

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
ELÉTRICA**

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MANUAL DIDÁTICO: Introdução a Circuitos Elétricos

**Allan Shigueto Akishino
Thelma Solange Piazza Fernandes**

Dezembro-2006

MANUAL DIDÁTICO: Introdução a Circuitos Elétricos

SUMÁRIO

1. Conceitos Básicos.....	1
2. Elementos de Circuitos.....	10
3. Circuitos Resistivos.....	16
4. Medição de Grandezas Elétricas.....	31
5. Técnicas de Análise de Circuitos.....	39
6. Teoremas de Circuitos Elétricos.....	50
7. Elementos armazenadores de energia.....	65
8. Análise de Circuitos RL e RC.....	76
9. Análise de Circuitos RLC.....	89

Capítulo I

Conceitos Básicos

1.1 Grandezas Elétricas

1.1.1 Carga

Carga elétrica é a propriedade elétrica das partículas atômicas que compõem a matéria, medida em coulomb (C). Existem três propriedades relacionadas à carga elétrica:

- O coulomb é uma unidade muito grande. Em 1 C cabem $6,24 \cdot 10^{18}$ elétrons. Portanto, valores observados em laboratório são da ordem de pC, nC ou μC .
- De acordo com observações experimentais, as únicas cargas que podem ocorrer na natureza são múltiplos da carga eletrônica $e = -1,602 \cdot 10^{-19}$ C.
- A lei de conservação de carga afirma que não se pode criar ou destruir cargas elétricas, apenas as transferir. Portanto, a soma algébrica das cargas elétricas em um sistema não pode ser alterada.

1.1.2 Corrente

Corrente elétrica é a taxa de variação de cargas elétricas em relação ao tempo e é medida em ampères, ou seja, é a quantidade de cargas elétricas que atravessam uma superfície de referência por unidade de tempo:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad [\text{A}] \quad (1.1)$$

Existem dois tipos de corrente que são tipicamente empregados em circuitos elétricos e que são definidos como:

- Corrente contínua (CC) é aquela que não varia com o tempo.
- Corrente alternada (CA) é a corrente que varia senoidalmente com o tempo.

1.1.3 Tensão

A tensão (força eletromotriz ou diferença de potencial) entre dois pontos 'a' e 'b' de um circuito é a energia necessária para mover uma unidade de carga deste ponto 'a' para o ponto 'b'. Sua unidade de medida é o volt (V) e pela definição fica evidente que 1 V corresponde a um joule por coulomb:

$$U_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad [\text{V}] \quad (1.2)$$

Exemplo 1.1: Uma carga de 5 kC passa através de um elemento de circuito, requerendo-se uma energia total de 20 MJ. Calcular a tensão elétrica sobre tal elemento.

Exemplo 1.2: Uma corrente constante de 2 A circula através de um elemento. A energia requisitada pra mover tal corrente por 1 segundo é de 10 J. Obter a tensão sobre o elemento.

1.1.4 Potência

Da física, potência é o trabalho em função da variação do tempo. Então:

$$P = \frac{\text{trabalho}}{\text{tempo}} = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (1.3)$$

Supõe-se que ΔQ (uma carga que pode ser considerada infinitesimal) se desloca do ponto A para o ponto B de um condutor como mostra a figura 1.1.

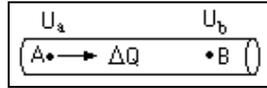


Figura 1.1: Movimento de carga em um condutor

Então para o movimento dessa carga:

$$W = (U_a - U_b) \cdot \Delta Q \quad (1.4)$$

Considerando que: $U = U_a - U_b$

$$W = U \cdot \Delta Q \quad (1.5)$$

Logo:

$$P = \frac{U \cdot \Delta Q}{\Delta t} \quad (1.6)$$

Contudo, utilizando a definição de corrente $I = \Delta Q/\Delta t$, tem-se:

$$P = U \cdot I \quad [\text{VA ou W}] \quad (1.7)$$

A potência no resistor é dissipada na forma de calor num efeito denominado Efeito Joule.

