

## 2

### Escala Internacional de Temperatura de 1990

A Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90) [1] foi adotada pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) em sua reunião de 1989, de acordo com os requisitos incorporados na 7ª Resolução da 18ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) de 1987. Esta escala substituiu a Escala Prática Internacional de Temperatura de 1968 (IPTS-68), sua edição emendada de 1975 e a Escala Provisória de Temperatura de 1976 (EPT-76) para a faixa de 0,5 K a 30 K, que eram as escalas vigentes à época de sua adoção.

Com a adoção dessa escala, o termopar Pt/PtRh deixou de ser utilizado como instrumento de interpolação na faixa de temperatura compreendida entre o ponto do antimônio (cerca de 630°C) e o ponto da prata (961,78°C), dando lugar ao termômetro de resistência de platina de alta temperatura (TRPAT), instrumento similar ao utilizado abaixo dessa faixa. Isso ocorreu devido à falta de estabilidade desse tipo de termopar, já facilmente detectada em virtude da evolução dos instrumentos de indicação utilizados para leituras de temperatura.

#### 2.1

##### Unidades de temperatura [1]

A unidade da grandeza física fundamental chamada temperatura termodinâmica, símbolo  $T$ , é o kelvin, símbolo  $K$ , definida como a fração  $1/273,16$  da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água.

Devido à maneira como foram definidas as escalas de temperaturas anteriores, continua válido expressar uma temperatura em termos de sua diferença para a temperatura do ponto do gelo, que é de 273,15 K. Uma temperatura termodinâmica expressa dessa forma, é conhecida como uma temperatura Celsius, símbolo  $t$ , definida por:

$$t / ^\circ C = T / K - 273,15$$

A unidade de temperatura Celsius é o grau Celsius, símbolo  $^\circ C$  que, por definição, é igual em módulo ao kelvin. Uma diferença de temperatura pode ser expressa igualmente em kelvins ou em graus Celsius.

A ITS-90 define tanto as Temperaturas Internacionais Kelvin, símbolo  $T_{90}$ , quanto as Temperaturas Internacionais Celsius, símbolo  $t_{90}$ . A relação entre  $T_{90}$  e

$t_{90}$  é a mesma que entre T e t, ou seja:

$$t_{90} / ^\circ C = T_{90} / K - 273,15$$

A unidade da grandeza física  $T_{90}$  é o kelvin e a unidade da grandeza física  $t_{90}$  é o grau Celsius, da mesma forma que para a temperatura termodinâmica T e a temperatura Celsius t.

## 2.2

### Princípios da Escala Internacional de Temperatura de 1990 [1]

A ITS-90 estende-se desde 0,65 K até a temperatura mais alta mensurável na prática em função da lei da radiação de Planck usando-se uma radiação monocromática. A ITS-90 compreende várias faixas e sub-faixas ao longo das quais as temperaturas T são definidas. Várias dessas faixas ou sub-faixas sobrepõem-se e, por isso, onde há sobreposição, existem diferentes definições de T, tendo essas o mesmo *status*. Nas medições de melhor exatidão, podem ser detectadas diferenças numéricas entre medições realizadas na mesma temperatura, porém, de acordo com diferentes definições. Analogamente, mesmo empregando-se uma definição, em uma temperatura entre dois pontos fixos de definição, dois instrumentos de interpolação aceitáveis podem apresentar valores numéricos de  $T_{90}$  perceptivelmente diferentes. Em todos os casos essas diferenças devem ser de importância prática desprezível e encontram-se em um nível mínimo de consistência.

A ITS-90 foi desenvolvida de forma que para qualquer valor de temperatura ao longo de sua extensão, o valor numérico de  $T_{90}$  seja uma aproximação rigorosa do valor de T, de acordo com as melhores estimativas da época em que a escala foi adotada. Em comparação com medições diretas de temperaturas termodinâmicas, as medições de  $T_{90}$  são realizadas mais facilmente, com melhor exatidão e maior reprodutibilidade.

## 2.3

### Definição da Escala Internacional de Temperatura de 1990 [1]

Entre 0,65 K e 5,0 K,  $T_{90}$  é definida em função das relações entre temperatura e pressão de vapor do  $^3\text{He}$  e  $^4\text{He}$ .

Entre 3,0 K e o ponto triplo do neônio (24,5561 K),  $T_{90}$  é definida através de

um termômetro de gás hélio calibrado em três temperaturas realizáveis experimentalmente, para os quais foram atribuídos valores numéricos (pontos fixos de definição), e da utilização de procedimentos de interpolação especificados.

Entre o ponto triplo do hidrogênio em equilíbrio (13,8033 K) e o ponto de solidificação da prata (961,78°C),  $T_{90}$  é definida através de termômetros de resistência de platina calibrados em conjuntos especificados de pontos fixos de definição e da utilização de procedimentos de interpolação especificados.

Acima do ponto de solidificação da prata (961,78°C),  $T_{90}$  é definida através de um ponto fixo de definição e da lei da radiação de Planck. A tabela 1 lista os pontos fixos de definição da ITS-90 [1].

