

# 1

## Capítulo

### Introdução à Eletrônica de Potência

#### Meta deste capítulo

Contextualizar o estudante no assunto e mostrar o estado atual da tecnologia em eletrônica de potência.

#### objetivos

- Apresentar a importância da eletrônica de potência;
- Apresentar aplicações da eletrônica de potência;
- Identificar os principais desafios da área de eletrônica de potência;
- Mostrar as principais diferenças entre circuitos lineares e circuitos chaveados;
- Resolver exercícios envolvendo elementos básicos de conversão de energia;
- Iniciar o contato com conversão eletrônica de energia.

#### Pré-requisitos

Não há pré-requisitos para este capítulo.

#### Continuidade

O estudo continuará envolvendo componentes semicondutores aplicados à eletrônica de potência.

Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, agosto de 2013 (revisado em março de 2020).

## 1 Introdução

A eletrônica de potência é uma antiga área da engenharia elétrica, inicialmente destinada a aplicações industriais, mas que no decorrer do tempo evoluiu para ser utilizada em ambientes residenciais e comerciais também. Atualmente, praticamente todos os equipamentos eletrônicos utilizam algum tipo de conversão de energia, que é a atividade fim da eletrônica de potência.

Este capítulo pretende introduzir o estudante no estudo de eletrônica de potência, fornecendo um contexto geral da área, além do princípio básico envolvido na conversão eletrônica de energia.

## 2 Considerações Iniciais em Eletrônica de Potência

Desde o início do século 20 até os presentes dias a Eletrônica de Potência tem alcançado grandes avanços e se alastrado às mais diversas áreas. Considera-se que ela é responsável pela segunda revolução na eletrônica, sendo que a primeira foi causada pela invenção dos transistores e consequente fabricação de circuitos integrados. Com o desenvolvimento de materiais semicondutores capazes de comandar potências da ordem de centenas de watts o processamento eletrônico da energia passou a integrar uma infinidade de equipamentos eletroeletrônicos, caracterizando o que se denomina de era da Eletrônica de Potência.



Figura 1 – Aplicação de eletrônica de potência em conversão de energia – Itaipu Binacional.

Fonte: <http://economia.uol.com.br>. Acesso em: 14/08/2013.

Atualmente está se vivendo numa era de reinvenção industrial, para a qual a Eletrônica de Potência e outras áreas básicas, como comunicações, computação e tecnologias de transporte são indispensáveis e evoluem rapidamente. Juntamente com a computação, a Eletrônica de Potência

forma a base para as indústrias automatizadas.

Em virtude do aumento de compacticidade e queda nos custos na tecnologia disponibilizada pela Eletrônica de Potência esta irá se expandir ainda mais nas áreas residencial, comercial, industrial e militar. Avanços no campo teórico, seja em ferramentas de análise e de simulação e no campo prático ou na capacidade elétrica e disponibilidade dos semicondutores, têm possibilitado o surgimento de inúmeras topologias de conversores, com desempenhos cada vez melhores, contribuindo também para o avanço e expansão desta importante área do conhecimento. A redução de custos pode ser conseguida por meio da implementação em software de todas as funções possíveis de um conversor e da integração de circuitos, visando reduzir o número de componentes nos circuitos eletrônicos. Estima-se que os preços médios dos circuitos integrados usados em Eletrônica de Potência deverão cair na faixa de 2,4 a 6,3% ao ano, dependendo da categoria do produto.

Dentre as utilizações do processamento eletrônico de energia tem-se: aplicações eletroquímicas, controle de luminosidade e aquecimento, reatores eletrônicos, equipamentos eletroeletrônicos, transmissão de energia elétrica, acionamento de motores, filtragem ativa de corrente e tensão, entre outras. A Eletrônica de Potência pode ser vista como uma interface entre as fontes de energia disponíveis e os consumidores, realizando a conformação das grandezas conforme as necessidades a montante ou a jusante. Nota-se, então, a característica de multidisciplinaridade desta área, quais sejam: componentes semicondutores, circuitos, máquinas elétricas, teoria de controle, eletrônica de sinais, microcomputadores, integração de circuitos, projeto auxiliado por computador, resfriamento, tecnologia de produção, entre outras.

