

Faculdade Pitagoras
Unidade Divinópolis – Minas Gerais.

Engenharia Elétrica

Disciplina: Materiais Elétricos
Prof. Eng. Alexandre Dezem Bertozzi, Esp.
www.bertozi.com

Tema 01: Efeitos Térmicos

2-10 ELETROTECNOLOGIA

- (1) Mecânica-eletromagnética.
- (2) Mecânica-eletrostática.
- (3) Química.
- (4) Térmica.
- (5) Fotoelétrica.

O primeiro é o de maior importância comercial. O segundo é o mais antigo. O terceiro está bem estabelecido e tem a vantagem de armazenamento de energia e facilidade de transporte; pode-se tornar proeminente com o desenvolvimento de células de combustível efetivas. O quarto é sujeito a intensa procura para aperfeiçoar a conversão direta de energia termoelétrica. O quinto tem valor no controle e medições, e no desenvolvimento de baterias solares.

Condutores e isoladores

Os condutores diferem dos isoladores no grau da sua condução, que varia enormemente, de modo que existem materiais cuja condução é tão fraca que podem ser classificados como não condutores e chamados isoladores.

EFEITOS TÉRMICOS

Resistência

A propriedade de um circuito elétrico que determina para uma dada corrente a taxa à qual a energia elétrica é convertida em calor, é chamada *resistência*. Um dispositivo cuja principal propriedade é a resistência é o *resistor* ou, se variável, o *reostato*. Uma corrente I fluindo em uma resistência R desenvolve calor à taxa

$$P = I^2 R \text{ joules/s ou watts,}$$

uma relação expressando a *lei de Joule*.

Voltagem aplicada a um resistor

Na ausência de quaisquer efeitos de armazenamento de energia (uma condição fisicamente não realizável), a corrente em um resistor de valor R é I quando a voltagem através dele é V , de acordo com a relação $I = V/R$. Se uma d.d.p. constante V for subitamente aplicada a um resistor R , a corrente assume instantaneamente o valor dado, e a energia é despendida à taxa de $P = I^2 R$ watts, continuamente. Não ocorrem transientes. Se uma voltagem v *sinusoidal* de frequência e amplitude constantes é aplicada, a corrente i é dada em cada instante por $i = v/R$ e, por consequência, a corrente também tem uma forma de onda sinusoidal desde que a resistência fornecida seja linear. A taxa instantânea da dissipação de energia depende da corrente instantânea; é $p = vi = i^2 R$. Se a voltagem aplicada não for sinusoidal a corrente tem (sob a restrição mencionada) uma forma de onda exatamente semelhante. Os três casos estão ilustrados na *Figura 2.4*.

Nos casos de formas de ondas alternadas, a taxa *média* de dissipação de energia é dada por $P = I^2 R$, onde I é o valor eficaz da corrente.

Características de corrente/voltagem

Para um determinado resistor R transportando uma corrente constante I , a diferença de potencial é $V = IR$. O coeficiente $R = V/I$ pode ou não ser invariável. Em alguns casos é suficiente admitir um grau de constância, e é feita uma grande quantidade de cálculos para esta suposição, com resultados satisfatórios. Onde as variações de resistência são muito grandes para tornar a suposição razoavelmente válida, é necessário recorrer a análises menos simples ou a métodos gráficos.

Uma resistência constante é manifestada por um coeficiente constante entre a vol-

tagem através dela e a corrente passando por ela, e por uma relação gráfica direta entre I e V , *Figura 2.5 (a)*, onde $R = V/I = \cot \theta$. Este caso é típico dos fios de resistência metálica em temperatura constante.

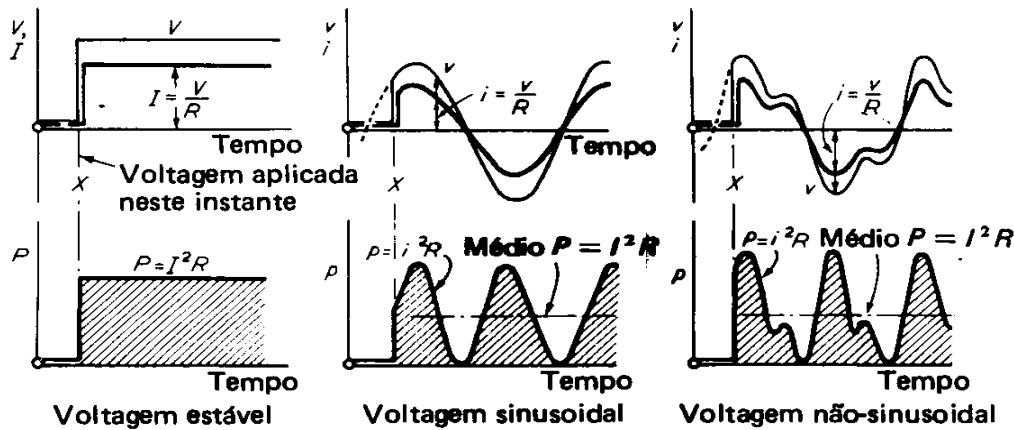


Figura 2.4 Voltagem aplicada a um resistor

Certos circuitos exibem relações de corrente/voltagem *não-linear*, *Figura 2.5 (b)*. A não-linearidade pode ser *simétrica* ou *assimétrica* conforme as características de condução sejam as mesmas ou diferentes para as duas direções de fluxo de corrente. Os retificadores são uma classe importante de resistores não-lineares, assimétricos.