Já a energia é definida como o produto da potência elétrica P pelo intervalo de tempo:

$$E = P \cdot t \quad [\text{J no SI ou mais usualmente kWh}] \quad (1.8)$$

1.1.5 Elementos Ativos e Passivos

Elementos ativos são aqueles que fornecem potência para o circuito ($P=U \cdot I > 0$). Os sinais positivo e negativo para um elemento ativo são convencionados conforme mostra a figura 1.1.

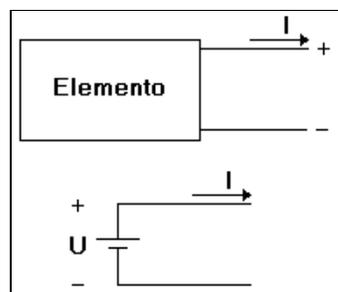


Figura 1.2: Convenção de elemento ativo.

Elementos passivos são aqueles que recebem potência do circuito ($P=U \cdot I < 0$) e a convenção de sinais é mostrada na figura 1.3.



Figura 1.3: Convenção de elementos passivos.

Exemplo 1.3: Determine a potência que está sendo fornecida ou recebida pelos elementos.



1.2 Sistemas de Unidades

1.2.1 Aspectos gerais

Medida é um processo de comparação de grandezas elétricas de mesma espécie, ou seja, de grandeza que se definem de um padrão único e comum a ambas.

Quando duas grandezas se apresentam como de mesma espécie, diz-se que elas têm a mesma dimensão.

Medir uma grandeza é, portanto, compará-la com grandeza de mesma espécie, e determinar a proporção entre ambas. A grandeza que serve de comparação é denominada “grandeza unitária” ou “padrão unitário”.

As grandezas físicas são englobadas em duas categorias:

- Grandezas derivadas;
- Grandezas fundamentais.

As grandezas *derivadas* são aquelas cuja definição se baseia em outras grandezas físicas. Por exemplo: velocidade, aceleração, etc...

As grandezas *fundamentais* são as grandezas definidas operacionalmente, e não como função de outras grandezas físicas. Essas definições ficaram mais claras na seqüência.

Escolhidas e definidas as grandezas fundamentais, determinam-se as grandezas derivadas. Estabelecida a coerência dimensional entre as grandezas fundamentais e derivadas, faz-se a sua nomenclatura, determina-se o método de obtenção dos múltiplos e dos submúltiplos e têm-se estruturado um sistema de unidade.

No decorrer da evolução da física, qualquer sistema de unidade era estabelecido conforme as conveniências do trabalho. As grandezas fundamentais eram arbitradas de acordo com a conveniência e, não raro, ocorria a situação de uma grandeza se apresentar como fundamental em um sistema e derivada em outro.

Procurou a ciência por fim a esse estado de coisas, objetivando a necessidade de um sistema de unidades completo (que abrangesse todos os fenômenos físicos), racional (com um mínimo de constantes de transformação) e coerente (com algumas poucas dimensões se definem todas as grandezas derivadas).

Em 1901, o engenheiro italiano Giorgi elaborou um sistema de padrão de unidades bastante coerente. Denominado de MKS, o Sistema Giorgi constitui, com algumas alterações, a base sobre a qual se definiu o sistema internacional de unidades, conhecido pela sigla SI.

O SI foi internacionalmente oficializado na 11^a Conferência Geral de Pesos e Medidas em 1960. O emprego do SI no Brasil se fez logo em seguida, em 28 de fevereiro de 1967, pelo decreto lei número 240.

O SI adota algumas grandezas fundamentais. Essas grandezas são mostradas na tabela 1.1.

Tabela 1.1: Unidades do Sistema Internacional (SI)

Grandeza	Unidade básica	Símbolo
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Corrente elétrica	ampère	A
Temperatura termodinâmica	kelvin	K
Intensidade luminosa	candela	cd
Quantidade de Matéria	mol	mol

Todas estas grandezas são de diferentes espécies, e em conjunto abrangem toda a Física.

Existem ainda as grandezas suplementares que foram agregadas ao SI por conveniência: ângulo plano [rad] e ângulo sólido [sr].