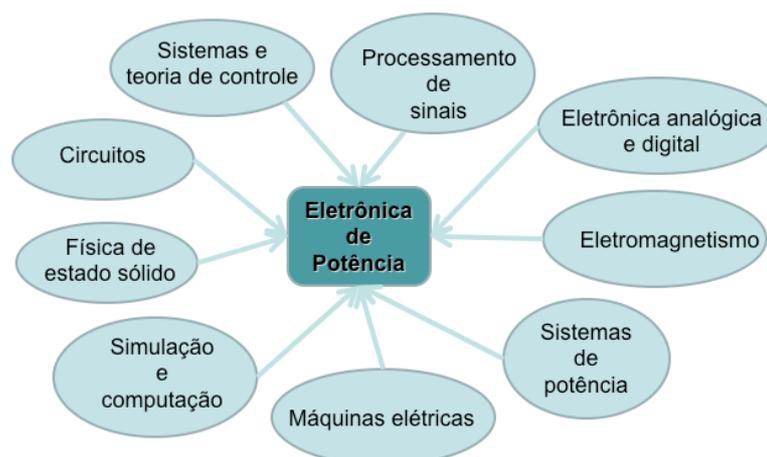


Figura 2 – A eletrônica de potência é multidisciplinar.

Num planeta em busca de soluções para os problemas de poluição e esgotamento de fontes energéticas, a Eletrônica de Potência pode contribuir oferecendo tecnologia para a utilização em grande escala de energias “limpas”, tais como: solar, eólica e células combustíveis.



Figura 3 – Geração de energia com painéis fotovoltaicos em estacionamento de veículos.

Fonte: <http://g1.globo.com>. Acesso em: 14/08/2013.

Estima-se que nos EUA de 15 a 20% da energia elétrica pode ser aproveitada de forma mais eficiente com ajuda da Eletrônica de Potência, além do que, da energia gerada, 20% é consumida com iluminação e outros 65% com acionamentos de motores, o que mais uma vez é campo de aplicação da Eletrônica de Potência, principalmente com equipamentos de alta eficiência para uso residencial. Da mesma forma, com a queda dos custos, condicionadores de energia podem ser usados em escala maior, visando a regeneração de energia em acionamentos de motores de alta potência.

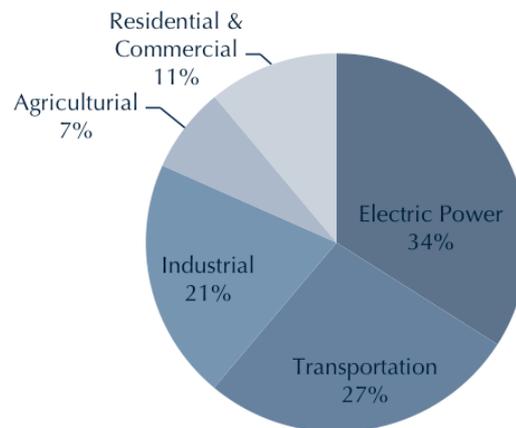


Figura 4 – Distribuição do consumo de energia elétrica nos EUA por setor.

Fonte: <http://www.c2es.org>. Acesso em: 14/08/2013.

A história da Eletrônica de Potência pode ser confundida com a própria história da Engenharia Elétrica, desde que as primeiras aplicações envolvendo eletricidade exigiam seu controle e interfaceamento. A cronologia resumida da Eletrônica de Potência até o presente momento pode ser encontrada nas referências (Petry, 2005).

A evolução desta área está fortemente ligada à evolução dos dispositivos utilizados para

realizar a comutação. Após a invenção dos semicondutores de potência tiveram-se avanços inimagináveis anteriormente, sendo que a evolução destes dispositivos é seguida a passos largos pela evolução da Eletrônica de Potência. Esta dependência é tão grande que, em termos de custo, os semicondutores de potência são responsáveis por 20 a 30% do gasto total num equipamento. Supõe-se que com o uso de novos materiais semicondutores como, por exemplo, o carbeto de silício (*silicon carbide*) e o diamante, uma nova revolução na Eletrônica de Potência, de maior intensidade do que a vista com o advento dos tiristores, irá acontecer.