Um dispositivo hipotético tendo a característica de corrente/voltagem mostrada na *Figura 2.5 (c)* tem, numa condição de trabalho, representado pelo ponto P, uma corrente I_d e uma d.d.p. V_d . A razão $R_d = V_d/I_d$ é sua *resistência de corrente contínua* para a condição dada. Se uma pequena voltagem alternada Δv_a for aplicada na mesma condição (i.é,

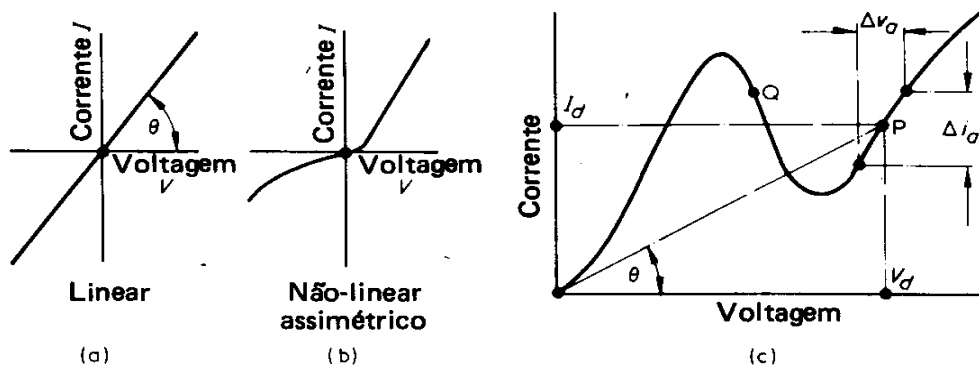


Figura 2.5 Resistência linear e não-linear: Características de corrente/voltagem

sobreposta à d.d.p. V_d), a corrente mudará de Δi_a e a razão $r_a = \Delta v_a / \Delta i_a$ é a c.a. ou *resistência incremental* em P. A resistência da c.c. também é obtida de $R_d = \cot \theta$, e a resistência da c.a. de $r_a = \cot \alpha$. Na região da qual Q é um ponto representativo, a resistência da c.a. é negativa, indicando que o dispositivo é capaz de fornecer uma saída pequena de potência de c.a., derivada da sua maior entrada de c.c. Fica em surto um dissipador de energia, mas alguma energia é restituída sob condições apropriadas da operação.

C.C. ou resistência ôhmica: resistores lineares

A c.c. ou resistência ôhmica dos resistores lineares (uma categoria principalmente limitada a condutores metálicos) é uma função das dimensões do percurso condutor e da *resistividade*

2-12 ELETROTECNOLOGIA

Tabela 2.2. PROPRIEDADES ELÉTRICAS DE CONDUTORES

ρ_{cm} = resistividade ($\mu\Omega - cm$) a 20 °C; g = condutividade relativa, percentagem de cobre temperado padrão; α = coeficiente de temperatura – resistência/10⁴ por °C a 20 °C.

