximas.

A tecnologia do fabrico de filtros está extraordinariamente desenvolvida e é possível fabricar filtros para as mais variadas funções, tais como: filtros de banda larga, com os extremos dos gráficos de transmissibilidade em pendente abrupta; filtros passa-baixo ou passa-alto, com a mesma característica; filtros de banda estreita para isolar, em termos práticos, uma só frequência, etc. Nesta última categoria é frequente um filtro previsto para, por exemplo 450 nm ter, a meio do pico, uma largura de banda de 10 ou 15 nm. Este tipo de resultado consegue-se com uma tecnologia que consiste em formar o filtro com sucessivas camadas metálicas (prata) muito finas, intercaladas com camadas de dieléctrico em espessura de meia onda. Por vezes cada camada é subdividida em duas, com dieléctricos diferentes e espessuras de quarto de onda.

Além deste tipo de filtros, ditos interferenciais, fabricam-se também filtros de absorção, formados por uma base de vidro a que se juntou um corante. O coeficiente de transmissão τ destes filtros é função da espessura d : $\tau = e^{-k d}$ (lei de Bouger), sendo k uma constante, função do material do filtro. Associando vários filtros com características diferentes conseguem-se outros tipos, como seja o filtro destinado a compensar a resposta do fotodíodo típico de silício, de modo a torná-la constante, na banda visível, com exclusão do infravermelho e do ultravioleta próximos, de modo a que o fotodíodo possa fornecer uma resposta proporcional à energia recebida na banda visível. Fabricam-se ainda filtros, chamados de $V(\lambda)$, que aplicados ao fotodíodo originam uma característica de resposta que contempla o produto da energia entrada pela função $V(\lambda)$, medindo assim o fluxo visível entrado no fotodíodo.

Outros tipos de radiómetros secundários

Como elementos sensíveis dos radiómetros secundários são usados, além dos pares termoelectrónicos já atrás referidos, e dos fotodíodos de silício, os bolómetros, em especial do tipo de negro de ouro. São aferidos previamente com radiómetros absolutos e por vezes estão dotados de filtros correctores cromáticos, como sejam, o filtro corrector da característica do próprio fotodíodo de silício e o filtro corrector de $V(\lambda)$, o que os torna aptos a fornecerem valores energéticos e também valores luminosos.

O bolómetro é um receptor que tem por elemento sensível uma folha metálica muito fina (de ouro), enegrecida, sobre a qual incide a radiação e cuja resistência eléctrica vai variar com a temperatura. Com as mesmas dimensões da folha de ouro referida, e como ela, protegida contra efeitos térmicos estranhos, existe outra folha, idêntica, mas não sujeita a qualquer radiação. Com as duas folhas de ouro e com mais duas resistências fixas, constitui-se uma ponte de Wheatstone. Para as pequenas variações de temperatura em causa, a corrente de desequilíbrio da ponte é proporcional à elevação de temperatura. Assim, partindo do estado de equilíbrio da ponte obtido na ausência de radiação, o

desequilíbrio causado pela acção da radiação, mede a própria radiação. Estes aparelhos permitem avaliar diferenças de temperatura da ordem do milionésimo de kelvin.

O negro de ouro que cobre as folhas é constituído por cloreto de ouro, $Au_2 Cl_4$, o qual devido à presença de ouro em dois estados diferentes de oxidação: ouro(I) e ouro(III) apresenta uma cor negra muito intensa. É um fenómeno de intensificação de cor, conhecido embora não completamente explicado, e que acontece em vários outros compostos como por exemplo na mica negra, a biotite. A produção de revestimentos negros – cada vez mais negros – é um problema de interesse geral em opto-electónica e continua a ser objecto de pesquisa. Muito recentemente (1998), em Inglaterra, no NPL (National Physical Laboratory) foi criado um novo revestimento negro, designado por “NIP Black”, no qual a radiação reflectida (por difusão), desde o ultravioleta ao infravermelho próximo, é igual ou inferior a 0,2% da radiação incidente.

