Texto original produzido **H. Preston-Thomas,** Presidente do Comitê Consultivo de Termometria e Vice-Presidente do Comitê Internacional de Pesos e Medidas da Divisão de Física – Revista Metrologia N° 27, outubro 1990. Traduzido e adaptado por José Eustáquio da Silva – Analógica Instrumentação e Controle Ltda.

A Escala Internacional de Temperatura de 1990

A Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90) foi adotada pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas em 1989, a partir de pedido consubstanciado na Resolução 7 da XVIII Conferência Geral de Pesos e Medidas de 1987. A ITS-90 substitui a Escala Internacional Prática de Temperatura de 1968 (IPTS-68) e a Escala Provisória de Temperatura de 0,5 K a 30 K de 1976 (EPT-76).

1. UNIDADES DE TEMPERATURA

A unidade da grandeza física fundamental conhecida como temperatura termodinâmica, com símbolo T, é o kelvin, com símbolo K, definido como a fracção 1/273.16 da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água.

Da forma como as escalas de temperatura foram anteriormente definidas, continua a ser prática comum expressar temperaturas em termos da diferença em relação ao ponto do gelo, que é 273,15 K. A temperatura termodinâmica, T, expressa dessa maneira, é conhecida como temperatura Celsius, com símbolo t, definida pela expressão:

$$t_{90} / °C = T / K - 273{,}15 \quad \text{(Eq. 1)}$$

A unidade de temperatura Celsius é o grau Celsius, com símbolo ˚C, que por definição possui mesma magnitude do kelvin K. Diferenças de temperatura podem ser expressas em kelvins, ou graus Celsius.

A Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90) define tanto a Escala Internacional Kelvin, símbolo T_{90}, como a Escala Internacional Celsius, símbolo t_{90}. A relação entre T_{90} e t_{90} é a mesma que entre T e t, ou seja:

$$t_{90} / °C = T_{90} / K - 273{,}15 \quad \text{(Eq. 2)}$$

A unidade da grandeza física T_{90} é o kelvin, símbolo K, e a unidade da grandeza física t_{90} é o grau Celsius, o símbolo ˚C.

2. PRINCÍPIOS DA ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1990 (ITS-90)

A ITS-90 estende-se de 0,65 K até valores muito altos, mensuráveis com base na lei de radiação de Planck, usando radiação monocromática.

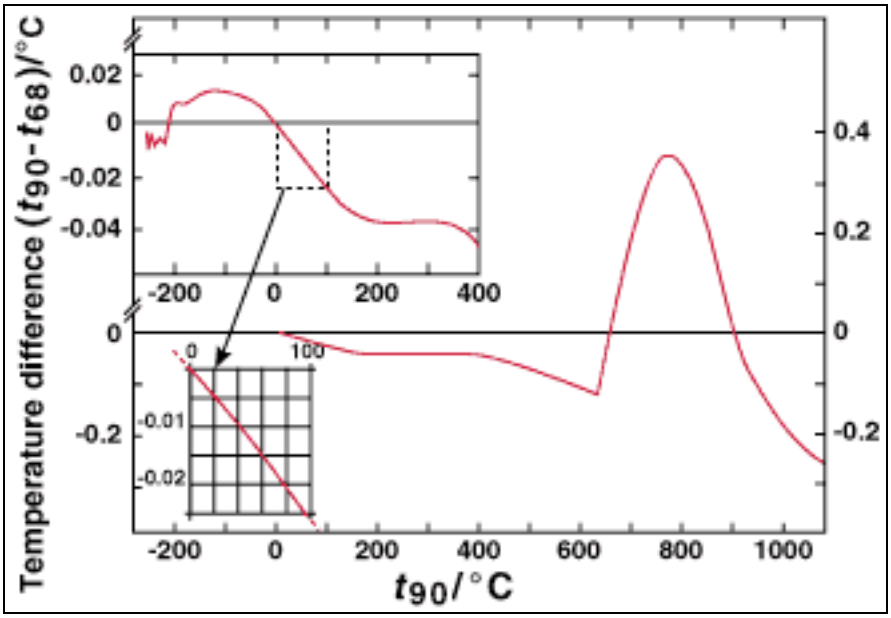
A ITS-90 compreende faixas e sub-faixas, ao longo das quais as temperaturas T_{90} são definidas. Várias dessas faixas e sub-faixas se sobrepõem, e, onde essas sobreposições ocorrem, há diferentes definições para T_{90} com mesmos “status”. Em medições feitas com altíssima precisão podem ser encontradas diferenças entre medições feitas numa mesma

temperatura, porem baseadas em diferentes definições. Similarmente, não obstante à aplicação de uma única definição para temperaturas compreendidas entre pontos fixos definidores, dois instrumentos de interpolação aceitos, (por exemplo, dois termômetros de resistência de platina) podem apresentar medidas com diferenças detectáveis. Felizmente, praticamente em todos os casos, essas diferenças são desprezíveis em termos práticos.

A ITS-90 foi construída de modo que, em todas as suas faixas, os valores de T_{90} são uma boa aproximação dos valores de t_{90}, considerando as melhores estimativas feitas à época em que a escala foi adotada. Por comparação direta com medições feitas em temperaturas termodinâmicas, as medidas em T_{90} são mais fáceis de serem feitas, são mais precisas e altamente reprodutíveis.

Existem diferenças numéricas significativas entre os valores de T_{90} e os correspondentes valores de T_{90} medidos na Escala Internacional Prática de Temperatura de 1968 (IPT-68). Essas diferenças são mostradas na Figura 1 e na Tabela 6. Similarmente, também havia diferenças entre a IPT-68 e a Escala Prática de Temperatura de 1948 (IPT-48), e entre esta e da Escala Internacional de Temperatura de 1927 (ITS-27). No Apêndice que acompanha este texto essas escalas foram tratadas. Para detalhes adicionais, veja também o texto com "Informações Complementares a ITS-90."