Material	ρ_{cm}	g	α
Cobre temperado padrão internacional	1.72	100	39.3
Alumínio e liga:			
Alumínio, fundido	2.6	66	39.0
por têmpera a frio	2.8	62	39.0
Duralumínio	4.7	36.5	—
Cobre e ligas:			
Cobre, com	1.69–1.74	102–99	39.3
têmpera a frio	1.74–1.81	99–95	38.1–39
Latão (60/40), fundido	7.5	23	16
laminado	9.0	19	16
Bronze	3.6	48	16.5
Bronze fosforizado, fundido	6–12	29–14	10
Cobre de cádmio, têmpera a frio, 93% cond.	1.85	93	—
82% cond.	2.1	82	40
40% cond.	4.31	40	37.5
30% cond.	5.75	30	37.5
Aço chapeado de cobre, têmpera a frio			
Ferro e aço:			
Ferro, forjado (elétrico)	10.7	16	55
fundido, cinzento	70	2.45	—
branco	100	1.72	20
maleável	29.5	5.85	—
não magnético	160	1.12	4.5
Aço, 0,1% de carbono	20	8.6	42
0,3 – 0,5% de carbono	12–19	14.3–9	42
induzido, < 2% Si	15–20	11.5–8.6	—
2% Si	35	4.9	—
4% Si	55	3.1	—
fio, galvanizado	13–14.5	13.3–11.8	44
45-ton	17	10	34
80-ton	21.5	8	34
Ligas de resistência:*			
80 Ni, 20 Cr	(a)	109	1.65
59 Ni, 16 Cr, 25 Fe	(b)	110	1.62
37 Ni, 18 Cr, 2 Si, Fe bal.	(c)	108	1.89
45 Ni, 54 Cu	(d)	49	3.6
80 Cu, 20 Ni	(e)	26	6.6
62 Cu, 15 Ni, 22 Zn	(f)	34.4	5.0
84 Cu, 12 Mn, 4 Ni	(g)	48	3.6
Outros condutores:			
Carbono, grafite	4 600	0.037	–0.2
lâmpada a arco grafitico	5 080	0.034	–5
Ouro	2.36	73	30
Chumbo	22.0	7.8	40
Mercúrio	95.5	1.8	7
Molibdênio	5.7	30	40
Níquel	13.6	12.6	50
Platina	11.7	14.7	39
Prata, fundida	1.58	109	40
a têmpera a frio	1.75	98.5	40
Tântalo	15.5	11.1	31
Tungstênio	5.6	31	45
Zinco	6.2	28	40

* Ligas: (a) C e S para fornos, fogos, e elementos térmicos (b) B, para ferros, aquecedores tubulares; (c) F para certos tipos de elementos de fornos; (d) (e) Cobre; (f) Prata alemã, Platinoídes, para instrumentos; (g) Manganina, para instrumentos de derivação e resistência padrão.

do material do qual o condutor é feito. Um fio de comprimento l , de seção transversal a e resistividade ρ , tem em dada temperatura constante, uma resistência

$$R = \rho l / a \text{ ohms,}$$

onde ρ , l e a são um sistema consistente de dimensões (p. ex., em metros, a em metros quadrados, ρ em ohms por 1 metro de comprimento e 1 m^2 de seção transversal – geralmente abreviado para ohm-metros). A expressão acima, embora largamente aplicável, só é verdadeira na suposição de que a corrente é uniformemente distribuída sobre a seção transversal do condutor e flui em percursos paralelos às paredes-limite. Se esta suposição é inadmissível, é necessário recorrer à integração ou ao uso de linhas de fluxo de corrente. A Figura 2.6 resume as expressões para a resistência de certas composições e formas de condutores.

RESISTIVIDADE

A resistividade de condutores depende de sua composição, condição física (p. ex., umidade no caso dos não-metais), liga, fabricação e tratamento térmico, pureza química, trabalho mecânico e envelhecimento. O coeficiente de resistência de temperatura descreve a taxa de mudança de resistividade com a temperatura. É praticamente $0,004 \Omega$ por $\Omega^\circ\text{C}$ a 20°C para

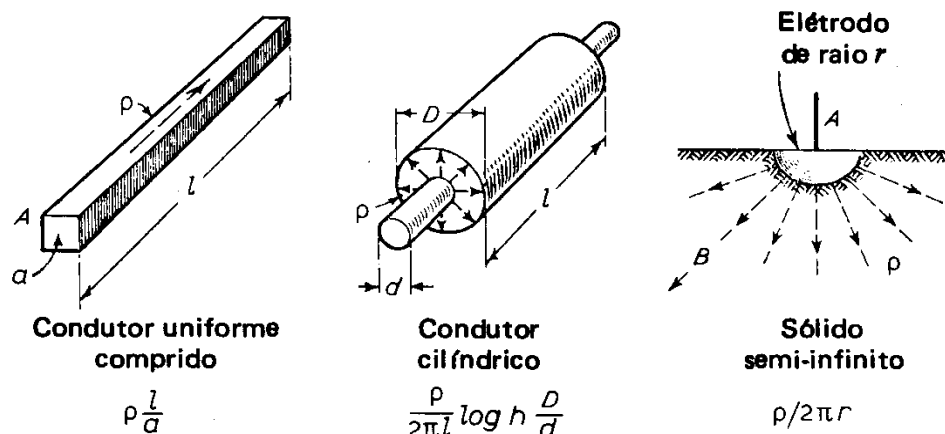


Figura 2.6 Resistência em casos particulares

ρ = resistividade de material condutor nas mesmas unidades como l , a , r , d e D .
As linhas tracejadas indicam a direção do fluxo de corrente

o cobre. Muitos metais puros têm uma resistividade que se eleva com a temperatura. Algumas ligas têm um coeficiente muito pequeno. O carbono é notável porque sua resistividade diminui marcadamente com o aumento de temperatura, enquanto que o dióxido de vanádio tem uma resistividade que cai no coeficiente 50 : 1 numa escala de algumas centenas de graus. A Tabela 2.2 enumera a resistividade ρ e o coeficiente de resistência de temperatura α para uma série de materiais representativos. O efeito da temperatura é avaliado de acordo com as expressões

$$R_1 = R_0(1 + \alpha\theta_1); R_2/R_1 = (1 + \alpha\theta_2)/(1 + \alpha\theta_1); \text{ ou } R_2 = R_1[1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)]$$

onde R_0 , R_1 , R_2 são as resistências às temperaturas 0 , θ_1 e $\theta_2^\circ\text{C}$, e α é o coeficiente de resistência de temperatura a 0°C .