A partir das grandezas fundamentais, por relações entre elas se definem as grandezas derivadas. Por exemplo, a velocidade é a derivada do deslocamento em relação ao tempo. Dimencionalmente: $v = LT^{-1}$.

A grandeza elétrica fundamental no SI é a intensidade de corrente. Define-se o ampère como sendo a intensidade de corrente que mantida entre dois condutores retilíneos paralelos, de comprimento infinito e seções transversais desprezíveis, distantes de um metro entre si, faz aparecer entre eles, uma força de 2×10^{-7} N/m no vácuo.

A primeira unidade derivada da corrente é a quantidade de eletricidade, ou carga elétrica.

$$Q = I \cdot T \quad (1.9)$$

A unidade SI de carga elétrica chama-se coulomb (C).

Uma definição comum em livros de Eletricidade (inclusive a adotada neste manual didático) é a corrente elétrica como sendo a relação entre a quantidade de cargas que passam por determinado ponto em uma unidade de tempo. Esta definição não é válida no SI, porque significaria ser a intensidade de corrente elétrica uma grandeza derivada e a carga elétrica uma grandeza fundamental. Atualmente, não se pode aceitar

a carga elétrica como grandeza fundamental, por não ser possível a construção de padrões de carga.

A Tabela 1.2 apresenta uma lista de múltiplos e submúltiplos utilizados no SI.

Tabela 1.2: Tabela de múltiplos e submúltiplos do SI.

Multiplicador	Prefixo	Símbolo
10^{18}	exa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^2	hecto	h
10	deca	da
10^{-1}	deci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	mili	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	fento	f
10^{-18}	ato	A

As unidades legais que devem ser utilizadas em documentos oficiais e em transações comerciais são:

- Unidades do SI;
- Unidades fora do SI, mas admitidas para uso sem restrição de prazo;
- Unidades fora do SI admitidas temporariamente devem sempre que possível ser evitadas.

Todas as unidades elétricas do SI são contrações nominativas, e decorrem de homens que deram de seu esforço e capacidade para o progresso deste ramo da física que é a eletricidade.

Antes do surgimento do SI, havia em eletricidade, sistemas de unidades:

- Prático, ou MKS não-racionalizado;
- CGS eletrostático (CGSE);
- CGS magnético (CGSM);
- CGS simétrico.

O primeiro era o sistema empregado nos cálculos de engenharia. Quase todas as unidades tinham os atuais nomes do SI, mas definidas por outros padrões que não os do SI.

Os dois sistemas seguintes denominavam-se também “absolutos”. Os mesmos podem ser ainda encontrados em uso em muitos livros.

O sistema CGS simétrico também era denominado de CGS gaussiano, em homenagem ao seu criador, Gauss.

Com o advento do SI, todos os sistemas foram banidos, mas muitas denominações de grandezas se encontram em uso.

Para a condutância, ao lado dos siemens se encontra em uso ainda o mho. Para o fluxo de indutância magnética, encontra-se o nome de maxwell (Mx): $Mx = 10^{-8}$ Wb

Para a indução magnética, usa-se ainda o gauss (G) equivalente a 10^{-4} tesla.

Sem dúvida um sistema internacional de unidades proporciona uma linguagem comum entre técnicos e cientistas facilitando assim a comunicação e trazendo benefícios para o comércio internacional.

1.2.2 Regras Gerais do SI

a) *Grafia dos nomes de unidades*

Quando escritos por extenso, os nomes de unidades começam por letra minúscula, mesmo quando têm o nome de um cientista (por exemplo, ampère, kelvin, newton, etc...), exceto o grau Celsius (ou no início de frase).

Na expressão do valor numérico de uma grandeza, a respectiva unidade pode ser escrita por extenso ou representada por seu símbolo (por exemplo, cinco quilovolts por milímetro ou 5 kV/mm). Não são admitidas combinações de parte escrita por extenso com parte expressa por símbolo, como, por exemplo, “5 kohm.m”, em vez de cinco quiloohms-metros ou 5 kΩ.m.

b) *Grafia dos símbolos de unidades*

Os símbolos são invariáveis, não sendo admitido colocar, após o símbolo, ponto de abreviatura, “s” de plural, sinais, letras ou índices. Por exemplo, metros = m (e não “m.”, “ms” ou “mt”); $U_p = 5 \text{ mV}$ (e não “ $U = 5 \text{ mV}_p$ ”), $I_{\text{máx}} = 50\text{mA}$ (e não “ $I = 5 \text{ mA}_{\text{Max}}$ ”).