Figura 1. As diferenças (t_{90} - t_{68}) como uma função da temperatura Celsius T_{90}.



3. DEFINIÇÕES DA ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1990

Entre 0,65 K e 5,0 K, T_{90} é definida com base nas relações temperatura versus pressão de vapor do gás hélio ^{3}He e ^{4}He.

Entre 3,0 K e o ponto triplo do neon (24,5561 K), T_{90} é definida por meio de um termômetro de gás hélio, calibrado em três temperaturas experimentalmente realizáveis, com valores atribuídos por pontos fixos e utilizando procedimentos de interpolação especificados.

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

Acima do ponto de solidificação da prata (961,78 °C), T_{90} é definida em um ponto fixo e pela Lei de Radiação de Planck.

Os pontos fixos que definem a ITS-90 estão listadas na **Tabela 1**. A **Tabela 2** apresenta os efeitos decorrentes da pressão provocada pelas significativas profundidades de imersão dos sensores nos pontos fixos sobre a temperatura e por outras causas.

3.1. De 0,65 K a 5,0 K: Temperatura de Pressão de Vapor de Hélio

Nesta faixa, T_{90} é definida em função da pressão de vapor **p** do ^{3}He e ^{4}He, utilizando as seguintes equações:

$$T_{90} / K = A_0 + \sum_{i=1}^{9} A_i [(\ln(p / Pa) - B) / C]^i \quad \text{(Eq. 3)}$$

Os valores das constantes A_0, A_i, B e C são apresentados na **Tabela 3** para o ^{3}He na faixa de 0,65 K a 3,2 K; para o ^{4}He na faixa de 1,25 K a 2,1768 K (ponto λ) e 2,1768 K a 5,0 K.

3.2 De 3,0 K ao Ponto Triplo do Neon (24,5561 K): Termômetro de Gás

Nesta faixa T_{90} é definida por meio de termômetro de gás ^{3}He ou ^{4}He, do tipo volume constante, calibrado em três temperaturas: ponto triplo do neon (24,5561 K); ponto triplo de equilíbrio do hidrogênio (13,8033 K); e numa temperatura situada entre 3,0 K e 5,0 K. Esta última temperatura é determinada com um termômetro de pressão de vapor ^{3}He ou ^{4}He, tal como especificado na Seção. 3.1.

Tabela 1. Pontos fixos de Definição da ITS-90

Nº	Temperatura		Substância[(a)]	Estado[(b)]	$W_r(T_{90})$
	T_{90}/K	t_{90}/ºC			
1	3 a 5	-270.15 a -268.15	He	PV	---
2	13.8033	-259.3467	e-H_2	T	0.001 190 07
3	~17	~-256.15	e-H_2 (ou He)	PV (ou G)	---
4	~20.3	~-252.85	e-H_2 (ou He)	PV (ou G)	---
5	24.5561	-248.5939	Ne	T	0.008 449 74
6	54.3584	-218.7916	O_2	T	0.091 718 04
7	83.8058	-189.3442	Ar	T	0.215 859 75
8	234.3156	-38.8344	Hg	T	0.844 142 11
9	273.16	0.01	H_2O	T	1.000 000 00
10	302.9146	29.7646	Ga	F	1.118 138 89
11	429.7485	156.5985	In	S	1.609 801 85
12	505.078	231.928	Sn	S	1.892 797 68
13	692.677	419.527	Zn	S	2.568 917 30
14	933.473	660.323	Al	S	3.376 008 60
15	1234.93	961.78	Ag	S	4.286 420 53
16	1337.33	1064.18	Au	S	---
17	1357.77	1084.62	Cu	S	---

([a]) Todas as substâncias, exceto ^{3}He, são de composição isotópica natural, e-H2 é hidrogénio em concentração de equilíbrio formas moleculares orto e para.
([b]) Para as definições completas e recomendações sobre a realização desses vários estados, consulte "Informações Complementares para o ITS-90". Os símbolos têm os seguintes significados: PV: ponto de pressão de vapor, T: ponto triplo (temperatura na qual as fases vapor, sólida e líquida estão em equilíbrio); G: termômetro de gás; F: ponto de fusão; S: ponto de solidificação (temperatura, à pressão de 101 325 Pa, em que as fases sólida e líquida estão em equilíbrio).

Tabela 2. Efeito da Pressão sobre as Temperaturas de alguns Pontos Fixos			
Substância	Valor atribuído ao ponto de equilíbrio T_{90}/K	Temperatura à pressão, p (dT/dp)/ (10^{-8}K · Pa $^{-1}$)*	Variação da profundidade de imersão, (dT/dl)/ (10^{-3}K · m $^{-1}$)**
e-Hidrogênio (T)	13.8033	34	0.25
Neon (T)	24.5561	16	1.9
Oxigênio (T)	54.3584	12	1.5
Argônio (T)	83.8058	25	3.3
Mercúrio (T)	234.3156	5.4	7.1
Água(T)	273.16	- 7.5	- 0.73
Gálio (F)	302.9146	- 2.0	- 1.2
Índio (S)	429.7485	4.9	3.3
Estanho (S)	505.078	3.3	2.2
Zinco (S)	692.677	4.3	2.7
Alumínio (S)	933.473	7.0	1.6
Prata (S)	1234.93	6.0	5.4
Ouro (S)	1337.33	6.1	10
Cobre (S)	1357.77	3.3	2.6

** Equivalente em mK por atmosfera padrão*
*** Equivalente a mK por metro de líquido*
+ A pressão de referência para pontos de fusão e de congelamento é a atmosfera padrão (p0 = 101 325 Pa). Para os pontos triplos (T), o efeito da pressão é uma consequência só da pressão hidrostática do líquido na célula