CONDUTORES LÍQUIDOS

As variações de resistência de uma dada solução aquosa de um eletrólito com a temperatura seguem a regra aproximada

$$R\theta = R_0/(1 + 0,03\theta)$$

2-14 ELETROTECNOLOGIA

onde θ é a temperatura em °C. A condutividade (ou recíproco de resistividade) varia grandemente com a porcentagem de concentração da solução. Para baixas concentrações a variação é a indicada na *Tabela 2.3*.

Tabela 2.3.

CONDUTIVIDADE DE SOLUÇÕES AQUOSAS (mS/cm)

(a)	NaOH = soda cáustica	(g)	NaHCO ₃ = soda de cozinha
(b)	NH ₄ Cl = sal amoníaco	(h)	Na ₂ CO ₃ = cinza de soda
(c)	NaCl = sal comum	(j)	Na ₂ SO ₄ = sal de Glauber
(d)	NaNO ₃ = pedra de sal chilena	(k)	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·K ₂ SO ₄ = alúmen
(e)	CaCl ₂ = cloreto de cálcio	(l)	CuSO ₄ = vitríolo azul
(f)	ZnCl ₂ = cloreto de zinco	(m)	ZnSO ₄ = vitríolo branco

Porcentagem de concentração	a	b	c	d	e	f	g	h, j	k	l, m
1	40	18	12	10	10	8	6	4	3	3
2	72	35	23	20	20	16	12	8	6	6
3	102	51	34	30	30	24	18	12	9	8
4	130	65	44	39	39	32	23	16	11	10
5		79	55	48	47	39	28	20	13	11
7.5		110	79	69	67	54	39	29	18	16
10			99	90	85	69		31	22	20

EFEITOS DE FREQUÊNCIA

A resistência de um dado condutor é afetada pela frequência da corrente transportada por ele. O exemplo mais simples é de um fio isolado de uma seção transversal circular. A indutância das partes centrais do condutor é maior que a de fora por causa das ligações de fluxo adicional devidas às linhas de fluxo magnético internas. A impedância das partes centrais é conseqüentemente maior, e a corrente flui principalmente na e perto da superfície do condutor onde a impedância é menor. A seção transversal útil do condutor é menor que a área real e a resistência efetiva é, conseqüentemente, mais alta. Isto é chamado *efeito de superfície*. Um fenômeno análogo, o *efeito de proximidade*, é devido à indutância mútua entre os condutores dispostos aproximadamente paralelos um ao outro. Os efeitos dependem da dimensão do condutor, frequência f da corrente, resistividade ρ e permeabilidade μ do material. Para um condutor circular de diâmetro d o aumento da resistência efetiva é proporcional a $d^2 f \mu / \rho$. Em frequências de potência e para condutores pequenos, o efeito é desprezível. Pode, contudo, ser necessário investigar os efeitos de superfície e proximidade no caso de grandes condutores como as barras coletoras.

Resistores não-lineares

Salientes entre estes são os tubos de arco elétrico e termiônicos; também os carbeto de silício e materiais similares.

Arcos. Um arco elétrico constitui um condutor de dimensões um pouco vagas utilizando condução eletrônica e iônica num gás. É fortemente afetado por condições físicas de temperatura, pressão de gás e arrefecimento. No ar, à pressão normal, um arco de corrente contínua entre elétrodos de cobre tem uma relação de voltagem/corrente dada aproximadamente por $V = 30 + 10/I + I [I + 3/I] 10^3$ para uma corrente I e um comprimento de arco de l metros. A expressão é aproximadamente equivalente a 10 V/cm para grandes correntes de altas voltagens. A densidade de corrente varia entre 1 e 1 000 A/mm², sendo maior para correntes grandes por causa do efeito de *constricção*.

Carbeto de silício. Peças condutoras deste material têm uma relação corrente/voltagem expressa aproximadamente por $I = KV^x$, onde x fica habitualmente entre 3 e 5. Quando a voltagem aumenta, a corrente aumenta muito rapidamente, tornando o carbeto de silício aconselhável para a proteção de circuitos e a descarga do excesso de energia criado nas linhas de transmissão.