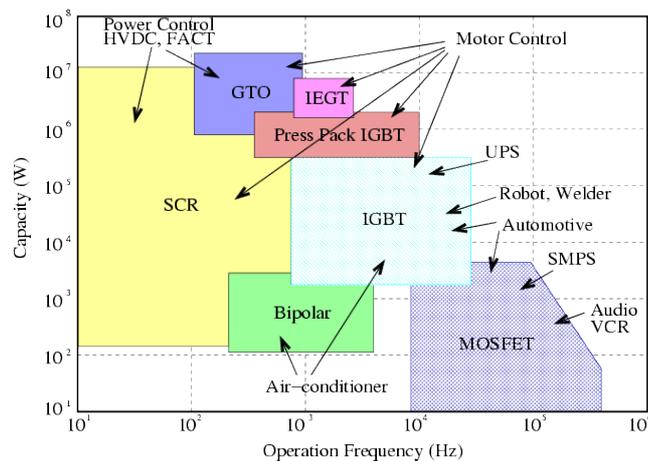


Figura 5 – Semicondutores para eletrônica de potência.

Fonte: <http://www.iue.tuwien.ac.at>. Acesso em: 14/08/2013.

Com a queda drástica dos preços, os motores elétricos irão incorporar os circuitos de acionamento e controle. As formas de encapsulamento dos conversores de potência, influenciadas atualmente pelo sistema de ventilação, sofrerão mudanças radicais devido ao aumento de rendimento dos circuitos usando semicondutores de melhores características elétricas, bem como da integração tridimensional, que engloba os circuitos de potência, controle, monitoramento, elementos passivos e dissipadores, possibilitando montagens mais compactas e aproveitamento de elementos parasitas.



Figura 6 – Motor com conversor integrado.

Fonte: <http://www.electromate.com>. Acesso em: 14/08/2013.

Em termos de controle vislumbra-se o uso de controle inteligente, visando uma integração maior entre diversos equipamentos. A utilização de elementos discretos, analógicos ou digitais, restringe-se a equipamentos simples, tais como controle de luminosidade, carregadores de baterias, ou fontes de baixa potência. Já em aplicações de elevada frequência, como fontes chaveadas, por exemplo, usam-se circuitos integrados dedicados, devido a sua simplicidade e resposta rápida. Em sistemas complexos, como acionamento de motores, transmissão de energia e sistemas ininterruptos de energia (UPS) preferem-se microprocessadores.

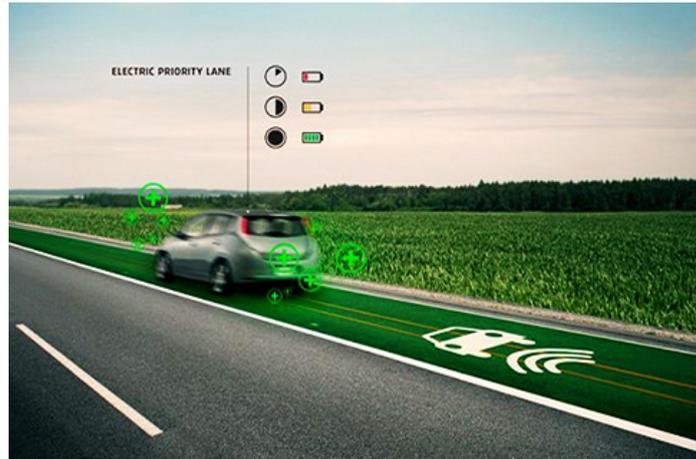


Figura 7 – Controle inteligente de conversores aplicado ao transporte.

Fonte: <http://www.elitedayle.com>. Acesso em: 14/08/2013.

Em altas potências a modularização deve ser aumentada, para redução de custo, aumento de eficiência, flexibilidade, etc. Em baixas potências a integração total deve continuar objetivando reduzir custo, volume e aumentar o desempenho e a vida útil dos equipamentos. Já em médias potências a integração total de diferentes sistemas oferece oportunidades de pesquisa e contribuições tecnológicas, pois se desejam melhoras em termos de custo, modularização, controle e monitoramento, performance e robustez.



Figura 8 – Conversor de alta potência.

Fonte: <http://www.windpowerengineering.com>. Acesso em: 14/08/2013.