Tabela 3. Valores das constantes para equações de pressão de vapor do He, Eq. (3). Faixas de temperaturas para as quais cada equação, identifica pelo conjunto de constantes, são válidas.			
	^{3}He 0.65 K a 3.2 K	**^{4}He 1.25 K a 2.1768 K**	**^{4}He 2.1768 K a 5.0 K**
A_0	1.053 447	1.392 408	3.146 631
A_1	0.980 106	0.527 153	1.357 655
A_2	0.676 380	0.166 756	0.413 923
A_3	0.372 692	0.050 988	0.091 159
A_4	0.151 656	0.026 514	0.016 349
A_5	- 0.002 263	0.001 975	0.001 826
A_6	0.006 596	- 0.017 976	- 0.00 4325
A_7	0.088 966	0.005 409	- 0.00 4973
A_8	- 0.004 770	0.013 259	0
A_9	- 0.054 943	0	0
B	7.3	5.6	10.3
C	4.3	2.9	1.9

3.2.1. De 4,2 K ao Ponto Triplo do Neon (24,5561 K), com ^{4}He como gás termométrico.

Nesta faixa T_{90} é definida pela relação:

$$T_{90} = a + bp + cp^2 \quad \text{(Eq. 4)}$$

onde **p** é a pressão do termômetro de gás, b e c são os coeficientes numéricos obtidos a partir de medições feitas em três pontos fixos indicados no Seção 3.2., observando a restrição de que o valor do ponto fixo mais baixo deve situar entre 4,2 K e 5,0 K.

3.2.2. De 3,0 K ao Ponto Triplo do Neon (24,5561 K) com ^{3}He ou ^{4}He como gás termométrico.

Para termômetros de gás ^{3}He e ^{4}He, usados abaixo 4,2 K, a não idealidade do gás deve ser explicitamente levada em conta por meio de um segundo coeficiente "virial" B_3 (T_{90}) ou B_4 (T_{90}). Nesta faixa, T_{90} é definida pela relação:

$$T_{90} = \frac{a + bp + cp^2}{1 + B_x(T_{90})N/V} \quad \text{(Eq. 5)}$$

onde **p** é a pressão no termômetro de gás, **a**, **b** e **c** são os coeficientes numéricos obtidos a partir de medições em três temperaturas definidas na Seção. 3.2. N/V é a densidade do gás, com N sendo a quantidade de gás e V o volume do bulbo. X é 3 ou 4, de acordo com o isótopo utilizado. Os valores dos segundo coeficientes "viriais" são dados pelas relações:

Para ^{3}He

$$B_3(T_{90})/m^3mol^{-1} = \{16,69 - 336,98(T_{90}/K)^{-1} + 91,04(T_{90}/K)^{-2} - 13,82(T_{90}/K^{-3}\}10^{-6} \quad \text{(Eq. 6a)}$$

Para ^{4}He

$$B_4(T_{90})/m^3mol^{-1} = \{15,708 - 374,05(T_{90}/K)^{-1} - 383,53(T_{90}/K)^{-2} + 1799,2(T_{90}/K)^{-3} - 4033,2(T_{90}/K)^{-4} + 3252,8(T_{90}/K)^{-3}\}10^{-6} \quad \text{(Eq. 6b)}$$

Tabela 4. As constantes A_0, A_i, B_0, B_i; C_0, C_i; D_0 e D_i nas funções de referência das equações (9a); (10a) e (10b), respectivamente.

A_0	- 2.135 347 29	B_0	0.183 324 722	C_0	2.781 572 54	D_0	439.932 854
A_1	3.183 247 20	B_1	0.240 975 303	C_1	1.646 509 16	D_1	472.418 020
A_2	- 1.801 435 97	B_2	0.209 108 771	C_2	- 0.137 143 90	D_2	37.684 494
A_3	0.717 272 04	B_3	0.190 439 972	C_3	- 0.006 497 67	D_3	7.472 018
A_4	0.503 440 27	B_4	0.142 648 498	C_4	- 0.002 344 44	D_4	2.920 828
A_5	- 0.618 993 95	B_5	0.077 993 465	C_5	0.005 118 68	D_5	0.005 184
A_6	- 0.053 323 22	B_6	0.012 475 611	C_6	0.001 879 82	D_6	- 0.963 864
A_7	0.280 213 62	B_7	- 0.032 267 127	C_7	- 0.002 044 72	D_7	- 0.188 732
A_8	0.107 152 24	B_8	- 0.075 291 522	C_8	- 0.000 461 22	D_8	0.191 203
A_9	- 0.293 028 65	B_9	- 0.056 470 670	C_9	0.000 457 24	D_9	0.049 025
A_{10}	0.044 598 72	B_{10}	0.076 201 285				
A_{11}	0.118 686 32	B_{11}	- 0.123 893 204				
A_{12}	- 0.052 481 34	B_{12}	- 0.029 201 193				
		B_{13}	- 0.091 173 542				
		B_{14}	0.001 317 696				
		B_{15}	0.026 025 526				

A exatidão com a qual T_{90} pode ser realizada usando as eq. (4) e (5) depende do projeto do termômetro de gás e a densidade do gás utilizado. Critérios de projeto e boas práticas de

fabricação, necessários para alcançar uma dada exatidão, são apresentados nas "Informações Complementares a ITS-90".

3.3. Do Ponto Triplo de Equilíbrio do Hidrogênio (13,8033 K) ao Ponto de Solidificação da Prata (961,78 ˚C): Termômetro de Resistência de Platina(SPRT).

Nesta faixa T_{90} é definida por meio do termômetro de resistência de platina (SPRT), calibrado num conjunto de pontos fixos de definição, aplicando uma referência especificada e funções de desvio para a interpolação das temperaturas nos intervalos.