Aferição de Receptores

Além dos radiómetros de laboratório, com precisão de 0,01%, são fabricados numerosos tipos de radiómetros secundários, portáteis, com precisão entre 1% e 4%, com alimentação por pilhas e que não necessitam de qualquer refrigeração.

Mediante o recurso a um receptor primário de energia radiante é possível aferir receptores secundários, com o auxílio dos quais pode ser caracterizada qualquer fonte de radiação, tanto sob o aspecto visível (intensidade luminosa) como sob o aspecto energético (fluxo radiante).

Intensidade Luminosa

Seja r a distância de uma fonte luminosa a um receptor, com área de entrada A e cuja resposta à intensidade luminosa I é representada pela corrente i . O fluxo visível que entra no receptor é:

$$\phi_v = \frac{I}{r^2} A \quad (11.13)$$

Por outro lado é também:

$$\phi_v = Km \int \frac{d\phi_e}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

sendo a integração estendida de modo a englobar os limites da banda visível (0,380 λ - 0,80 λ). A densidade espectral do fluxo energético, $d\phi_e/d\lambda$, pode representar-se:

$$\frac{d\phi_e}{d\lambda} = \phi_{e,\lambda} = \phi_{e,\lambda_0} \frac{\phi_{e,\lambda}}{\phi_{e,\lambda_0}} = \phi_{e,\lambda_0} S(\lambda)$$

sendo ϕ_{e,λ_0} o valor de $\phi_{e,\lambda}$ para $\lambda = \lambda_0 = 0,546 \mu\text{m}$, ou seja, para a abcissa correspondente ao valor máximo da função $V(\lambda)$. $S(\lambda)$ é a distribuição espectral relativa da função $\phi_{e,\lambda}$, tal que $S(\lambda_0) = 1$.

$$\text{Assim,} \quad \phi_v = Km \phi_{e,\lambda_0} \int V(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (11.14)$$

Igualando os segundos membros de (11.14) e (11.15) :

$$\frac{I A}{r^2} = Km \phi_{e,\lambda_0} \int V(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (11.15)$$

No que toca ao receptor, a sua resposta é representada por uma corrente i proporcional ao fluxo recebido e tal que:

$$i = \int \frac{di}{d\lambda} d\lambda = \int Sr(\lambda_0) Srr(\lambda) \phi_{e,\lambda} d\lambda$$

$$i = Sr(\lambda_0) \phi_{e,\lambda_0} \int Srr(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (11.16)$$

em que $Sr(\lambda_0)$ é a sensibilidade do receptor para o comprimento de onda λ_0 e $Srr(\lambda)$ a sensibilidade espectral relativa, tal que $Srr(\lambda_0) = 1$.

De (11.16):

$$\phi_{e,\lambda_0} = \frac{i}{Sr(\lambda_0) \int Srr(\lambda) S(\lambda) d\lambda} \quad (11.17)$$

Substituindo em (11.15):

$$\frac{I A}{r^2} = Km i \frac{\int V(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{Sr(\lambda_0) \int Srr(\lambda) S(\lambda) d\lambda}$$

$$I = \frac{K_m r^2 i}{A S_r(\lambda_0)} \frac{\int V(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int S_{rr}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}$$

e, se se fizer

$$\frac{\int V(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int S_{rr}(\lambda) S(\lambda) d\lambda} = \rho \quad (11.18)$$

$$I = \frac{K_m r^2 i}{A S_r(\lambda_0)} \rho \quad (11.19)$$

A expressão (11.18) mostra a enorme conveniência de se fazer preceder o receptor, do filtro designado como filtro $V(\lambda)$. Trata-se de um filtro cuja característica espectral, combinada com a do próprio receptor, faz com que se verifique a igualdade $S_{rr}(\lambda) = V(\lambda)$. Sendo assim, vem $\rho = 1$ e a expressão (11.19) pode ser usada, sem restrições, para medir intensidades luminosas, qualquer que seja $S(\lambda)$, ou melhor, qualquer que seja a complexidade da radiação. Isto é importante em tipos de radiação difíceis de exprimir analiticamente em função do comprimento de onda, como sejam por exemplo as radiações das lâmpadas fluorescentes e das de vapores metálicos.