Aquecimento e esfriamento

O aquecimento de qualquer corpo tal como um resistor ou um circuito condutor contendo uma resistência é uma função das perdas que se verificam e que se transformam em calor. (Isto inclui as perdas de núcleo de dielétrico assim como as ôhmicas I^2R , mas o valor efetivo de R pode ser aumentado de forma a cobrir estas perdas adicionais.) O esfriamento é uma função dos dispositivos para dissipar calor para o meio exterior tal como o ar, óleo ou sólidos, por radiação, condução ou convexão.

AQUECIMENTO RÁPIDO

Se o tempo de aquecimento for curto, o esfriamento pode ser ignorado, sendo a temperatura alcançada dependente somente da taxa de desenvolvimento de calor e capacidade térmica. Se p for o calor desenvolvido por segundo em joules (i.é, a potência em watts), G o peso do corpo aquecido em quilogramas e c seu calor específico em joules por quilograma por kelvin, então

$$Gc \cdot d\theta = p \cdot dt, \text{ dando } \theta = (1/Gc) \int p \cdot dt.$$

Para aquecimento estável, a elevação de temperatura é p/Gc em K/s.

O cobre recozido padrão é freqüentemente usado para enrolamentos e ligações de equipamentos elétricos. Sua densidade é $G = 8\,900 \text{ kg/m}^3$ e sua resistividade a 20°C é $0,017 \mu\Omega\text{-m}$, a 75°C é $0,021 \mu\Omega\text{-m}$. Um condutor em trabalho a uma densidade de corrente J (em ampères por metro quadrado) tem uma perda específica (watts por quilograma) de $\rho J^2 / 8\,900$. Se $J = 2,75 \text{ MA/m}^2$ (ou $2,75 \text{ A/mm}^2$) a perda específica a 75°C é $17,8 \text{ W/kg}$, e sua taxa de aquecimento próprio é $17,8/375 = 0,048^\circ\text{C/s}$.

AQUECIMENTO CONTÍNUO

Sob um aquecimento prolongado estável um corpo atingirá uma elevação de temperatura acima do meio ambiente de $\theta_m = p/A\lambda$, onde A é a área de superfície de esfriamento e λ a dissipação específica de calor (joules por segundo por metro quadrado de superfície por grau de elevação de temperatura Celsius acima do ambiente). A expressão é baseada na suposição, aproximadamente verdadeira para elevações de temperatura moderadas, onde a taxa da emissão de calor é proporcional à elevação de temperatura. A dissipação de calor específica λ é composta dos efeitos da radiação, condução e convexão.

Radiação. O calor irradiado por uma superfície depende da temperatura absoluta T (dada por $T = \theta + 273$, onde θ é a temperatura Celsius), e de sua característica (suavidade ou aspereza de superfície, cor, etc.). A lei de Stefan de radiação de calor é

$$p_r = 5.7eT^4 \cdot 10^{-8} \text{ watts por metro quadrado}$$

onde e é o coeficiente da emissão de radiação, sempre menor que a unidade, exceto para a superfície de "corpo-negro" perfeito para a qual $e = 1$. A radiação de um corpo é independente da temperatura do meio onde é colocado. O processo de radiação de um corpo para uma superfície exterior é acompanhado por uma reabsorção de parte da energia quando reirradiada por aquela superfície. Para um corpo pequeno esférico com radiação dentro de uma cavidade grande esférica e/ou negra, a potência de radiação é dada pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$p_r = 5.7e_1[T_1^4 - T_2^4]10^{-8} \text{ watts por metro quadrado}$$

onde T_1 e e_1 se referem ao corpo e T_2 à cavidade.

2-16 ELETROTECNOLOGIA

A emissão de calor radiante de uma superfície de um corpo negro perfeito é independente da aspereza ou enrugamento da superfície. Contudo, se $e < 1$, há algum aumento de radiação se a superfície for áspera.

Condução. A condução de calor é uma função da temperatura térmica ou gradiente e resistividade térmica, sendo a última definida como diferença de temperatura em graus Celsius ao longo de um percurso de comprimento unitário e seção unitária requerido para a transmissão contínua de 1 W. Assim, o calor conduzido por área unitária ao longo de um percurso de comprimento x em um material de resistividade térmica ρ para uma diferença de temperatura de θ é

$$p_d = \theta / \rho x \text{ watts}$$

As resistividades para os metais são muito baixas. Para materiais isolantes tais como o papel, $\rho = 5-10$; para ar parado $p = 20$ W por $^{\circ}\text{C}$ por m e por m^2 , aproximadamente.

Convexão. As correntes de convexão em líquidos e gases (p. ex. óleo e ar) são sempre produzidas perto de uma superfície aquecida, exceto se com defletoras. A convexão contribui grandemente para a dissipação de calor, especialmente se estimulada artificialmente (como no esfriamento forçado por ventiladores). A experiência mostra que uma superfície áspera dissipa o calor por convexão mais rapidamente que uma superfície suave e que as velocidades altas de fluido são essenciais para obter *turbulência* de modo oposto ao fluxo de *linha de corrente*, sendo o primeiro muito mais eficaz.

