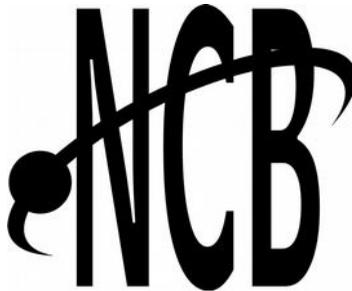


**Newton C. Braga**

**CURSO DE ELETRÔNICA  
VOLUME 7**

**SEMICONDUCTORES DE POTÊNCIA**

Editora Newton C. Braga  
São Paulo - 2014



**Instituto NCB**

[www.newtoncbraga.com.br](http://www.newtoncbraga.com.br)  
[leitor@newtoncbraga.com.br](mailto:leitor@newtoncbraga.com.br)

CURSO DE ELETRÔNICA – VOLUME 7 – SEMICONDUTORES DE POTÊNCIA

**Autor:** Newton C. Braga  
São Paulo - Brasil - 2014

**Palavras-chave:** Eletrônica - Engenharia Eletrônica - Componentes - Semicondutores - Potência- Automação - Mecatrônica - Robótica - Controle - Eletrônica Industrial

Copyright by  
INSTITUTO NEWTON C BRAGA.  
1ª edição

Todos os direitos reservados. Proibida a reprodução total ou parcial, por qualquer meio ou processo, especialmente por sistemas gráficos, microfilmicos, fotográficos, reprográficos, fonográficos, videográficos, atualmente existentes ou que venham a ser inventados. Vedada a memorização e/ou a recuperação total ou parcial em qualquer parte da obra em qualquer programa juscibernético atualmente em uso ou que venha a ser desenvolvido ou implantado no futuro. Essas proibições aplicam-se também às características gráficas da obra e à sua editoração. A violação dos direitos autorais é punível como crime (art. 184 e parágrafos, do Código Penal, cf. Lei nº 6.895, de 17/12/80) com pena de prisão e multa, conjuntamente com busca e apreensão e indenização diversas (artigos 122, 123, 124, 126 da Lei nº 5.988, de 14/12/73, Lei dos Direitos Autorais).

**Diretor responsável:** Newton C. Braga  
**Diagramação e Coordenação:** Renato Paiotti

# Índice

<b>Apresentação.....</b>	<b>6</b>
<b>Introdução.....</b>	<b>7</b>
<b>Capítulo 1 - Unidades – Energia.....</b>	<b>8</b>
-1.1 - Eletrônica de Potência.....	8
-1.2 - Unidades Elétricas.....	9
-1.3 - Potência contínua e alternada.....	23
-1.4 - Alternadores.....	31
-1.5 - Energia bifásica e trifásica.....	32
-1.6 - Potência Ativa e Potência reativa .....	35
-1.7 - Impedância.....	38
-1.8 - Múltiplos e Submúltiplos das Unidades de Potência, Corrente e tensão.....	42
<b>Capítulo 2 - Diodos.....</b>	<b>47</b>
-2.1 - Como funciona o diodo.....	48
-2.2 – O diodo semicondutor.....	50
-2.3 – Tipos de diodos.....	56
-2.4 - Diodos Retificadores de Silício.....	56
-2.5 – Especificações dos diodos de silício.....	58
-2.6 - Retificação .....	63
-2.7 - Diodos em Paralelo.....	71
-2.8 – Diodos em série.....	73
-2.9 - Surtos de Corrente.....	74
- 2.10 - Diodos de Recuperação Rápida.....	75
-2.11 – O diodo zener.....	80
<b>Capítulo 3 - Transistores Bipolares de Potência.....</b>	<b>90</b>
-3.1 – O transistor bipolar de potência.....	91
-3.2 -Darlington.....	97
- 3.3 – Materiais.....	99
-3.4 – SOAR ou SOA.....	102
-3.5 – Segunda Ruptura .....	106
-3.6 – Deriva Térmica.....	109
-3.7 - Especificações.....	115
-3.8 – Transistores de Alta Tensão.....	126