No caso de lâmpadas de incandescência, para fins do cálculo numérico de ρ , pode usar-se para $S(\lambda)$ a sensibilidade espectral relativa da função de Planck tendo como parâmetro a temperatura do filamento, que pode ser previamente avaliada, por exemplo com um pirómetro óptico.

Tratando-se de uma radiação monocromática o cálculo simplifica-se e pode obter-se ρ substituindo $V(\lambda)$ e $S_{rr}(\lambda)$ pelos valores respectivos, correspondentes ao comprimento de onda escolhido, sem necessidade de qualquer integração. Se o valor de λ em questão coincidir com λ_0 então é $\rho = 1$. Uma experiência com radiação monocromática, de comprimento de onda λ_0 , com I conhecido, ou melhor, com o fluxo

energético $\phi_e = \frac{I A}{r^2 K_m}$ medido

por um radiómetro absoluto, permite calcular $S_r(\lambda_0)$ usando a expressão (11.19).

Quanto à sensibilidade espectral relativa do receptor, $S_{rr}(\lambda)$, ela pode ser medida por meio do esquema a seguir representado.

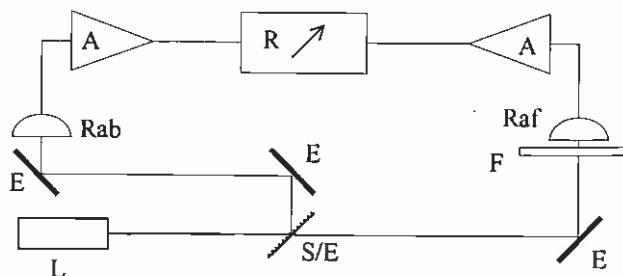


Fig. 11-8 Representação esquemática da determinação da sensibilidade espectral relativa de um receptor

Na Fig.11-8 são:

A - amplificadores	E - espelhos
R - medidor de relação (ratiometer)	L - fonte luminosa (laser)
Rab - radiómetro absoluto	S/E - semi-espelhado
Raf - radiómetro a aferir	F - filtro (eventual)

Com uma radiação de comprimento de onda $\lambda = \lambda_0 = 0,546 \mu\text{m}$ regulam-se os amplificadores de modo a que o medidor de relação (ratiometer) indique a relação 1. Sem alterar o ganho dos amplificadores escolhem-se outros comprimentos de onda, de forma a cobrir com várias frequências pontuais conhecidas, toda a banda visível. Para cada um desses comprimentos de onda, a leitura do medidor de relação dá o respectivo valor da sensibilidade espectral relativa do receptor ou do conjunto filtro-receptor, conforme o caso. Os lasers de He-Ne e de iões de Ar são suficientes para cobrir toda a banda visível e as suas frequências principais estão catalogadas, no entanto, para uma cobertura contínua, existem lasers que não estando sintonizados para um determinado comprimento de onda, contém no seu interior um prisma que, por rotação, selecciona uma radiação de cada vez. Além disso existem ainda os lasers de díodos, de comprimento de onda ajustável, para valores a partir de $0,6 \mu\text{m}$.

Outra fonte de radiação variável dentro da banda visível é o *monocromador*, um aparelho que contém uma fonte de luz branca, normalmente uma lâmpada com atmosfera de halogénio, da qual sai um feixe luminoso que incide sobre uma placa coberta por camada metálica fina. Na placa, – que antes de levar a camada metálica, é coberta por uma emulsão fotosensível – através de técnicas holográficas com radiações interferentes e subsequente acção química, fica gravada uma nanoestrutura constituída por sulcos paralelos muito finos, distantes entre si da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda do feixe; constituindo assim uma rede de difracção por reflexão. A reflexão difusa dá origem a um leque de radiações, – componentes da radiação inicial – que podem ser seleccionadas por rotação da placa.