Tabela 1 – Os pontos fixos de definição da ITS-90

Número	Temperatura $T_{90}$ (K)	Temperatura $t_{90}$ (°C)	Substância	Estado
1	3 a 5	-270,15 a -268,15	He	V
2	13,8033	-259,347	e-H <sub>2</sub>	T
3	~17	~-256,15	e-H <sub>2</sub> (ou He)	V (ou G)
4	~20,3	~-252,85	e-H <sub>2</sub> (ou He)	V (ou G)
5	24,5561	-248,5939	Ne	T
6	54,3584	-218,7916	O <sub>2</sub>	T
7	83,8058	-189,3442	Ar	T
8	234,3156	-38,8344	Hg	T
9	273,16	0,01	H <sub>2</sub> O	T
10	302,9146	29,7646	Ga	F
11	429,7485	156,5985	In	S
12	505,078	231,928	Sn	S
13	692,677	419,527	Zn	S
14	933,473	660,323	Al	S
15	1234,93	961,78	Ag	S
16	1337,33	1064,18	Au	S
17	1357,77	1084,62	Cu	S

Todas as substâncias, exceto He, são de composição isotópica natural.

e-H significa hidrogênio na concentração de equilíbrio das formas moleculares orto e para.

Os símbolos têm o seguinte significado:

V = ponto de pressão de vapor

T = ponto triplo (temperatura em que as fases sólida, líquida e gasosa permanecem em equilíbrio).

G = ponto de termômetro de gás

F, S = ponto de fusão, ponto de solidificação (temperatura, à pressão de 101325 Pa, na qual as fases sólida e líquida permanecem em equilíbrio).

## 2.4

### Escalas anteriores e suas diferenças para a ITS-90 [1]

São aqui apresentadas as escalas internacionais anteriores à ITS-90, em ordem cronológica, sendo destacadas as mudanças mais importantes ocorridas em

suas adoções, demonstrando assim a evolução histórica do tema.

#### **2.4.1 ITS-27**

A Escala Internacional de Temperatura de 1927 (ITS-27) foi adotada pela 7ª CGPM com o fim de sobrepujar as dificuldades práticas da realização direta das temperaturas termodinâmicas, por meio da termometria de gás e como uma substituta universalmente aceitável para as diferentes escalas nacionais de temperatura existentes. Foi formulada de modo a permitir a realização de medições de temperatura mais exatas e reprodutíveis, tão próximas das temperaturas termodinâmicas quanto possível, para a época. Entre o ponto de ebulição do oxigênio e o ponto de solidificação do ouro ela baseava-se em um certo número de temperaturas reprodutíveis, ou pontos fixos de definição, aos quais foram atribuídos valores numéricos, e dois instrumentos de interpolação. Cada um desses instrumentos era calibrado em alguns pontos fixos, o que produzia as constantes para a equação de interpolação na faixa de temperatura adequada. Para temperaturas até 660°C foi usado um termômetro de resistência de platina e acima dessa temperatura, até o ponto de solidificação do ouro, usou-se um termopar Pt/PtRh. Para a faixa acima deste ponto, as temperaturas foram definidas em termos da lei da radiação de Wien.

#### **2.4.2 ITS-48**

A Escala Internacional de Temperatura de 1948 (ITS-48) foi adotada pela 9ª CGPM. As mudanças relativas à ITS-27 foram:

- O limite inferior da faixa do termômetro de resistência foi alterado de  $-190^{\circ}\text{C}$  para o ponto de ebulição do oxigênio de  $-182,97^{\circ}\text{C}$  e a temperatura que delimitava o uso de cada tipo de termômetro (TRP e termopar) mudou de  $660^{\circ}\text{C}$  para o ponto de solidificação do antimônio, que é cerca de  $630^{\circ}\text{C}$ ;
- O ponto de solidificação da prata foi definido como sendo  $960,8^{\circ}\text{C}$  e não mais  $960,5^{\circ}\text{C}$ ;
- O ponto de solidificação do ouro substituiu o ponto de fusão do ouro ( $1063^{\circ}\text{C}$ , na época);

- A lei da radiação de Planck substituiu a lei da radiação de Wien;
- Foi atribuído o valor  $1,438 \times 10^{-2}$  m.K em vez de  $1,432 \times 10^{-2}$  m.K à segunda constante da radiação;
- As faixas permitidas para as constantes das equações de interpolação para o termômetro de resistência e para o termopar foram modificadas;
- A limitação a cerca de  $\lambda T$  para a pirometria óptica foi alterada devido à necessidade do uso da radiação visível.

### **2.4.3 IPTS-48 (edição emendada de 1960)**

A Escala Prática Internacional de Temperatura de 1948 (IPTS-48), edição emendada de 1960, foi adotada pela 11ª CGPM. A 10ª CGPM já tinha adotado o ponto triplo da água como o único ponto para definição do kelvin, unidade de temperatura termodinâmica. Além da introdução da palavra “Prática”, as modificações da IPTS-48 foram:

- O ponto triplo da água, definido como sendo  $0,01^{\circ}\text{C}$ , substituiu o ponto de fusão do gelo como ponto de calibração nesta faixa;
- O ponto de solidificação do zinco, definido como sendo  $419,505^{\circ}\text{C}$ , tornou-se uma alternativa preferida em relação ao ponto de ebulição do enxofre ( $444,6^{\circ}\text{C}$ ) como ponto de calibração;
- As faixas permitidas para as constantes das equações de interpolação do termômetro padrão de resistência e do termopar foram modificadas;
- A restrição à radiação visível na pirometria óptica foi removida.