A convexão é fisicamente um fenômeno muito complexo, porque depende de pequenas mudanças na flutuabilidade resultantes da elevação de temperatura devida ao aquecimento. As fórmulas para a dissipação de calor por convexão têm uma base fortemente empírica, tendo a forma e orientação das superfícies de convexão considerável influência.

Coeficiente de esfriamento. Para fins elétricos, o coeficiente de emissão λ derivado empiricamente, ou seu recíproco $1/\lambda$, são empregados para cálculos do esfriamento e elevação de temperatura de fios, resistores, máquinas e instalações semelhantes.

Medição da elevação de temperatura

A elevação de temperatura de um dispositivo desenvolvendo calor pode ser medida: (a) por um termômetro colocado em contato com a superfície cuja temperatura se pretende medir, (b) por detectores de resistência-temperatura ou termopares na superfície do dispositivo ou embebidos no mesmo, ou (c) por medidas da resistência (no caso de circuitos condutores) usando o coeficiente conhecido de resistência de temperatura. Estes métodos medem temperaturas diferentes e não fornecem meramente estimativas diferentes de uma mesma coisa.

Ciclos de aquecimento e esfriamento

Em alguns casos, um dispositivo (tal como uma máquina ou uma de suas partes) produzindo aquecimento interno pode ser considerado como suficientemente homogêneo para aplicar a lei exponencial. Suponhamos que o dispositivo tem uma elevação de temperatura θ depois de um intervalo de tempo t . Num elemento de tempo dt ocorre uma pequena elevação de temperatura $d\theta$. O calor desenvolvido é $p \cdot dt$, o calor armazenado é $Gh \cdot d\theta$ e o calor dissipado é $A\theta\lambda \cdot dt$. Visto que os calores armazenado e dissipado são ambos iguais ao calor total produzido,

$$Gh \cdot d\theta + A\theta\lambda \cdot dt = p \cdot dt,$$

a solução da qual é

$$\theta = \theta_m [1 - \exp(-t/\tau)]$$

onde θ_m é a elevação de temperatura estável final calculada por $\theta_m = p/A\lambda$, e $\tau = Gh/A\lambda$ é chamada *constante de tempo de aquecimento*. Para o período de tempo t igual à constante de tempo

$$\theta = \theta_m [1 - \exp(-1)] = 0.632\theta_m.$$

de modo que a constante de tempo pode ser definida como o tempo para a elevação de temperatura atingir 63,2 por cento de seu valor estável final.

Boa ventilação dá uma constante de tempo pequena, visto que $\tau = Gh/A\lambda$, e λ é grande. Com corpos grandes e mal ventilados, a constante de tempo pode ser muitas horas.

Quando um corpo quente é esfriado devido a uma redução ou interrupção das perdas produzidas nele, a curva de tempo/temperatura é a função exponencial

$$\theta = \theta_m \exp(-t/\tau_1),$$

onde τ_1 é a constante de tempo de esfriamento, não necessariamente a mesma que para condições de aquecimento.

Tanto o aquecimento como o esfriamento como foram descritos são exemplos de *transientes térmicos*, e as leis que os regulam são rigorosamente análogas às relacionadas com correntes elétricas transientes, nas quais também ocorrem relações de tempo exponencial.

Correntes de fusão

Para um dado diâmetro d , o calor produzido por um fio transportando uma corrente I é inversamente proporcional a d^3 , porque um aumento de diâmetro reduz a densidade da corrente em proporção ao aumento da área, e a superfície emitente é aumentada em proporção ao diâmetro. A elevação de temperatura é conseqüentemente proporcional a I^2/d^3 . Se a temperatura for elevada ao ponto de fusão, $\theta = aI^2/d^3$ e a corrente de fusão é

$$I = \sqrt{(\theta d^3/a)} = kd^{3/2}.$$

Esta é a *lei de Preece*, da qual pode ser feita uma estimativa da corrente de fusão de um fio de um determinado diâmetro, desde que k seja conhecido. O expoente 3/2 e o valor de k são ambos muito afetados pelo fechamento, condução de calor por terminais, e condições físicas semelhantes.

É óbvio que qualquer regra se relacionando com densidades de corrente apropriadas dando um valor independente do diâmetro é provavelmente muito baixa e não econômica para fios pequenos e excessiva para grandes. Além disso, os efeitos de comprimento e fechamento tornam não confiável a aplicação direta da lei de Preece. Para fios pequenos, o expoente x no termo d^x pode ser 1,25–1,5, e para fios grandes, pode exceder 1,5.