Sendo embora uma tecnologia recente, é por esta via que, há milénios, a Natureza, sem recorrer a pigmentos, tingem de azuis e de roxos brilhantes as asas das borboletas de algumas espécies tropicais.

Fluxo Radiante

Algumas das expressões analíticas deduzidas para o cálculo da intensidade de uma fonte luminosa permitem também calcular o fluxo radiante que entra num receptor.

O fluxo radiante é:

$$\phi_e = \int \phi_{e,\lambda} d\lambda = \phi_{e,\lambda_0} \int S(\lambda) d\lambda \quad (11.20)$$

De (11.16):

$$\phi_{e,\lambda_0} = \frac{i}{Sr(\lambda_0) \int Srr(\lambda) S(\lambda) d\lambda} \quad \text{que substituído em (11.20):}$$

$$\phi_e = \frac{i}{Sr(\lambda_0) \int Srr(\lambda) S(\lambda) d\lambda} \int S(\lambda) d\lambda = \frac{i}{Sr(\lambda_0)} \rho' \quad (11.21)$$

$$\text{sendo } \rho' = \frac{\int S(\lambda) d\lambda}{\int S_{rr}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}$$

O conhecimento prévio de $S_r(\lambda_0)$ e de $S_{rr}(\lambda)$, para diversos valores de λ , permite calcular os valores respectivos do fluxo radiante, para radiações monocromáticas; ou, no caso de radiações complexas, para faixas estreitas de comprimentos de onda, entrando com valores daqueles parâmetros tomados a meio da faixa considerada. O fluxo energético total será a soma dos fluxos parciais. É óbvio que com excepção deste último integral fraccionado, todos os restantes integrais presentes no cálculo são integrais definidos, tendo como limites de integração os extremos da banda visível: $\lambda_1 = 380 \text{ nm}$ e $\lambda_2 = 800 \text{ nm}$.

Se, para um determinado receptor for $S_{rr}(\lambda) = 1$ será também $\rho' = 1$, isto é, se o receptor tiver resposta independente do comprimento de onda, o resultado da expressão (11.21) será independente da distribuição espectral $S(\lambda)$ da radiação. É o que sucede, em princípio, nos detectores de tipo térmico, tais como pares termoeléctricos, bolómetros ou de tipo piroeléctrico. Estes últimos são substâncias cristalinas que em face de alterações de temperatura desenvolvem espontaneamente polarização eléctrica entre faces com determinada orientação cristalina. São exemplos clássicos a turmalina, o tartarato de potássio e o sulfato de lítio.

11.9.4 - COMPARAÇÕES INTERNACIONAIS

As comparações internacionais, que até à década de oitenta eram realizadas no BIPM sobre lâmpadas viajantes, passaram depois dessa data a ser feitas quer com o recurso a detectores viajantes quer à comparação directa dos próprios detectores.

Embora a unidade fotométrica continue nos vários laboratórios nacionais a ser representada por lâmpadas de incandescência, os padrões de transferência, não só dentro dos laboratórios como nas comparações internacionais, são constituídos principalmente por detectores de silício em geral do tipo "trap detectors". Em 1998 foram realizados, tanto na Inglaterra como na Alemanha dispositivos constituídos por lâmpadas de incandescência, consideradas como padrões quer de intensidade quer de fluxo e cuja corrente era ajustada automaticamente pela corrente de resposta de um fotodiodo receptor.