<b>Capítulo 4 - MOSFETs de Potência.....</b>	<b>130</b>
-4.1 – O MOSFET de potência.....	131
-4.2 – Invólucros.....	147
-4.3 – SOAR.....	148
-4.4 – Características e Especificações.....	149
- 4.5 – Tempos.....	151
- 4.6 – Cuidados no Uso .....	157
<b>Capítulo 5 - Os IGBTs.....</b>	<b>169</b>
-5.1 – O IGBT.....	170
-5.2 – SOA.....	181
-5.3 – Invólucros.....	183
-5.4 – Características e especificações.....	185
-5.6 – Comparação entre MOSFETs e IGBTs - Qual o melhor em aplicações até 100 kHz? .....	193
-5.7 - Como Testar IGBTs.....	201
<b>Capítulo 6 - Tiristores – O SCR.....</b>	<b>209</b>
-6.1 – Estrutura e funcionamento do SCR.....	210
-6.2 – Especificações.....	218
-6.3 – Considerações sobre o uso.....	224
-6.4 - Circuitos de corrente contínua.....	225
-6.5 - Circuitos de corrente alternada.....	232
-6.6 - Problemas de interferências (RFI).....	237
-6.7 - GTO .....	239
<b>Capítulo 7 - Tiristores – O Triac.....</b>	<b>245</b>
-7.1 – Estrutura do Triac.....	247
-7.2 – Invólucros.....	250
-7.3 – Especificações do Triac.....	252
-7.4 - Quadrac .....	258
-7.5 – Interferências.....	260
-7.6 – Como usar corretamente tiristores.....	260
<b>Capítulo 8 - Tiristores – Outros Dispositivos.....</b>	<b>276</b>
- 8.1 - SUS.....	277
- 8.2 - SBS.....	281
- 8.3 - DIAC.....	285

-8.4 - PUT .....	291
-8.5 - SIDAC .....	297
-8.6 - LASCR.....	304
-8.7 - Disparadores e Chaves Ópticas.....	305
-8.8 - IGCT.....	311
-8.9 - ESBT.....	312
<b>Capítulo 9 - Dissipadores de Calor.....</b>	<b>317</b>
-9.1 - Geração de Calor.....	318
-9.2 - Lei de Joule.....	324
-9.3 - O dissipador de calor .....	327
-9.4 - Ventilação forçada.....	331
-9.5 - O circuito térmico.....	334
-9.6 - Perigos do Superaquecimento.....	335
-9.7 - Calculando com a Resistência Térmica.....	337
-9.8 - Os Dissipadores Na Prática - Como escolher.....	340
-9.9 - Como Medir a Resistência Térmica de um Dissipador.....	343
-9.10 - Inércia Térmica.....	345
-9.11 - Montagem em Dissipadores de Calor.....	347
<b>Capítulo 10 - Componentes Antigos.....</b>	<b>351</b>
-10.1 - O diodo de selênio.....	352
-10.2 - Válvula Tungar.....	354
-10.3 - Outras válvulas retificadoras.....	356
-10.4 - Diodos semicondutores substituindo válvulas.....	358
-10.5 - Válvulas reguladoras de tensão.....	359
-10.6 - Tiratron.....	361
-10.7 - Vibradores.....	364
-10.8 - Porque as válvulas queimam.....	368
-10.9 - Tubos Nixie .....	369
-10.10 - Multímetro para Circuitos de Potência - PADRÕES INTERNACIONAIS DE SEGURANÇA.....	370
<b>Anexo.....</b>	<b>378</b>
When A Minimum is A Maximum?.....	378
Respostas .....	382