### **2.4.4 IPTS-68**

Em 1968 o CIPM promulgou a Escala Prática Internacional de Temperatura de 1968 (IPTS-68), autorizada pela 13ª CGPM de 1967-1968. A IPTS-68 incorporou muitas mudanças em relação à IPTS-48. Estas incluíam mudanças numéricas, destinadas a torná-la mais intimamente de acordo com as temperaturas termodinâmicas, cujas diferenças eram suficientemente grandes para serem facilmente evidenciadas. Outras mudanças foram:

- O limite inferior da escala foi estendido até  $13,81$  K;

- Mesmo nas temperaturas mais baixas (0,5 K a 5,2 K) era recomendada a utilização de duas escalas de pressão de vapor de hélio;
- Foram introduzidos seis novos pontos fixos de definição: o ponto triplo do hidrogênio em equilíbrio (13,81 K), um ponto do hidrogênio em equilíbrio intermediário (17,042 K), o ponto de ebulição normal do hidrogênio em equilíbrio (20,28 K), o ponto de ebulição do neônio (27,102 K), o ponto triplo do oxigênio (54,361 K) e o ponto de solidificação do estanho (231,9681°C) que tornou-se uma alternativa permitida ao ponto de ebulição da água;
- O ponto de ebulição do enxofre foi retirado;
- Foram alterados os valores atribuídos a quatro pontos fixos: o ponto de ebulição do oxigênio (90,188 K), o ponto de solidificação do zinco (419,58°C), o ponto de solidificação da prata (961,93°C) e o ponto de solidificação do ouro (1064,43°C);
- As equações de interpolação para a faixa do termômetro de resistência tornaram-se muito mais complexas;
- O valor da segunda constante da radiação  $c_2$  tornou-se  $1,4388 \times 10^{-2}$  m.K;
- As faixas das constantes permitidas para as equações de interpolação do termômetro de resistência e do termopar foram novamente modificadas.

#### **2.4.5 IPTS-68 (edição emendada de 1975)**

A Escala Prática Internacional de Temperatura de 1968, edição emendada de 1975, foi adotada pela 15ª CGPM em 1975. Do mesmo modo que a IPTS-48 em relação à ITS-48, a IPTS-68 (75) não introduziu mudanças numéricas. A maioria das alterações textuais visou apenas fornecer esclarecimentos e simplificar o seu uso. As mudanças mais substanciais foram:

- O ponto do oxigênio foi definido como ponto de condensação em vez de ponto de ebulição;
- Foi introduzido o ponto triplo do argônio (83,798 K) como alternativa permitida ao ponto de condensação do oxigênio;
- Foram adotados novos valores da composição isotópica do neônio existentes na natureza;
- Foi rescindida a recomendação para usarem-se valores de T dados pelas

escalas de pressão de vapor do  $^4\text{He}$  (1958) e  $^3\text{He}$  (1962).

#### **2.4.6 EPT-76**

A Escala Provisória de Temperatura de 0,5 K a 30 K foi introduzida para atender a duas importantes necessidades que eram:

- Estabelecer meios de reduzir substancialmente os erros (relativos aos valores termodinâmicos correspondentes) abaixo de 27 K, cuja existência era conhecida na IPTS-68, e ao longo das faixas de temperatura das escalas de pressão de vapor do  $^4\text{He}$  e  $^3\text{He}$  de 1958 e 1962 respectivamente;
- Preencher o claro entre 5,2 K e 13,81 K no qual não havia nenhuma escala internacional prévia.

Outros objetivos no planejamento da EPT-76 eram que ela deveria ser termodinamicamente suave, que deveria ser contínua com a IPTS-68 em 27,1 K e que ela deveria concordar com a temperatura termodinâmica tanto quanto permitissem essas duas condições. Em contraste com a IPTS-68 e para assegurar a sua rápida adoção, foram adotados vários métodos de realização da EPT-76. Estes incluíam:

- Usar um instrumento de interpolação termodinâmico e um ou mais de 11 pontos de referência especificados;
- Adotar as diferenças relativas à IPTS-68 acima de 13,81 K;
- Adotar as diferenças em relação às escalas de pressão de vapor do hélio abaixo de 5 K;
- Adotar as diferenças em relação a certas escalas bem estabelecidas por um laboratório.

Devido à existência de uma certa falta de consistência interna, admitiu-se que pudessem ser introduzidas pequenas ambigüidades entre realizações. Contudo, considerou-se que as vantagens obtidas com a adoção da EPT-76 como uma escala de trabalho, até a época em que a IPTS-68 fosse revisada e estendida, tinham mais peso que as desvantagens.