Não existe um único termômetro de resistência de platina que forneça alta exatidão, ou mesmo que seja passível de utilização, em toda a faixa de temperatura entre 13,8033 K e 961,78 ˚C. A escolha de uma faixa ou de sub-faixas, entre as listadas a seguir, para as quais um dado SPRT pode ser utilizado, normalmente é limitada por aspectos construtivos do próprio termômetro.

Maiores detalhes e boas práticas construtivas e operacionais, em particular para tipos específicos de termômetros, limites aceitáveis de operação, prováveis exatidões, perdas de resistência permissíveis, valores de resistência e tratamentos térmicos, consulte "Informações Complementares a ITS-90". É particularmente importante levar em conta os tratamentos térmicos apropriados, que devem ser seguidos de cada vez que um SPRT é submetido a temperaturas acima de cerca de 420 ˚C.

As temperaturas são determinadas a partir da relação entre a resistência $R(T_{90})$, medida a uma temperatura T_{90}, e a resistência do termômetro no ponto triplo da água R(273,16 K).

Esta razão, $W(T_{90})$, é dada por[1]:

$$W(T_{90}) = R(T_{90}) / R(273{,}16K) \quad \text{(Eq. 7)}$$

Um SPRT aceitável deve ser construído com platina de alta pureza, estar livre de tensão mecânica e assegurar, pelo menos, uma entre as duas seguintes condições:

$$W(29{,}7646°C) \geq 1.118{,}07 \quad \text{(Eq. 8a)}$$

$$W(-38{,}8344°C) \geq 0.844235 \quad \text{(Eq. 8b)}$$

Um SPRT para ser utilizado até o ponto de solidificação da prata deve satisfazer a condição:

$$W(961{,}78°C) \geq 4{,}2844 \quad \text{(Eq. 8c)}$$

Em cada faixa de uso do SPRT, T_{90} e obtida de $W_r(T_{90})$ por meio de uma função de referência apropriada {Eq. (9b) ou (10b). (9-B) e o desvio $W(T_{90})$-$W_r(T_{90})$. Nos pontos fixos, esse desvio é obtido diretamente a partir da calibração SPRT, e, nas temperaturas intermediárias, obtido por meio da função de desvio adequada {Eq. (12), (13) e (14).}.

(i) - Para a faixa de 13,8033 K até 273,16 K, a seguinte função de referência é definida

$$\ln[W_r(T_{90})] = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left[\frac{\ln(T_{90} / 273{,}16K + 1{,}5}{1{,}5} \right]^i \quad \text{(Eq. 9a)}$$

Note-se que esta definição de W(T90) difere da correspondente definição utilizada na ITS-27, ITS-48, IPT-48, e IPT-68: em vez de todas essas escalas anteriores W(t) foi definida em termos de temperatura de referência de 0 ˚C, que desde 1954 tem-se sido definida como 273,15 K

Uma função inversa, equivalente a Equação (9a.), com variação dentro de 0, 0001 K, é:

$$(T_{90})/273{,}16K = B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left[\frac{W_r(T_{90})^{1/6} - 0{,}65}{0{,}35} \right]^i \quad \text{(Eq.9b)}$$

Os valores das constantes A_0, A_i, B_0 e B_i são apresentados na Tabela 4.

Um termômetro pode ser calibrado para uso ao longo dessa faixa, ou, progressivamente, calibrado usando alguns poucos pontos de calibração para temperaturas abaixo de 24,5561 K, 54,3584 K e 83,8058 K, todos tendo como limite superior o valor de 273,16 K.

(ii) - Para a faixa de 0 ˚C a 961,78 ˚C, a seguinte função de referência é definida:

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^{9} C_i \left[\frac{T_{90}/K - 754{,}15}{481} \right]^i \quad \text{(Eq. 10a)}$$

Uma função inversa, equivalente a Eq. (10a.) , com variação dentro de 0,00013 K é:

$$T_{90}/K - 273{,}15 = D_0 + \sum_{i=1}^{9} D_i \left[\frac{W_r(T_{90}) - 2{,}64}{1{,}64} \right]^i \quad \text{(Eq. 10b)}$$

Os valores das constantes C_0, C_i, D_0 e D_i são apresentados na Tabela 4.

Um termômetro pode ser calibrado para uso ao longo dessa faixa, ou usando alguns poucos pontos de calibração, para faixas com limites superiores de 660,323 ˚C, 419,527 ˚C, 231,928 ˚C, 156,5985 ˚C ou 29,7646 ˚C, todos com um limite inferior a 0 ˚C.

(iii) - Um termômetro pode ser calibrado para utilização na faixa de 234,3156 K (- 38,8344 ˚C) a 29,7646 ˚C, com calibração feita nestas temperaturas e na temperatura do ponto triplo da água. Ambas as funções de referência {Eq. (9) e (10)} são necessárias para cobrir essa faixa.

Os pontos fixos e as funções de desvio para as várias faixas são dadas a seguir. São sumarizadas na Tabela 5.

3.3.1. Do Ponto Triplo de Equilíbrio do Hidrogênio (13,8033 K) ao Ponto Triplo da Água (273,16 K).

O SPRT é calibrado nos pontos triplos de equilíbrio do hidrogênio (13,8033 K), do neon (24,5561 K), do oxigênio (54,3584 K), do argônio (83,8058 K), do mercúrio (234,3156 K) e da água (273,16 K), e, também, em duas temperaturas adicionais, próximas a 17,0 K e 20,3 K. Estas duas últimas temperaturas podem ser assim determinadas:

- Utilizando um termômetro de gás, como descrito no Seção 3,2, caso em que as duas temperaturas devem situar-se nas faixas de 16,9 K a 17,1 K e de 20,2 K a 20,4 K, respectivamente, ou;
- Utilizando a relação da temperatura versus pressão vapor de equilíbrio do H_2, caso em que as temperaturas devem situar-se dentro das faixas de 17.025 K a 17,045 K e de 20,26 K a 20,28 K, respectivamente, com os valores precisos a serem determinados pelas Equações (11a) e (11b), respectivamente:

$$T_{90}/K - 17{,}035 = (p/kPa - 33{,}3213)/13{,}32 \quad \text{(Eq. 11a)}$$

$$T_{90} / K - 20,27 = (p / kPa - 101,292) / 30 \text{ (Eq. 11b)}$$

A função de desvio é dada por:

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + \sum_{i=1}^{5} c_i [\ln W(T_{90})]^{i+n} \quad \text{(Eq. 12)}$$

com valores dos coeficientes **a**, **b** e $\mathbf{c_1}$ obtidos em medições em pontos fixos de definição e com n=2.