No período compreendido entre 1997 e 1999 foi levada a efeito uma comparação internacional de radiómetros criogénicos, orientada pelo BIPM. Os laboratórios participantes foram divididos em três grupos: o primeiro constituídos por laboratório da Finlândia, E.U.A., U.K., Austrália e Suécia, o segundo por França, Alemanha, Espanha, Nova Zelândia e Dinamarca e o terceiro por Japão, Coreia, China, Holanda e Canadá. A comparação foi feita através de detectores de transferência, que foram calibrados por cada um dos componentes do primeiro grupo, depois pelos do segundo e, finalmente, pelos do terceiro, sendo os resultados considerados confidenciais, por indicação do Comité Consultivo de Fotometria e Radiometria (CCPR) até ao apuramento final de todos os resultados. Foram usados detectores de fotodiodo do tipo "trap-detectors".

BIBLIOGRAFIA

Como nos quatro primeiros capítulos o SI e sua história são tratados como um todo, a bibliografia de apoio correspondente é apresentada em conjunto; para os capítulos quinto e seguintes, por tratarem de matérias diferentes entre si, a bibliografia é separada por capítulos. Há porém duas obras importantes cuja informação está presente em todos os capítulos:

BIPM, *Le Bureau International de Poids et Mesures – 1875/1975*, 1975 [publicada quando da comemoração do centenário da assinatura da Convenção do Metro].

BIPM, *The International System of Units (SI)*, 7ª edição, 1998.

Alem das publicações constantes da lista que se segue, e sobretudo como suporte da informação relativa à última década, foram consultados os endereços da INTERNET dos laboratórios nacionais e internacionais mais importantes – a começar pelo próprio BIPM – e também de organismos europeus de relacionamento entre laboratórios (EUROMET, E.A.).

Capítulos 1 a 4:

BIPM, *The Consultative Committees*, 1998.

Born M. et al., *Física Atômica*, Ed. Fundação Caloust Gulbenkian 1969.

Boutarique A., *Précis de Physique*, Ed. Gaston Doin & C^{ie} Paris, 1933.

CIPM, *Procès-Verbaux des Seances*, actas das sessões de 1935, 1937 e 1952.

BIBLIOGRAFIA

Dampier W. C., *História da Ciência*, Ed "Inquérito", Limitada, Lisboa, 1945.

Eduarda Filipe et al., *Laboratório Central de Metrologia (IPQ). Situação Actual e Perspectivas Futuras*, em Qualirama nº58/59, 1999/2000.

Freitas R. de M., *O INETI e a Metrologia Eléctrica em Portugal*, em Qualirama nº58/59 1999/2000.

Ganot A., *Physique*, Ed. Librairie Scientifique de M. Marquis, Paris, 1870.

Ganot A., *Traité de Physique*, Ed. de Librairie Hachete, Paris 20ª edição, 1887

NPL, *Optical Radiation Calibration Services*, 2ª edição, 1998.

Pauling L., *General Chemistry*, 3ª Ed. de H. Freeman and Company, S. Francisco, 1970.

Tomé J. B., *Portugal e a Europa no Mercado Mundial da Qualidade*, 1991.

Capítulo 5

Boutarique A., *Précis de Physique*, Ed. Gaston Doin & C^{ie} Paris, 1933.

Cooking W.T., *Filling the Light-Radio Gap (Conferência Internacional de Microondas - Hamburgo)*, em Wireless World, Nov. de 1968.

Giacomo P., *Laser Frequency Measurements and the Redefinition of the Meter*, em IEEE, Trans. on Instrumentation and Measurement, vol IM-32, Março de 1983.

Giacomo P., *The New Definition of the Meter*, em Eur. Journ. of Physics, 4(1983).

White H.E., *Introduction to Atomic Spectra*, Ed. McGraw Hill, Kogakusha, 1934.

Capítulo 6

CIPM, *Actas da 21ª Reunião do CCE (actualmente CCEM)* de Junho de 1997.

Dampier W. C., *História da Ciência*, Ed "Inquérito", Limitada, Lisboa 1945.

Heslop R. B. et al., *Química Inorgânica*, Ed. Fundação Caloust Gulbenkian 1960.

Pauling L., *General Chemistry*, Ed de Gaston Doin & C^{ie}, Éditeurs Paris, 1970.