F.E.M. térmica

Um efeito conhecido como *termoelétrico* ou *efeito de Seebeck* é aquele pelo qual é produzida uma f.e.m. devido a uma diferença de temperatura entre duas junções de condutores desiguais no mesmo circuito. O *efeito de Thomson* ou *Kelvin* é (a) que uma f.e.m. é desenvolvida devido a uma diferença de temperatura entre duas partes do mesmo condutor, e (b) que uma absorção ou liberação de calor sucede quando uma corrente flui de uma parte mais quente para uma mais fria do mesmo material. O *efeito de Peltier* descreve a liberação ou absorção de calor numa junta onde a corrente passa de um material para outro, pelo qual a junta se torna aquecida ou esfriada.

Na *Figura 2.7 (a)–(c)* os símbolos são temperatura absoluta T , f.e.m. térmica E , e taxa de produção ou absorção de calor Q . O *coeficiente de Seebeck* (α) é a f.e.m. por grau de diferença entre junções quentes e frias:

$$\alpha_s = \Delta E / \Delta T$$

As f.e.m.s típicas para um número de junções comuns são dadas na *Tabela 2.4*. No efeito de Peltier (b) uma taxa de geração de calor (reversível e distinta do calor irreversível I^2R) resulta da passagem de uma corrente i através de condutores diferentes A e B . O *coeficiente de Peltier* é

$$\alpha_p = Q/i$$

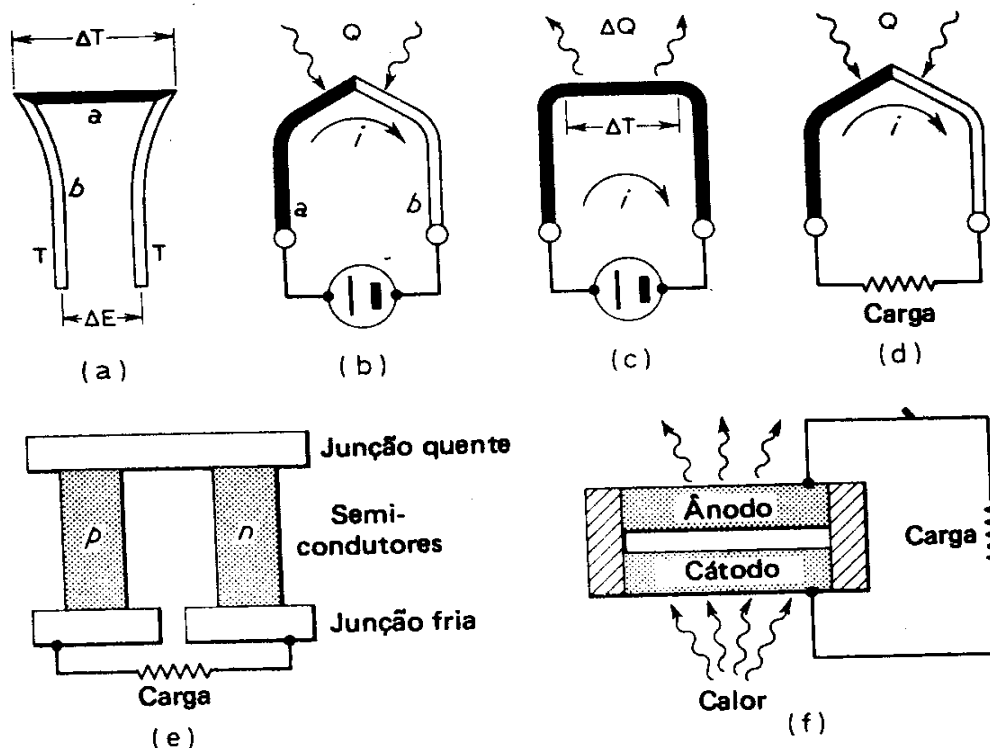


Figura 2.7 Efeitos termoeletricos

O efeito de Thomson (c) diz respeito à taxa de calor reversível quando uma corrente i flui através de um comprimento de condutor homogêneo através do qual há uma diferença de temperatura. O coeficiente de Thomson é

$$\alpha_T = \Delta Q / i \cdot \Delta T$$

A relação entre os coeficientes de Seebeck e Peltier é importante; é

$$\alpha_S = \alpha_P / T$$

Tabela 2.4.

F.E.M.S DE PARES TERMOELÉTRICOS (mV): JUNÇÃO FRIA A 0 °C

Junção quente Temperatura, °C	Platina Pt—13% Rh	Cromo/Alúmen	Ferro/Eureka	Cobre/Eureka
100	0.65	4.1	5	4
200	1.46	8.1	11	9
400	3.40	16.4	22	21

O coeficiente de Seebeck é o mais facilmente medido, mas o coeficiente de Peltier determina o efeito de esfriamento de um refrigerador termoeletrico.