Para estas faixas e para as sub-faixas 3.3.1.1 a 3.3.1.3 os valores necessários W_r (T_{90}) são obtidos a partir da equação. (9a) ou a partir da Tabela 1.

Nota: Esta função desvio (Eq.12), e também as equações (13) e (14), podem ser expressas em termos de W_r, em vez de W. (Para este procedimento ver "Informação suplementar para ITS-90".

3.3.1.1. O Ponto Triplo da Neon (24,5561 K) ao Ponto Triplo da Água (273,16 K).

O termômetro é calibrado nos pontos triplos de equilíbrio do hidrogênio (13,8033 K), do neon (24,5561 K), do oxigênio (54,3584 K), do argônio (83,8058 K), do mercúrio (234,3156 K) e da água (273,16 K).

A função desvio é dada pela equação (12) com os valores para os coeficientes a, b, c_1, c_2 e c_3 sendo obtido a partir de medições em que definem os pontos fixos e com $c_4 = c_5 = n = 0$.

3.3.1.2 Do Ponto Triplo do Oxigênio (54,3584 K) ao Ponto Triplo da Água (273,16 K).

O termômetro é calibrado nos pontos triplos do oxigênio (54,3584 K), do argônio (83,8058 K), do mercúrio (234,3156 K) e da água (273,16 K).

Tabela 5. Desvio de funções e pontos de calibração para termômetros de resistência de platina nas várias faixas em que definem T_{90}

Seção	Limite Inferior (T/K)	Função Desvio	Pontos de Calibração
a. Faixas com limite superior de 273.16 K			
3.3.1	13.8033	As equações (12), com n=2	2-9
3.3.1.1	24.5561	Como 3.3.1 com $c_4 = c_5 = n = 0$	2, 5-9
3.3.1.2	54.3584	Como 3.3.1 com $c_2 = c_3 = c_4 = c_5 = 0$, n = 1	6-9
3.3.1.3	83.8058	a[W (T_{90}) - 1]+b[W (T_{90}) - 1] ln W (T_{90})	7-9
b. Faixas com limite inferior de 0˚C			
Seção	**Limite Inferior (T/K)**	**Função Desvio**	**Pontos de Calibração**
3.3.2*	961.78	As equações (14)	9, 12-15
3.3.2.1	660.323	Como 3.3.2 com d = 0	9, 12 - 14
3.3.2.2	419.527	Como 3.3.2 com c = d = 0	9, 12, 13
3.3.2.3	231.928	Como 3.3.2 com c = d = 0	9, 11, 12
3.3.2.4	156.5982	Como 3.3.2 com b = c = d = 0	9, 11
3.3.2.5	29.7646	Como 3.3.2 com b = c = d = 0	9, 10
c. Faixa de 234.3156 K (- 38.8344 ˚C) a 29.7646 ˚C			
3.3.3		Como 3.3.2 com c = d = 0	8-10

Nota: Os pontos de calibração 9, 12-14 são utilizadas com d=0 para T_{90} <= 660,323 ˚C. Os valores de a, b e c são obtidos da T_{90} => 660,323 ˚C, com d determinado a partir do ponto de calibração 15.

A função desvio dada pela Equação (12), com valores dos coeficientes a, b e c_1 obtidos de medições feitas em pontos fixos, com $c_2=c_3=c_5=0$ e n=1.

3.3.1.3. Do Ponto Triplo da Argônio (83,8058 K) ao Ponto Triplo da Água (273,16 K).

O termômetro é calibrado nos pontos triplos de argônio (83,8058 K), do mercúrio (234,3156 K) e da água (273,16 K).

A função desvio é dada por:

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]\ln W(T_{90}) \quad \text{(Eq.13)}$$

com os valores de **a** e **b** obtidos a partir de medições feitas em pontos fixos de definição.

3.3.2. De 0 ˚C ao Ponto de Solidificação da Prata (961,78 ˚C).

O termômetro é calibrado no ponto triplo da água (0,01 ˚C) e nos pontos de solidificação do estanho (231,928 ˚C), do zinco (419,527 ˚C), do alumínio (660,323 ˚C) e da prata (961,78 ˚C).

A função desvio é dada por:

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + c[W(T_{90}) -]^3 + d[WT_{90}) - W(660{,}323°C)]^2 \quad (14)$$

Para temperaturas inferiores ao ponto de solidificação do alumínio **d**=0 e os valores de **a**, **b** e **c** são determinados a partir dos desvios de $W_r(T_{90})$ medidos nos pontos de solidificação do estanho, zinco e alumínio. Do ponto de solidificação do alumínio ao ponto de solidificação da prata, os valores acima de **a**, **b** e **c** são retidos e o valor de **d** é determinado a partir do desvio de $W_r(T_{90})$ medido no ponto de solidificação da prata.

Para estas faixas e sub-faixas 3.3.2.1 a 3.3.2.5 os valores de $W_r(T_{90})$ são obtidos a partir da Equação (10a) ou a partir da Tabela 1.