Capítulo 7

Baker R. H., *Astronomia*, Ed. Fundação Caloust Gulbenkian 1964.

Boorstin D. I., *Os Descobridores*, Ed. de Gradiva - Publicações Lda., 1983

Dampier W. C., *História da Ciência*, Ed "Inquérito", Limitada, Lisboa 1945.

Gould S. J., *O Polegar do Panda - Reflexões sobre História Natural*, Ed. de Gradiva - Publicações Lda

Lamberti C., *Astronomia* Ed.Orbis-Fabri, Barcelona,1992.

Lewandowsky W. et al., *GPS Time Transfer*, em Proc. IEEE , vol. 79 n° 7 , Jul. 1991.

Lewis L. L., *An Introduction to Frequency Standards*, em Proc. IEEE , vol. 79 n° 7 , Jul. 1991.

Mc Carty D. D., *Astronomic Time* , em Proc. IEEE , vol. 79 n° 7 , Jul. 1991.

Meyer G., *The Gregorian Calendar* , em Scientific American , Mai. 1982.

Mungall A. G., *A New Concept in Atomic Time Keeping* , em IEEE, Trans. on Instrum. and Measur. , vol IM-27 , Dez° 1978.

Percival D. B., *The U.S. Naval Observatory Clock Time Scales*, em IEEE, Trans. on Instr. and Measur., vol IM-27 , Dez° de 1978.

Petley B. W., *Time and Frequency in Fundamental Metrology*, em Proc. IEEE , vol. 79 n° 7 , Jul. 1991.

Quinn T. J., *The BIPM and the Accurate Measurement of Time*, em Proc. IEEE , vol. 79 n° 7 , Jul. 1991.

BIBLIOGRAFIA

Ramsey N. F., *The Past, Present and Future of Atomic Time and Frequency*, em Proc. IEEE , vol. 79 n° 7 , Jul. 1991.

Smith-Rose R.L., *Scientific Radio Conference*, em Wireless World , Jan° 1961.

Steele J. McA., *Standard Frequency Transmissions*, em Wireless World, Abr. 1962.

Steele J. McA., *Standard Frequency Transmissions*, em Wireless World, Set° 1967.

Stringer F. S., *Hyperbolic Radio Navigation Systems* , em Wireless World, Ag.° 1969.

White H.E., *Introduction to Atomic Spectra*, Ed. McGraw Hill, Kogakusha 1934.

Winkler G. M. R., *Synchronization and Relativity*, em Proc. IEEE , vol. 79 n° 7 , Jul. 1991.

Capítulo 8

Bishop D. J. et al., *Resistance in High-Temperature Superconductors*, em Scientific American, Fev. 1993.

Born M., *Física Atômica*, Ed. Fundação Caloust Gulbenkian, 1969.

CIPM, *Actas das reuniões do Comité Consultivo de Electricidade – CCE*; 1935, 1937, 1939, 1952, 1961, 1963, 1965, 1968, 1972 e 1975.

Clothier W. K., *The Calculable Standard of Capacitance*, em Metrologia n° 21 1985.

Cutkosky R. D. et al., *Standard Cell Enclosure with 20 μ K Stability*, em IEEE Trans. on Instr. and Measur. Vol. IM-23, N° 4, Nov. 1974.

Gallop I. C. et al., *Recent NPL Work on the AC Josephson Effect as a Voltage Standard*, em IEEE Trans. on Instr. and Measur. Vol. IM-21, N° 4, Nov. 1972.

Gerasimov Y., *Physical Chemistry*, Ed. Mir Publisher, Moskov, 1974.

Hamon B. V., *A 1-100 Ohms build up resistor for the calibration of Standard Resistors*, em Journ. of Scient. Instruments, vol 31, Dezº 1954.

Hartland A. et al., *Measurement System for the Determination of h/e^2 in Terms of the SI Ohm and the Maintained Ohm at the NPL*, em IEEE Trans. on Instr. and Measur. Vol. IM-34, nº2, Jun. 1985.