O símbolo deve ser escrito no mesmo alinhamento do número a que se refere.

Os símbolos SI podem coexistir num símbolo composto por multiplicação ou divisão. Ex: kΩ.mA; kV/μs. Contudo, não devem ser utilizados prefixos decimais combinados. Por exemplo: “2,2 kpF” em vez de 2,2 nF ou “4,7 μμF” em vez de 4,7 pF. Os símbolos de uma mesma unidade podem coexistir num símbolo composto por divisão. Por exemplo: Ω.mm²/m, kWh, etc....

O símbolo de uma unidade composta por multiplicação pode ser formado pela justaposição dos símbolos componentes, e que não cause ambigüidade (VA, kWh, etc...), ou mediante a colocação de um ponto entre os símbolos componentes, na base da linha ou a meia altura (N.m, ou N·m, m.s⁻¹, etc...). Exemplo de um caso ambíguo: 7 m.V (sete metros volts) é diferente de 7 mV (sete milivolts).

O símbolo de uma unidade que contém divisão pode ser formado por uma das três maneiras exemplificadas a seguir: $W/(sr.m^2)$, $W.sr^{-1}.m^{-2}$ ou $\frac{W}{sr \cdot m^2}$.

Quando um símbolo com prefixo tem expoente, deve-se entender que esse expoente afeta o conjunto prefixo-unidade, como se esse conjunto estivesse entre parênteses. Por exemplo: $dm^3 = 10^{-3} m^3$; $mm^3 = 10^{-9} m^3$.

É incorreto intercalar-se símbolos entre partes inteiras e decimais. Exemplo: 5K6Ω em vez de 5,6 kΩ.

Não é incomum se encontrar falhas e omissões conflitantes como os exemplos citados na Tabela 1.3.

Tabela 1.3: Erros comuns no emprego de prefixos de unidades.

Forma incorreta	Forma correta
“BIT” ou “b”	bit
“BYTE” ou “B”	byte
“CC” ou “cc”	cm ³
“eletronvolt” ou “eletron.volt”	eletro-volt (eV)
“FP”	fp (fator de potência)
“fp”	FP (fator de perda)
“a grama” e “o grama”	o grama
“grau centígrado”	grau Celsius (°C)
“grau kelvin” ou “°K”	kelvin ou K
“MIPS”	Mips (mega instruction per second)
“mho”	siemens
“PPM”	ppm (parte por milhão)
“RMS”	rms
“RPM”	rpm (rotações por minuto)
“ton.”	t (tonelada)
5 “Vp”	U _{max} = 5V
Var	Var (volt-ampère reativo)

c) *Pronúncia dos nomes das unidades*

Deve obedecer às regras de pronúncia de suas respectivas línguas de origem, exceto quando houver palavra homógrafa (palavras que tem a mesma grafia de outra, porém sentidos diferentes) em português. Por exemplo: byte (“bait” e não ‘bite’), coulomb (‘culómb’ e não ‘cúlomb’); joule (‘djúle’ e não ‘jáule’ ou ‘joule’); siemens (‘simens’ e não ‘ciemens’); watt (‘uót’ e não ‘vat’); weber (‘vêbear’ e não ‘véber ou uéber’), daí a importância de constar-se o país de origem de cientistas cujos nomes resultaram em unidades.

d) *Pronúncia dos múltiplos e submúltiplos decimais*

Prevalece a sílaba tônica da unidade. As palavras quilômetro, decímetro e milímetro, consagradas pelo uso com o acentoônico deslocado para o prefixo, são as únicas exceções; assim sendo, os outros múltiplos e submúltiplos decimais do metro devem ser pronunciados com o acentoônico na penúltima sílaba, por exemplo, megametro, micrometro (distinto de micrômetro, instrumento de medição), nanometro, etc....

e) *Grafia dos números*

A regra geral é separar-se, com um ou meio espaço, grandes números em grupos de três, para facilitar a leitura, sendo admissível serem escritos sem separação (principalmente em documentos que possibilitem fraudes. Exemplo: 7 500,5 V ou 7500,5 V. Para separar a parte inteira da decimal é empregada a vírgula, quando o valor absoluto do número é menor que 1, coloca-se zero a esquerda da vírgula).