3.3.2.1. De 0 ˚C ao Ponto de Solidificação do Alumínio (660,323 ˚C).

O termômetro é calibrado no ponto triplo da água (0,01 ˚C) e nos pontos de solidificação do estanho (231,928 ˚C), do zinco (419,527 ˚C) e de alumínio (660,323 ˚C). A função desvio é dada pela Eq. (14), com os valores de **a**, **b** e **c** determinados a partir de medições feitas nos pontos fixos de definição, com **d**=0.

3.3.2.2. De 0 ˚C ao Ponto de Solidificação do Zinco (419,527 ˚C).

O termômetro é calibrado no ponto triplo da água (0,01 ˚C) e nos pontos de solidificação do estanho (231,928 ˚C) e do zinco (419,527 ˚C). A função desvio é dada pela Eq. (14), com os valores de **a** e **b** obtidos de medições feitas nos pontos fixos de definição, com **c**=**d**=0.

3.3.2.3. De 0 ˚C ao Ponto de Solidificação do Estanho (231,928 ˚C).

O termômetro é calibrado no ponto triplo da água (0,01 ˚C) e nos pontos de solidificação do índio (156,5985 ˚C) e do estanho (231,928 ˚C). A função desvio é dada pela Eq. (14), com os valores de **a** e **b** obtidos de medições feitas nos pontos fixos definidores, com **c**=**d**=0.

3.3.2.4. De 0 ˚C ao Ponto de Solidificação do Índio (156,5985 ˚C).

O termômetro é calibrado no ponto triplo da água (0,01 ˚C) e no ponto de solidificação do índio (156,5985 ˚C). A função desvio é dada pela Eq. (14), com valores obtidos de medições feitas nos pontos fixos de definição, com **b=c=d**=0.

3.3.2.5. A partir de 0 ˚C até o Ponto de Fusão de Gálio (29,7646 ˚C).

O termômetro é calibrado no ponto triplo da água (0,01 ˚C) e no ponto de fusão do gálio (29,7646 ˚C). A função desvio é dada pela Eq.(14), com os valores obtidos de medições feitas nos pontos fixos de definição, com **b=c=d**=0.

3.3.3. Do Ponto Triplo do Mercúrio (-38,8344 ˚C) ao Ponto de Fusão do Gálio (29,7646 ˚C).

O termômetro é calibrado os pontos triplos do mercúrio (- 38,8344 ˚C), da água (0,01 °C) e no ponto de fusão de gálio (29,7646 ˚C). A função desvio é dada pela Eq. (14), com os valores obtidos de medições feitas nos pontos fixos de definição, com **c=d**=0.

Os valores desejados de $W_r(T_{90})$ são obtidos a partir das Eq. (9a) e (10a) para medições respectivamente feitas abaixo e acima de 273,16 K, ou a partir da Tabela 1.

3.4. Faixa acima do Ponto de Solidificação da Prata (961,78 º C): Lei de Radiação de Planck.

Acima do ponto de solidificação da prata, a temperatura T_{90} é definida pela equação:

$$\frac{L\lambda(T_{90})}{L\lambda[T_{90}(X)]} = \frac{\exp(c_2[\lambda T_{90}(X)]^{-1}) - 1}{\exp(c_2[\lambda T_{90}]^{-1}) - 1} \quad \text{(Eq.15)}$$

onde: $T_{90}(X)$ refere-se a qualquer um dos seguintes pontos de solidificação: prata {T_{90}(Ag)=1234,93 K}; ouro {T_{90}(Au)=1337,33 K} ou cobre {T_{90} (Cu)=1357,77 K}, e com Lλ (T_{90}) e Lλ [T_{90}(X)] sendo as concentrações espectrais da radiança do corpo negro no comprimento de onda (no vácuo) λ em T_{90} e T_{90} (X), respectivamente, e c_2 = 0,014388 mK. Para mais maiores detalhes e boas práticas relativas à pirometria óptica, ver "Informações Complementares à ITS-90" (BIPM, 1990).

Nota: Os valores dos pontos de solidificação do ouro, da prata e do cobre T_{90} são tidos como auto consistentes para substituírem-se mutualmente como a temperatura de referência $T_{90}(X)$, sem resultar em diferenças significativas nos valores medidos de T_{90}.

4. INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES E DIFERENÇAS DE ESCALAS ANTERIORES

Artefatos, métodos e procedimentos que servirão para realizar o ITS-90 são apresentados nas "Informações Complementares da ITS-90". Este documento também considera as anteriores escalas internacionais de temperatura e as respectivas diferenças numéricas entre essas escalas, incluindo, sempre que possível, as funções matemáticas das diferenças T_{90}-T_{68}. Uma série de aproximações úteis para a ITS-90 são dadas em "Técnicas aproximativas à ITS-90".

Estes dois documentos foram preparados pelo Comitê Consultivo de Termometria e são publicados pelo BIPM. São revisados e atualizados periodicamente. As diferenças T_{90}-T_{68} são

mostradas na Figura 1 e na Tabela 6. O número de algarismos significativos indicados no Quadro 6 permite que as interpolações sejam feitas suavemente. No entanto, a reprodutibilidade do IPTS-68 é, em muitas áreas, substancialmente pior do que está implícita por este número.

Tabela 6. Diferenças entre ITS-90 e EPT-76, e entre ITS-90 e IPTS-68 para valores especificados de T_{90} e t_{90}.