Hill J. J. et al., *A New Enclosure for 54 Standard Cells with 25 μ K Stability*, em IEEE Trans. on Instr. and Measur. Vol. IM-25, Nº 4, Dez. 1976.

Hayt Jr.W. H., *Electromagnetismo*, Ed. Livros Técnicos e Científicos, Editora, Rio de Janeiro, 1983.

Hirayama H. et al., *Standard Cells with Cd-Pb Amalgam Electrode*, em IEEE Trans. on Instr. and Measur. Vol. IM-21, nº 4 Nov. 1972.

Hirayama H. et al., *Combination Type Standard Cell with Low Temperature Coefficient Using Composite Amalgam Electrode Cells*, em IEEE Trans on Instr. and Measur. Vol. IM-25, Nº 4, Dez. 1976.

Josephson B. D., *Possible New Effects in Superconductive Tunneling*, em Physic Letters, Jul. 1962.

Pauw L. J., *Mesure de la Resistivité et du Coefficient de Hall sur des Plaquettes de Forme Quelconque*, em Revista Técnica Philips, Tomo 20, nº 8 1959.

Rose R. M. et al., *The Structure and Properties of Materials*, 1966.

Taylor B. N. et al., *On the Use of the AC Josephson Effect to Maintain Standards of Electromotive Force*, em Metrologia vol 3 nº4 , Outº 1967.

Taylor B. N., *Preparing for the New Volt and Ohm*, em IEEE Spectrum, Jul. 1989.

Thompson B. D., *A New Theorem in Electrostatics*, em Nature vol 177, Mai. 1956.

Von Klitzing K. et al., *Application of the Quantum Hall Effect in Metrology*, em Metrologia nº 21, 1985.

Witt T., *The Maintenance and Comparison of Standards of Electromotive Force at BIPM*, em IEEE Trans. on Instr. and Measur. Vol. IM-32, Mar. 1983.

Capítulo 9

Boutarique A., *Précis de Physique*, Ed de Gaston Doin & C^{ie}, Éditeurs Paris, 1933.

Dampier W. C., *História da Ciência*, Ed "Inquérito", Limitada, Lisboa 1945.

Ganot A., *Pysique*, , Ed. Librairie Scientifique de M. Marquis, Paris 1870.

Gorin G., *Mole and Chemical Amount: A Discussion of the Fundamental Measurement of Chemistry*, em *Journal of Chemical Education*, vol 71, N^o2.

Heslop R. B. et al., *Química Inorgânica*, Ed. Fundação Calouste Gulbenkian-Lisboa, 1960.

Pauling L., *General Chemistry*, Ed de Gaston Doin & C^{ie}, Éditeurs Paris, 1970.

Capítulo 10

Boutarique A., *Précis de Physique*, Ed de Gaston Doin & C^{ie}, Éditeurs Paris, 1933.

CIPM, *Actas das Reuniões do Comité Consultivo de Termometria*, de 1937 e de 1952.

Dampier W. C., *História da Ciência*, Ed. "Inquérito" Limitada - Lisboa, 1945.

Evans J. P., *Note on the Relation Between Resistance Thermometer, Thermocouple and Radiation Temperature Scales: 630-1064 °C*, em *Metrologia*, n^o13, 1977.

Ganot A., *Pysique*, , Ed. Librairie Scientifique de M. Marquis, Paris 1870.

Gerasimov Y., *Physical Chemistry*, Ed. Mir Publisher, Moskov 1974.

Grovini L. et al., *Extended List of Secondary Reference Points*, em *Metrologia*, n^o 13, 1977.

Mendelson K., *Em Demanda do Zero Absoluto*, Ed. Biblioteca Universitária Inova, 1968.

Preston Thomas H. et al., *The International Practical Temperature Scale*, em *Metrologia* nº 21, 1985.