### 3 Conversão de Energia e Eletrônica de Potência

A conversão de energia é usual no desenvolvimento da humanidade, ocorrendo de diferentes modos e empregando diferentes tecnologias. Do mesmo modo, a conversão da energia elétrica em outras formas, ou destas em energia elétrica é uma importante atividade da área tecnológica atual. Assim, a conversão se dá para:

- Aplicações diferentes conforme a forma;
- Dificuldades de armazenamento;
- Dificuldades de transmissão;
- Alteração/adaptação de amplitudes, formas e quantidades;
- Reaproveitamento de energia.

Por exemplo, a energia elétrica é convertida em energia sonora nos alto-falantes. Já no microfone ocorre o processo inverso. Nos geradores de energia elétrica, a energia potencial da água é convertida em energia elétrica; o que também pode ocorrer pela conversão da energia eólica, térmica, em parques de geração eólica e em usinas termoelétricas, por exemplo.

Com a finalidade de converter energia elétrica com determinada amplitude e frequência em outras amplitudes e frequências, além de permitir a alteração da forma, surgiram os conversores rotativos, atualmente substituídos pelos conversores estáticos.

Um conversor rotativo é aquele converte energia usando mecanismos móveis (gerador-motor-gerador). Já um conversor estático é um dispositivo eletrônico que converte energia sem usar componentes móveis (giratórios).

O termo conversor estático era utilizado em anos anteriores para designar a área de eletrônica de potência. Atualmente, por se considerar o caráter interdisciplinar desta área, denomina-se simplesmente de eletrônica de potência, englobando assim as diversas aplicações, grupos de conversores e tecnologias envolvidas com a finalidade de controlar o fluxo de energia elétrica entre diferentes elementos.



Figura 9 – Conversor rotativo: motor + gerador.

Fonte: <http://www.forster.ind.br>. Acesso em: 14/08/2013.



Figura 10 – Conversor estático.

Fonte: <http://www.weg.net>. Acesso em: 14/08/2013.

### 3.1 Definição de Eletrônica de Potência

Definir Eletrônica de Potência é uma tarefa bastante difícil, e conseguir consenso nesta definição seria algo ainda mais complexo. Diversas são as definições encontradas na literatura. Uma definição bastante simples e nada pretenciosa, que satisfaz as necessidades deste trabalho, poderia afirmar que Eletrônica de Potência é uma área da Engenharia Elétrica que tem a finalidade de estudar e construir conversores de energia visando o processamento eletrônico da energia elétrica.

Algumas outras definições são:

- Eletrônica de Potência é a tecnologia associada com conversão eficiente, controle e condicionamento de potência elétrica através de interruptores estáticos de uma fonte disponível na entrada numa saída desejada;
- Eletrônica de Potência pode ser definida como uma ciência aplicada dedicada ao estudo dos conversores estáticos de energia elétrica. Este último pode ser definido com um sistema, constituído por elementos passivos (resistores, capacitores e indutores) e elementos ativos (interruptores), tais como Diodos, Tiristores, Transistores, GTO's, Triacs, IGBT's e MOSFET's, associados segundo uma lei pré-estabelecida.

## 4 Divisão da Eletrônica de Potência

A eletrônica de potência é dividida em quatro grupos de conversores:

- Conversores ca-cc: Denominados de retificadores: convertem a tensão alternada da rede de energia elétrica em uma tensão contínua;
- Conversores ca-ca: Denominados de choppers CA: convertem a tensão alternada da rede de energia elétrica em tensão alternada estabilizada, por exemplo;

- Conversores cc-cc: Denominados de choppers: convertem tensão contínua em tensão contínua;
- Conversores cc-ca: Denominados de inversores: convertem tensão contínua em alternada, muito usados em acionamento.