$(T_{90} - T_{76})$/mK										
T_{90}/K	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
0						-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5
10	-0.6	-0.7	-0.8	-1.0	-1.1	-1.3	-1.4	-1.6	-1.8	-2.0
20	-2.2	-2.5	-2.7	-3.0	-3.2	-3.5	-3.8	-4.1		
$(T_{90} - T_{68})$/K										
T_{90}/K	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
10					-0.006	-0.003	-0.004	-0.006	-0.008	-0.009
20	-0.009	-0.008	-0.007	-0.007	-0.006	-0.005	-0.004	-0.004	-0.005	-0.006
30	-0.006	-0.007	-0.008	-0.008	-0.008	-0.007	-0.007	-0.007	-0.006	-0.006
40	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.007	-0.007	-0.007	-0.006	-0.006
50	-0.006	-0.005	-0.004	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001	0.000	0.001	0.002
60	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006	0.007	0.007
70	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
80	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
90	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.009	0.009	0.009
T_{90}/K	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**
100	0.009	0.011	0.013	0.014	0.014	0.014	0.014	0.013	0.012	0.012
200	0.011	0.010	0.009	0.008	0.007	0.005	0.003	0.001		
$(t_{90} - t_{68})$/ºC										
t_{90}/ºC	**0**	**-10**	**-20**	**-30**	**-40**	**-50**	**-60**	**-70**	**-80**	**-90**
-100	0.013	0.013	0.014	0.014	0.014	0.013	0.012	0.010	0.008	0.008
0	0.000	0.002	0.004	0.006	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012	0.012
t_{90}/ºC	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**
0	0.000	-0.002	-0.005	-0.007	-0.010	-0.013	-0.016	-0.018	-0.021	-0.024
100	-0.026	-0.028	-0.030	-0.032	-0.034	-0.036	-0.037	-0.038	-0.039	-0.039
200	-0.040	-0.040	-0.040	-0.040	-0.040	-0.040	-0.040	-0.039	-0.039	-0.039
300	-0.039	-0.039	-0.039	-0.040	-0.040	-0.041	-0.042	-0.043	-0.045	-0.046
400	-0.048	-0.051	-0.053	-0.056	-0.059	-0.062	-0.065	-0.068	-0.072	-0.075
500	-0.079	-0.083	-0.087	-0.090	-0.094	-0.098	-0.101	-0.105	-0.108	-0.112
600	-0.115	-0.118	-0.122	- 0.125*	-0.08	-0.03	0.02	0.06	0.11	0.16
700	0.20	0.24	0.28	0.31	0.33	0.35	0.36	0.36	0.36	0.35
800	0.34	0.32	0.29	0.25	0.22	0.18	0.14	0.10	0.06	0.03
900	-0.01	-0.03	-0.06	-0.08	-0.10	-0.12	-0.14	-0.16	-0.17	-0.18
1000	-0.19	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23	-0.24	-0.25	-0.25	-0.26	-0.26
t_{90}/ºC	**0**	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**	**600**	**700**	**800**	**900**
1000		-0.26	-0.30	-0.35	-0.39	-0.44	-0.49	-0.54	-0.60	-0.66
2000	-0.72	-0.79	-0.85	-0.93	-1.00	-1.07	-1.15	-1.24	-1.32	-1.41
3000	-1.50	-1.59	-1.69	-1.78	-1.89	-1.99	-2.10	-2.21	-2.32	-2.43

* Uma descontinuidade na primeira derivada $(T_{90} - T_{68})$ ocorre em T_{90} = 630,6 ºC, em que $(T_{90} - T_{68})$ = - 0.125 °C.

APÊNDICE

A ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1927 (ITS-27)

A Escala Internacional de Temperatura de 1927 foi adotada pela VII Conferência Geral de Pesos e Medidas com o objetivo de superar dificuldades práticas encontradas na realização das temperaturas termodinâmicas com a utilização de termômetros de gás, bem como por se tratar de uma escala universalmente aceitável para substituir as diferentes escalas de temperatura nacionais existentes.

A ITS-27 foi formulada para permitir que as medições de temperatura pudessem ser feitas de forma mais precisa e reprodutível, com melhores aproximações em termos dos valores termodinâmicos das temperaturas disponíveis à época.

Dentre as diretivas adotadas, entre o ponto de ebulição do oxigênio e o ponto de solidificação do ouro a ITS-27 foi balizada por uma série de pontos fixos, com valores numéricos temperaturas atribuídos, e dois instrumentos padrão de interpolação, ambos calibrados em vários dos pontos fixos, possibilitando estabelecimento de constantes para uma fórmula interpolação apropriada para as faixa de temperatura.

Um termômetro de resistência de platina foi definido para utilização na parte baixa escala e um termopar de Pt/Pt+Rh definido para utilização na faixa de temperatura acima de 660 ˚C. Para a região acima do ponto de solidificação do ouro, as temperaturas foram definidas em termos da Lei de Radiação Wien, resultando na escolha de um pirômetro óptico como o instrumento para sua realização.

A ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1948 (ITS-48)

A Escala Internacional de Temperatura de 1948 (ITS-48) foi adotada pela IX Conferência Geral e Pesos e Medidas e apresentou algumas alterações à ITS-27, com destaque para as seguintes:

- O limite inferior da faixa de utilização do termômetro de resistência passou de -190 ˚C para -182,97 ˚C, ponto de ebulição do oxigênio;
- A interligação entre a faixa de uso do termômetro de resistência de platina e a faixa de uso do termopar passou a ser o ponto de solidificação do antimônio (630˚C), em substituição ao valor de 660 ˚C ;
- O ponto de solidificação da prata passou para 960,8 ˚C, em substituição ao valor anteriormente adotado de 960,5 ˚C;
- Adotou-se a temperatura do ponto de solidificação do ouro em substituição à temperatura de seu ponto de fusão (1063 ˚C);
- A Lei de Radiação de Planck foi adotada em substituição à Lei da Radiação de Wien;
- O valor atribuído à segunda constante da radiação passou para 1.438×10^{-2} mK, em substituição ao valor anteriormente adotado de $1,432 \times 10^{-2}$ mK;
- As faixas permitidas para uso das constantes das fórmulas de interpolação utilizadas para o termômetro de resistência de platina e para o termopar de platina-platina/ródio foram modificadas;
- A limitação relativa a λT para a pirometria óptica - ($\lambda T < 3 \times 10^{-3}$ mK) - foi alterada, passando a ser exigido o uso da radiação "visível".