Quinn T. J. et al., *Differences between the IPTS-68 and Thermodynamic Temperatures above 0 °C*, em *Metrologia* nº 13, 1977.

Quinn T. J. et al., *Evidence Relating to the Departures of the IPTS-68 from Thermodynamic Temperatures above 0 °C*, em *Metrologia* nº 13, 1977.

Reif F., *Fundamentals of Statistical and Thermal Physics*, Ed. McGraw Hill, Kogakusha, 1965.

Rose M. et al., *The Structure and Properties of Materials*, Ed. John Wiley & Sons, 1966.

Capítulo 11

Boutarique A., *Précis de Physique*, Ed de Gaston Doin & C^{ie}, Éditeurs Paris, 1933.

CIPM, *Actas das Reuniões do Comité Consultivo de Fotometria* de 1937, de 1952 e de 1983.

Graydon O., *Nature's Nanostructures Color Wings and Stones*, em *Opto & Laser Europe* nº 51, 1998.

IEC, *Publication 50 (45) – International Electrotechnical Vocabulary – Group 45: Lighting*, 1970.

Levialdi A., *Luminescência*, 1946.

NPL, *Optical Radiation Calibration Services*, 2ª edição, 1999.

Soares O. D. D., *Radiometria, Fotometria e Espectrocolorimetria*, em *Qualirama* nº 58/59, 1999/2000.



Nascido em 1921, Alcino Nunes Martins é Eng.^o Electrotécnico pelo Instituto Superior Técnico e desenvolveu a sua vida profissional essencialmente como engenheiro da Direcção Geral dos Serviços Eléctricos (DGSE, 1948-1978). No início da sua carreira esteve ligado à apreciação de projectos de linhas aéreas de alta tensão. Em 1954 ingressou no Laboratório Central Electrotécnico (da DGSE), instalado no IGT,

onde exerceu funções ligadas à metrologia básica das grandezas eléctricas, ao ensaio para determinação de características de materiais condutores, isolantes e magnéticos e à verificação da conformidade de diverso material eléctrico com Normas. Em 1978 passou para o LNETI, onde permaneceu até 1983, ano em que ingressou no quadro do ISEL, como Professor Auxiliar.

Como engenheiro consultor executou diversos trabalhos, nomeadamente, concebeu um cálculo gráfico da resistência mecânica de postes de betão armado - os Diagramas dos Postes de Betão, cuja consulta substituiu o cálculo mecânico dos postes. Também orientou a instalação das redes eléctricas de alta tensão da primeira fase do Metropolitano de Lisboa, tendo sido o responsável pela montagem e funcionamento do equipamento de medida e protecção da rede. Participou também em diversas comissões, nomeadamente, para a elaboração de um estudo para aplicação de energia geotérmica na ilha de S. Miguel, Açores, para o estudo e aplicação da energia solar em instalações públicas (75-77) e para tradução e adaptação do Vocabulário Electrotécnico Internacional (VEI), entre outras.

Em paralelo, exerceu funções docentes, tendo ingressado em 1967 no Instituto Industrial de Lisboa (IIL). Após 1974, e com a transformação do IIL no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), aí leccionou mais 17 anos, até à sua aposentação em 1991 como Professor Coordenador da Área Científica de Energia e Sistemas de Potência. Teve a seu cargo disciplinas tais como Electromagnetismo, Tecnologia de Materiais Eléctricos I, Tecnologia de Materiais Eléctricos II e Mecânica e Resistência de Materiais. Fez também parte, na qualidade de Representante dos futuros Cursos de Engenharia Electrotécnica, da Comissão de transformação do IIL em ISEL, à qual procedeu à separação do Curso de Mecânica e Electricidade, num Curso de Engenharia Mecânica e em dois Cursos de Engenharia Electrotécnica. Coube-lhe boa parte da responsabilidade neste processo e ainda na estruturação dos dois últimos Cursos que receberam os nomes de Energia e Sistemas de Potência (ESP) e de Electrónica e Telecomunicações (ET).