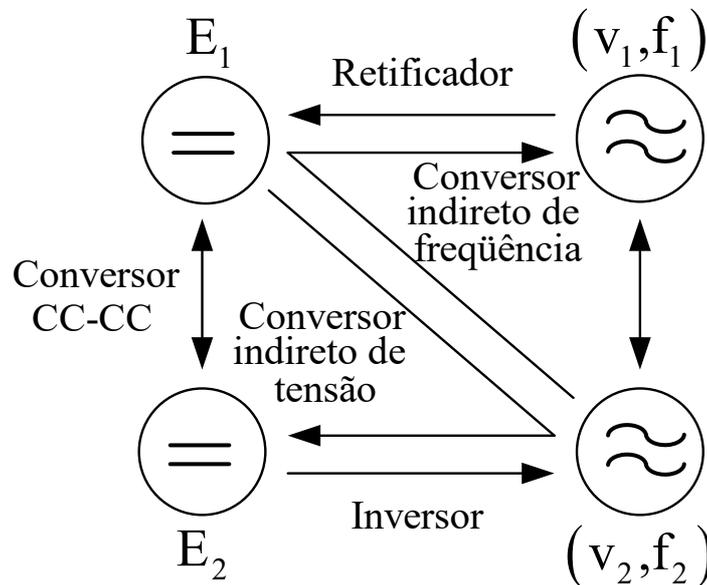


Figura 11 – Grupos de conversores cc-cc.

Fonte: (Barbi, 2005).

## 5 Desafios da Eletrônica de Potência

Na eletrônica de potência, assim como na maioria das áreas da energia elétrica, busca-se a redução do volume e do peso dos equipamentos, aliada à redução de custo do produto final. Mas em especial, os projetos em eletrônica de potência buscam a melhora da eficiência energética dos equipamentos construídos, visando o melhor aproveitamento da energia envolvida.

Assim, nos projetos de eletrônica de potência busca-se diminuir ao máximo resistências no caminho série da corrente, como está mostrado na Figura 12. Além disso, evita-se o uso de transformadores pelas dificuldades no processo de montagem dos produtos eletrônicos.

No entanto, o principal elemento para redução de perdas é a forma de acionamento do interruptor (chave), evitando-se operar este elemento na região linear em detrimento da operação na região de corte e saturação (como chave).

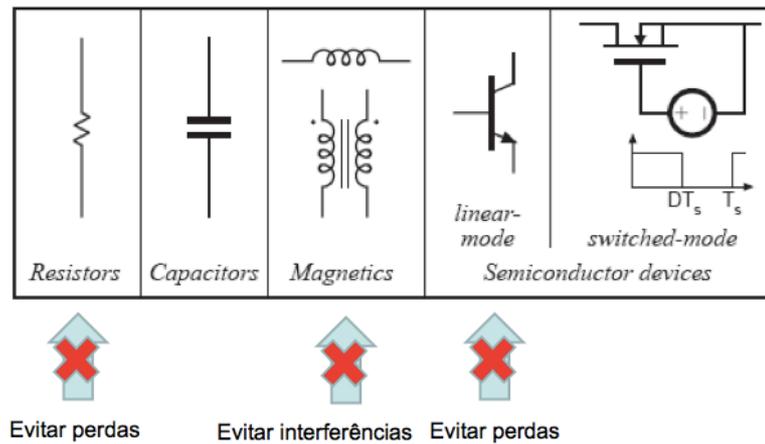


Figura 12 – Cuidados nos projetos de eletrônica de potência.

Fonte: (Erikson, 1997).

A eficiência de um sistema é determinada dividindo-se a potência de saída pela potência de entrada:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i}$$

Note que o resultado obtido é adimensional e normalmente é expresso em percentual, multiplicando-se o valor obtido por 100.  $P_o$  é a potência na saída do sistema e  $P_i$  a potência na entrada, ambas em Watts.

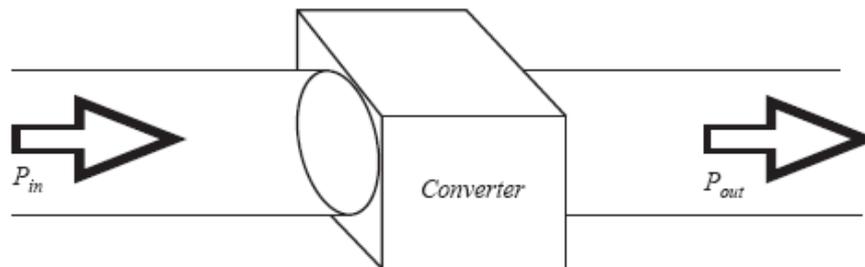


Figura 13 – Eficiência energética de um sistema.

Fonte: (Erikson, 1997).

## 6 Conversores Lineares e Não-Lineares (Chaveados)

Em eletrônica de potência é comum o emprego do termo chaveamento, como em fontes chaveadas, por exemplo. Assim, é importante se diferenciar uma fonte linear (conversor cc-cc linear) de uma fonte chaveada ou comutada (conversor cc-cc não-linear).