## **Apresentação**

Em 1972, já com experiência no ensino de eletrônica em cursos presenciais, fui contratado por uma grande organização de ensino por correspondência para renovar seu curso prático de eletrônica. Completado esse trabalho, fui trabalhar na Editora Saber em 1976 onde passei a publicar nas páginas da Revista Saber Eletrônica o primeiro Curso de Eletrônica em Instrução Programada, uma novidade que atraiu a atenção de milhares de leitores que tiveram sua formação inicial totalmente apoiada nos ensinamentos que então disponibilizamos. O sucesso desse curso fez com que em diversas ocasiões posteriores o curso fosse repetido e atualizado nas páginas da mesma revista e na revista Eletrônica Total. Neste intervalo publicamos a primeira edição completa desse curso que recebeu o nome de Curso Básico de Eletrônica e chegou até sua quinta edição, posteriormente sendo em 2009 transformado numa apostila. No entanto, desde a primeira edição e o primeiro curso na revista, muita coisa mudou, e se bem que diversas atualizações fossem feitas, chegando o momento de se fazer algo novo, adaptado aos novos tempos da eletrônica, num formato mais atual e com conteúdo que seja mais útil a todos que desejarem aprender muito sobre os diversos ramos da eletrônica. Desta forma o conteúdo do curso anterior foi separado em diversas edições, Curso Básico de Eletrônica, Curso de Eletrônica Analógica, além de outros volumes inéditos como os Cursos de Eletrônica Digital em dois volumes, Curso de Telecom em dois volumes e Curso de Eletrônica Automotiva. Agora neste sétimo volume da série, que não é o último, abordamos os componentes semicondutores da eletrônica de potência. Nele teremos circuitos e componentes que basicamente trabalham com correntes intensas e tensões elevadas em aplicações industriais, de controle, automação, energia e transporte. Podemos dizer que este livro, como os demais, podem ser considerados a plataforma ideal para muitos cursos, dos técnicos às disciplinas eletivas, da reciclagem de conhecimentos até aqueles que desejam ter na eletrônica uma segunda atividade ou precisam deles para o seu trabalho em área relacionada.

## Introdução

Desde 1976, quando criamos a primeira versão de um Curso de Eletrônica básico que pudesse servir de iniciação aos que desejassem ter conhecimentos da eletrônica, essa ciência passou por grandes transformações. Do fim da válvula ao transistor, quando começamos e os primeiros circuitos integrados, a eletrônica evoluiu para a tecnologia dos CIs de alto grau de integração, os FPGAs, os DSPs, microcontroladores e as montagens em superfície. Hoje a eletrônica se divide em diversos ramos, com especializações importantes como as telecomunicações, informática, instrumentação e muito mais. Um dos ramos mais importantes em nossos dias é justamente o que trata das aplicações de potência. Quando falamos em eletrônica de potência nos referimos aos componentes e circuitos que operam com correntes intensas e tensões que podem chegar a milhares de volts. Estes componentes e circuitos estão presentes nas indústrias, na geração e transmissão de energia, no controle de dispositivos de automação, eletrônica embarcada, mecatrônica e muito mais. Neste livro, partindo dos conhecimentos básicos que o leitor adquiriu nos volumes anteriores desta série, abordaremos o princípio de funcionamento de componentes de potência, suas aplicações práticas e circuitos normalmente encontrados nas aplicações relacionadas como inversores de potência, controles de potência e muito mais. O livro atende às necessidades dos que desejam tanto aprender um pouco sobre este ramo da eletrônica por estarem envolvidos em atividades na indústria, na geração e transmissão de energia e automação em diversos níveis, como também àqueles que estão em escolas técnicas e de engenharia e estão se dedicando a este ramo da eletrônica. O livro é conceitual, com fórmulas e cálculos deixados de lado para uma aplicação específica mais avançada. Os conceitos de como funciona e como são usados os componentes e circuitos são muito mais importantes na nossa abordagem que é feita dentro de uma didática que o leitor já conhece de muitos outros livros, artigos e obras de nossa autoria.

## Capítulo 1 - Unidades – Energia

Neste capítulo teremos a revisão dos conceitos das unidades básicas de tensão, corrente e potência, fundamentais para o nosso estudo. Além disso, veremos a forma como a energia é transmitida e utilizada nos circuitos de potência com ênfase para a corrente alternada da rede local e trifásica, além de fontes de corrente contínua de alta potência como as baterias que podem ser usadas em inversores, veículos e outras aplicações.