A ESCALA INTERNACIONAL PRÁTICA DE TEMPERATURA DE 1948 - (IPTS-48) (Edição Alterada em 1960)

A Escala Prática Internacional de Temperatura de 1948, alterada na Edição de 1960, foi adotada pela XI Conferência Geral.

A X Conferência Geral já havia adotado o ponto triplo da água como o único ponto fixo de definição do kelvin, K, como unidade de temperatura termodinâmica.

Além da introdução da palavra "prática", as modificações para o ITS-48 foram os seguintes:

- O ponto triplo da água, definido como como sendo 0,01 ˚C;
- O ponto de solidificação do zinco (419,505 º C) tornando-se uma alternativa preferida em relação ao ponto de ebulição de enxofre (444,6 ˚C), como um ponto de calibração;
- As faixas permitidas para as constantes das fórmulas de interpolação do termômetro de resistência e do termopar foram modificadas;
- A restrição à radiação "visível" por pirometria óptica foi removida.

Nota: Apesar de os valores numéricos das temperaturas na IPTS-48 serem os mesmos da ITS-48, a IPTS-68 não pode ser considerada uma revisão da escala de ITS-1948, mas apenas uma forma alterada desta.

A ESCALA PRÁTICA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1968 (IPTS-68)

Em 1968 o Comitê Internacional de Pesos e Medidas, com base em resultados da XIII Conferência Geral de 1967-1968, promulgou a Escala Internacional Prática de Temperatura de 1968 (IPTS-68), que incorporou grandes alterações à IPTS-48, tais como mudanças numéricas destinadas a melhor aproximar os valores da IPTS-68 aos valores das temperaturas termodinâmicas.

Dentre outras, destacam-se as seguintes modificações:

- O limite inferior da escala foi estendido até 13,81 K;
- Mesmo para as temperaturas mais baixas (de 0,5 K a 5,2 K), a utilização de duas escalas baseadas na pressão de vapor do hélio foram recomendadas;
- Seis novos pontos fixos de definição foram introduzidos, a saber:
  - Ponto triplo de equilíbrio do hidrogênio (13,81 K),
  - Ponto intermediário de equilíbrio de hidrogênio (17,042 K),
  - Ponto normal de equilíbrio de ebulição de hidrogênio (20,28 K),
  - Ponto de ebulição de neon (27,102 K),
  - Ponto triplo de oxigênio (54,361 K),
  - Ponto de solidificação do estanho (231.9681 ˚C), que se tornou uma alternativa permitida ao ponto de ebulição da água.
  - Supressão do ponto de ebulição do enxofre.
- Os valores atribuídos a 4 pontos fixos foram alteradas: ponto de ebulição do oxigênio (90,188 K); ponto de solidificação do zinco (419,58 ˚C); ponto de solidificação da prata (961,93 ˚C); ponto de solidificação do ouro (1064,43 ˚C):
- As fórmulas de interpolação para a faixa do termômetro de resistência de platina tornaram-se mais complexas;
- O valor atribuído à segunda constante da radiação c_2 passou para $1{,}4388 \times 10^{-2}$ mK;
- As faixas permitidas para as constantes das fórmulas de interpolação para o termômetro de resistência e termopares foram novamente modificadas.

ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA PRÁTICA DE 1968 (IPTS-68) (Edição Alterada de 1975)

A Escala Prática Internacional de Temperatura de 1968 foi alterada em sua Edição de 1975, e as alterações foram adotadas pela XV Conferência Geral de 1975.

Similarmente ao que ocorreu com IPTS-48 em relação a ITSI-48, o IPTS-68(75) não introduziu nenhuma alteração em termos numéricos. A maioria alterações foram textuais, com seguintes destaques:

- O ponto oxigênio foi definido como o de condensação, em substituição ao de ebulição;
- O ponto triplo do argônio (83,798 K) foi introduzido como uma alternativa permitida ao ponto de condensação de oxigénio;
- Novos valores para a composição isotópica natural do neon foram adotados;
- As recomendações de valores T feitas para as pressões de vapor do ^{4}He (1958) e para o ^{3}He (1962) foram canceladas.

Escala Provisória de Temperatura de 0,5 K a 30 K de 1976 - (EPT-76)

Escala Provisória de Temperatura de 0,5 K a 30 K de 1976 foi introduzida para satisfazer a dois importantes requisitos:

- Proporcionar meios para reduzir substancialmente os erros (com respeito aos valores termodinâmicos correspondentes) abaixo de 27 K, que reconhecidamente existiam na IPTS-68, bem como ao longo das faixas das temperaturas de pressão de vapor do ^{4}He e ^{3}He de 1958 e 1962, respectivamente;
- e para cobrir a lacuna existente entre 5,2 K e 13,81 K, faixa em descoberto pelas escalas internacionais anteriores.

Outros objetivos foram contemplados na ETP-76 e tornaram essa escala mais suave e continua quando comparada a IPTS-68 em 27,1 K. Dentro de certas condições permitidas, seus valores passaram a ter maior concordância com os valores da escala termodinâmica T. Também, em contraste com a IPTS-68 e para garantir a sua rápida aprovação, vários métodos de realização da ETP-76 foram aprovados, neles incluindo:

- O uso de um instrumento de interpolação termodinâmico, e, 1 ou mais 11 pontos de referência atribuídos;
- Considerando as diferenças da IPTS-68 acima de 13,81 K;
- Considerando as diferenças de escalas de laboratório bem estabelecidas.

Devido a existência de uma certa "falta de consistência interna" admite-se que possa ocorrer "pequenas ambiguidades entre realizações" da EPT-76. No entanto, as vantagens obtidas com sua adoção como uma escala de trabalho, até que a IPTS-68 pudesse ser revisada e ampliada, superam as desvantagens.