Dispositivos termoeletricos

Se a corrente flui através de um par termoeletrico, Figura 2.7 (b), com uma ligação em contato térmico com um reservatório de calor, o outro remove calor de uma fonte. O par deve compreender condutores com coeficientes de Seebeck positivos e negativos respectivamente. A composição é um *refrigerador* com vantagens práticas de simplicidade e silêncio.

Uma fonte de calor aplicada a uma ligação produz uma f.e.m. que circulará uma cor-

rente numa carga externa, *Figura 2.7 (d)*. Se **semicondutores** de condutividade térmica baixa são usados em vez de metais para os elementos do par, é obtida uma eficiência melhor porque a perda de calor por condução é reduzida. Os pares (e) de um gerador de potência termoelétrica são construídos com materiais de tipo *p* e *n*. A eficiência, limitada pelas considerações de ciclo Carnot, não excede presentemente 10 por cento.

Um gerador de par termoelétrico no qual um elemento é uma corrente de elétrons ou plasma é um *gerador termiônico*, com efeito um diodo com o cátodo plano e ânodo muito juntos. Por causa de sua energia cinética, os elétrons emitidos do cátodo alcançam o ânodo contra um potencial de ânodo negativo e pequeno, fornecendo corrente para um circuito externo, *Figura 2.7 (f)*. A função de trabalho do material do ânodo deve ser menor que para o cátodo. O dispositivo é uma máquina térmica operando sobre a queda de temperatura de cátodo-ânodo com elétrons fornecendo o "fluido de trabalho".

Saídas de 2 kW/m² a um rendimento de 25 por cento podem ser atingidas quando o dispositivo tiver sido completamente desenvolvido e se ultrapassarem os efeitos de carga no espaço. O aquecimento do cátodo por energia solar é uma possibilidade.

EFEITOS ELETROQUÍMICOS

Eletrólise aquosa

Se um condutor líquido for submetido a mudanças químicas quando a corrente passa através dele, o efeito será imputado ao movimento das partes constituintes das moléculas do *eletrólito* líquido, chamados *íons*, os quais têm carga elétrica positiva ou negativa. Os íons positivos se movem para o eletrodo negativo (cátodo) e os íons negativos para o eletrodo positivo (ânodo). O movimento iônico é a razão da condução de corrente. Os íons alcançando os eletrodos têm suas cargas neutralizadas e podem ficar sujeitos a mudanças químicas. Hidrogênio e íons metálicos são eletropositivos: os não-metais da família do cloro (Cl, Br, I e F) e radicais ácidos (tais como SO₄, NO₃) formam íons negativos na solução. Como exemplos, o ácido hidrocloreto, HCl, forma íons de H⁺ e Cl⁻; o ácido sulfúrico forma íons 2H⁺ e SO₄²⁻; e o hidróxido de sódio, NaOH, forma íons Na⁺ e OH⁻. Os produtos da eletrólise dependem da natureza do eletrólito. As soluções básicas de sódio ou hidróxidos semelhantes produzem gases de H₂ e O₂ no cátodo e ânodo, respectivamente. As soluções ácidas dão produtos dependendo da natureza dos eletrodos. As soluções de sais de metais com eletrodos apropriados resultam na deposição eletrolítica.

Lei da eletrólise

A massa do íon de um elemento ou radical nele depositado, dissolvido de ou ficando livre de qualquer eletrodo, é proporcional à quantidade de eletricidade passada através da célula eletrolítica e ao peso iônico do material, e inversamente proporcional à valência do íon; onde a massa m_e em equivalentes de quilograma é o produto (z em equivalente de quilograma por coulomb) $\times$ (Q em coulombs). O valor de z é uma constante natural 0,001036. Os algarismos representativos (por conveniência em miligramas por coulomb) são dados na *Tabela 2.5*.

Polarização

Para fazer passar uma corrente através de um eletrólito, deve ser aplicada uma d.d.p. aos eletrodos para ultrapassar a queda de resistência do eletrólito, e para ultrapassar a f.e.m. da *polarização*. A última é devida a uma queda através de uma película fina de gás, ou através de uma forte concentração iônica, num eletrodo.

Todas as reações químicas podem ser representadas como reações de dois eletrodos. A d.d.p. algébrica entre as duas é a medida da reatividade. Uma d.d.p. altamente negativa representa uma reação espontânea que poderá ser usada para gerar uma corrente. Uma d.d.p. altamente positiva representa uma reação necessitando de uma d.d.p. externa para mantê-la.

M. G. SAY

Ph.D., M.Sc., C.Eng., A.C.G.I., D.I.C., F.I.E.E., F.R.S.E.

Colaboradores **especializados**

MANUAL DO ENGENHEIRO ELETRICISTA

**Unidades e grandezas físicas • Eletrotecnologia •
Análise de redes • Materiais**

Alexandre Luiz Bertozzi
ENG. ELETRICA