- 1.1 – Eletrônica de Potência
- 1.2 - Unidades elétricas (revisão)
- 1.3 – Potência contínua e alternada
- 1.4 – Alternadores
- 1.5 – Energia bifásica e trifásica
- 1.6 - Potência ativa e potência reativa
- 1.7 - Impedância

### ***-1.1 - Eletrônica de Potência***

Quando falamos em eletrônica de potência nos referimos aos circuitos e dispositivos que operam com correntes intensas e eventualmente tensões elevadas, resultando disso o manuseio de potências elevadas.

Como estes circuitos e dispositivos normalmente são encontrados nas indústrias, no controle de máquinas pesadas e outros automatismos, é comum que este ramo da eletrônica também seja tratado como Eletrônica Industrial, Automação Industrial, ou mesmo Mecatrônica.

O termo Mecatrônica deve-se ao fato que na maioria dos casos, os dispositivos e circuitos de potência são usados para controlar equipamentos mecânicos como máquinas industriais, automatismos, veículos, braços robóticos, robôs autônomos, etc.

Assim, nesse volume deste curso trataremos inicialmente de dispositivos e componentes eletrônicos que operam com

correntes intensas e eventualmente tensões elevadas, manuseando altas potências.

Num volume posterior trataremos dos circuitos que fazem isso como os inversores de potência, controles de potência, disjuntores, circuitos de proteção e muitos outros.

Observamos ainda que muitos dos dispositivos que abordaremos não manuseiam por si altas potências, mas são utilizados no controle de dispositivos de altas potências, daí ser importante sua inclusão nos nossos estudos.

Neste grupo enquadram-se pequenos dispositivos como os diacs, SIDACs SUS, SBS, etc.

Lembramos finalmente que os conceitos básicos utilizados neste livro foram estudados nos volumes anteriores desta série, em especial o Curso de Eletrônica – Eletrônica Básica – Vol 1, e Curso de Eletrônica – Eletrônica Analógica – Vol 2 – do mesmo autor.

## ***-1.2 - Unidades Elétricas***

Neste item faremos uma pequena revisão das principais unidades elétricas, com destaque à corrente, tensão e potência, cujo conhecimento deve ser muito bem definido, para que não fiquem dúvidas no entendimento do princípio de funcionamento de componentes e circuitos de potência.

Se o leitor tem um conhecimento firme deste assunto, pode saltar este item, indo para o seguinte.

Começamos então por revisar um conceito de vital importância para a eletrônica de potência: a conservação da energia.

### **1.2.1 - Princípio da Conservação da Energia**

Um princípio muito importante e que frequentemente será lembrado ao estudarmos fenômenos elétricos é o da conservação da energia. Este princípio afirma que a energia não pode ser criada nem destruída, ela sempre se conserva.

Assim, quando uma pilha alimenta uma lâmpada, a luz produzida tem a mesma quantidade de energia que a pilha gasta

para isso. Da mesma forma, se você tem um amplificador, a quantidade de som obtida (energia) é a mesma que a quantidade de energia elétrica que ele consome ao ser ligado na tomada.

Em outras palavras, nos processos que estudaremos envolvendo eletricidade, quantidade de energia presente será sempre a mesma. Ela apenas passará de um tipo para outro, ou seja, se transformará.

Veja na figura 1 um exemplo, em que a energia química liberada no interior da pilha se transforma em energia elétrica que, depois alimenta uma lâmpada se transformando em energia luminosa (luz) e calor (a lâmpada esquenta). Se medirmos a quantidade de luz e calor produzidos pela lâmpada veremos que é exatamente igual à quantidade de energia liberada no processo químico no interior da pilha.