Excetuam-se os casos de números que não representam quantidade. Exemplo: número de telefone, EP, CIC, códigos, etc.... Quantias em dinheiro ou mercadorias para efeitos fiscais, que para evitar fraudes sem dificultar a leitura, devem conter ponto de separação em grupos de 3 algarismos, a esquerda ou a direita da vírgula. Exemplo: R\$11.465,80.

f) *Plural dos nomes de unidades*

Sendo internacionais, as unidades de medida no plural seguem a regras práticas particulares de cada língua. Excetuam-se os casos dos nomes entrarem em uso vulgar, quando passam a figurar em dicionários. Algumas dessas exceções são mostradas na tabela 1.4.

Tabela 1.4: Plurais incomuns.

Singular	Plural	
	Forma correta	Forma incorreta
ampère	ampères	ampèrs
angstrom	angstroms	angstrons
bar	bars	bares
decibel	decibels	decibéis
henry	henrys	henries
mol	mols	moles
pascal	pascals	pascais

As unidades em geral recebem apenas “s” no plural quando são:

- i. Palavras compostas em que o elemento complementar de um nome de unidade não é ligado a este por hífen. Exemplo: metros quadrados, milhas marítimas, etc...;
- ii. Termos compostos por multiplicação, em que os componentes podem variar independentemente um do outro. Exemplo: ampères-horas, ohms-metros, watts-segundos, etc...

Os nomes ou partes dos nomes das unidades no plural, não são acrescidos da letra “s”, quando:

- i. Terminam pelas letras “s”, “x”, “z”. Exemplos: siemens, lux, hertz;
- ii. Correspondem ao denominador de unidades compostas por divisão. Exemplo: ohms por quilômetro (Ω/km), quilômetros por hora (km/h);
- iii. São elementos complementares de nomes de unidades e ligados a este por hífen ou preposição. Exemplo: quilogramas-força (kgf), anos-luz, elétron-volt, etc...

Obs: Conforme descrito no item ‘b’ (grafia dos símbolos das unidades), os símbolos do SI são invariáveis. Exemplo: 5 kg = cinco quilogramas (e não “5kgs”).

Exercícios

1.1 Grandezas elétricas

E1.1 Defina:

- a) Carga elétrica;
- b) Corrente elétrica;
- c) Tensão elétrica;
- d) Potência elétrica;
- e) Elementos ativos e passivos.

1.2 Sistemas de unidades

E1.2 Marque com c (condizente), os itens que estão de acordo com as regras gerais do SI, e com n (não condizente) os itens que não estão dentro dos padrões do SI.

a) () 6 kohm.m	b) () 7 m.V = 7 milivolts
c) () 1,2 quiloohm-metros	d) () $\text{mm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$
e) () 7 Ampère/metro	f) () 5K6 Ω
g) () 10 Kelvin	h) () 2 eletronvolt
i) () 25° Celsius	j) () 6 siemens
k) () 10 mA _{Max}	l) () 10 milihenries
m) () 10 V _{pp}	n) () 20 Webers
o) () 2,2 kpF	p) () 10 metros quadrados
r) () 50 VA	q) () 20 ampère-hora

E1.3 Preencha o quadro abaixo indicando o nome da unidade por extenso e o símbolo, conforme o modelo:

Cientista homenageado	Unidade	Símbolo
André-Marie Ampère	<i>ampère</i>	A
Anders Celsius		
Gerorg Simon Ohm		
James Watt		
James Prescott Joule		
Charles Augustin Coulomb		
Michel Faraday		
Joseph Henry		
Heinrich Hertz		
Alessandro Volta		