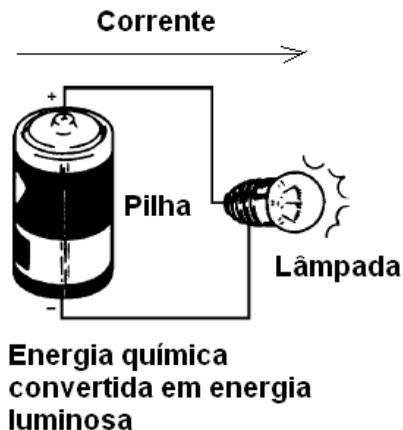


Figura 1 – Exemplo de conversão de energia

*"Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma"*  
Lavoisier (1743 – 1794)



Antoine Laurent Lavoisier (1743 – 1794)

### **Moto Perpétuo**

Este nome serve para designar tentativa de muitos para construir um motor perpétuo, um motor que funcione sem precisar de energia. Evidentemente ninguém conseguiu ainda porque contraria os princípios da física, especificamente o da conservação da energia que vimos. Energia não pode ser criada, tem de vir de algum lugar. Além de diversas idéias, que não funcionaram, envolvendo recursos mecânicos, como a da figura A, existem idéias que envolvem eletricidade.

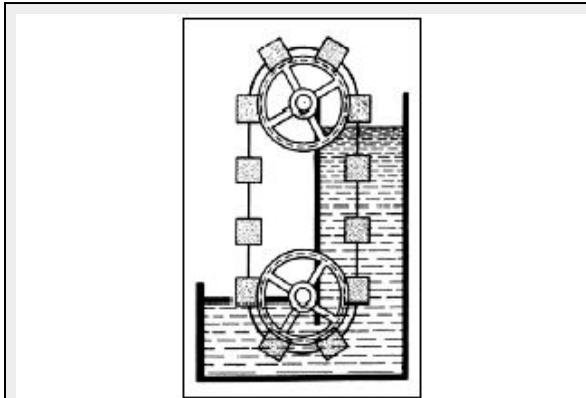


Figura A - A água que enche o balde de cima faz peso e ele desce fazendo o mecanismo girar indefinidamente.

Uma delas é a de se ligar um motor a um dínamo e depois alimentar o motor pelo dínamo, como mostra a figura B.

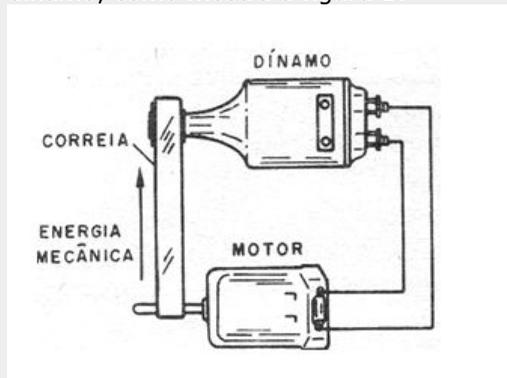


Figura B - Um moto perpétuo?

Por que isso não funciona? Simplesmente porque os rendimentos do motor e do dínamo não são 100%. O dínamo não converte toda energia mecânica que recebe para girar em eletricidade, assim vai para o motor um pouco

menos de energia elétrica do que ele recebeu na forma de energia mecânica. Da mesma forma, o motor não converte 100% de energia elétrica em mecânica, assim ele não transfere para o dínamo toda energia. O dínamo neste ciclo já recebe menos, e com isso menor quantidade de energia é gerada, e no processo a energia vai caindo até tudo parar... Mesmo que o processo tivesse 100% de rendimento, no momento em que tiramos um pouco da energia para alimentar alguma coisa externa, a energia do sistema cai e com isso ele reduz sua velocidade até parar...

### **1.2.2 – Entendendo as Unidades - Corrente, Tensão e Potência**

É um fato inadmissível que muitos profissionais da eletrônica possam confundir grandezas elétricas, como corrente, tensão e potência. Utilizando essas grandezas de forma errada é possível causar problemas sérios de funcionamento de um equipamento ou mesmo comprometer a segurança e o que pode ser muito mais grave: desacredita a competência do profissional ou de qualquer praticante da eletrônica.

Neste item, indicado aos que ainda fazem confusões, procuramos de uma forma simples eliminar as confusões que ainda possam existir.

É comum vermos profissionais utilizar forma completamente errada as grandezas elétricas, confundindo tensão, corrente e potência.

Quem já não ouviu um profissional "competente" dizer que tal aparelho funciona com uma "corrente" de 110 V ou coisa semelhante?

Para um estudante de eletrônica que faça tal afirmação o mínimo que se recomenda é um zero ou um bom castigo!

Mesmo alguns que já não fazem este tipo de citação podem, às vezes, ter dúvidas que demonstram que a confusão

relativa à corrente, tensão e também potência persiste em muitos casos.

É o caso de alguns leitores que estranham de que modo uma fonte que fornece uma tensão de 12 V de saída sob corrente de 2 ampères no máximo, tem sua entrada protegida por um fusível de apenas 500 mA, colocado na linha de 110 V.

Tentando tirar definitivamente as dúvidas dos leitores e evitar algumas confusões preparamos este item que, certamente não serve para os engenheiros e técnicos de alto nível que estejam atentos e atualizados, a não ser aqueles que andam um pouco esquecidos ou desejam reciclar conhecimentos (o que sempre é bom), o que ajudaria muito a entender melhor os diversos capítulos deste livro.

## CORRENTE E TENSÃO

Uma corrente é um fluxo de cargas elétricas.

Elétrons livres que se movem num fio de cobre formam uma corrente elétrica.

A medida dessa corrente é feita em função da quantidade de elétrons ou cargas que passam por um ponto desse fio em cada instante, conforme mostra a figura 2.

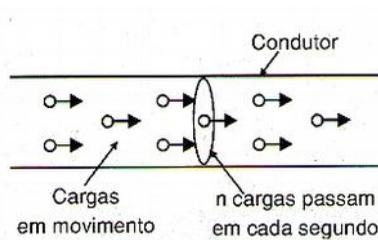


Figura 2 – Quantidade de cargas que passam por um setor = corrente

Quanto mais cargas passarem por este ponto, maior é a intensidade da corrente.

Dizemos cargas e não simplesmente elétrons, pois conforme sabemos, a corrente tanto pode ser obtida quando elétrons livres se movimentam num sentido, caso de um metal, como lacunas em sentido oposto como, por exemplo, num semiconductor do tipo P.

Para medir esta corrente a unidade usada é o ampère (A).

Um ampère (1 A) corresponde a uma quantidade de cargas equivalente a 1 Coulomb (1 C) passando por um ponto de um condutor em cada segundo.

Levando em conta que cada elétron (ou lacuna) tem uma carga de  $1,6 \times 10^{-19}$  Coulombs, podemos ter uma idéia de quantos elétrons estão se movendo num fio e passando por um certo trecho dele quando uma corrente de 1 A está sendo conduzida.

Se os leitores pensam que a velocidade desses elétrons é muito grande, estão enganados.

É neste ponto que entra então o conceito de tensão.

Como um fluxo de água num encanamento, a eletricidade precisa ser "empurrada" por uma força externa.

A ação externa responsável por isso é justamente a tensão. Assim, temos diversas formas de expressar essa força externa. Uma delas é tomarmos como referência a diferença de pressão que existe entre as extremidades de um fio, por onde se estabelece a corrente, conforme mostra a figura 3.

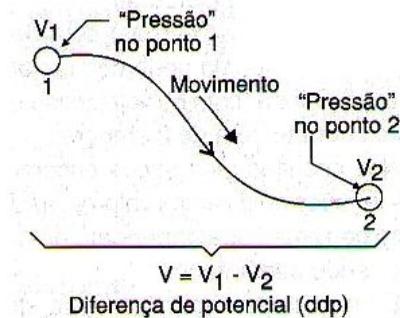


Figura 3 – Diferença de potencial ou ddp