Na fonte linear, os semicondutores empregados operam na região linear ou ativa,

provocando uma queda de tensão no circuito, como é o caso de um resistor com valor variável. Já um conversor chaveado opera abrindo e fechando um elemento semiconductor, gerando um sinal pulsado na saída, necessitando então de filtros adicionais. A diferença está nas perdas de energia sobre o elemento série, o semiconductor neste caso, muito maiores na operação linear do que na operação comutada.

Nas Figura 14 e Figura 15 mostram-se um conversor linear e um chaveado, empregados em fontes lineares e fontes chaveadas. Basicamente, as fontes lineares convertem a tensão alternada da rede em tensões contínuas, normalmente de baixa amplitude, sem o uso de componentes chaveados (comutados); enquanto fontes chaveadas exercem a mesma função, mas utilizando componentes comutados (chaveados). Ainda, é importante destacar que:

- Fontes lineares: são mais robustas, simples e fáceis de projetar, podem ser mais baratas ou não, são muito volumosas e pesadas;
- Fontes chaveadas: não são tão robustas, mais difíceis de projetar e consertar, podem ser mais baratas ou não, são pequenas e leves.

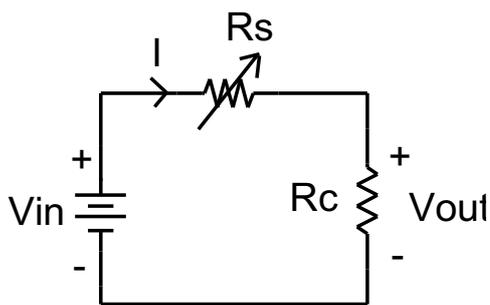


Figura 14 – Conversor linear.

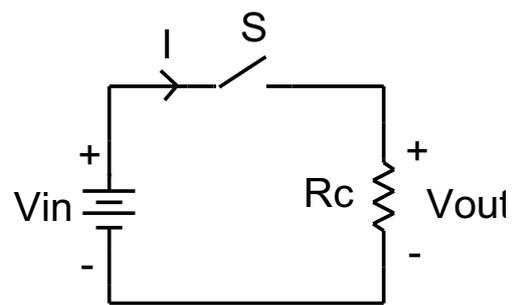


Figura 15 – Conversor chaveado.

Para explicitar a diferença de tamanho e peso, na Figura 16 mostram-se duas fontes, uma linear com potência de aproximadamente 30 W e outra chaveada com potência da ordem de 70 W. É perceptível a diferença no volume obtida pela diferença de tecnologia empregada (chaveada ao invés da linear).

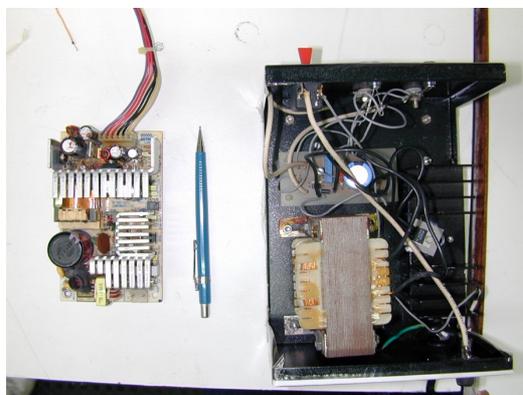


Figura 16 – Fonte linear versus fonte chaveada.

## 6.1 Problema Típico de Eletrônica de Potência

Ainda, para dirimir, possíveis dúvidas, considere que seja necessário alimentar uma carga de 50 V e 10 A, como está mostrado na Figura 17, a partir de uma fonte de tensão contínua de 100 V. Como realizar tal conversão?

Uma alternativa seria utilizar uma solução trivial, empregando um resistor ajustável, como está mostrado na Figura 18. O rendimento do sistema será:

$$P_o = V_o \cdot I_o = 50 \cdot 10 = 500W ;$$

$$P_{perdas} = V_R \cdot I_o = 50 \cdot 10 = 500W ;$$

$$P_i = P_o + P_{perdas} = 500 + 500 = 1000W ;$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{500}{1000} = 0,5 \text{ ou } 50\%.$$

Nota-se que as perdas são elevadas, ou seja, a potência dissipada na forma de calor na resistência série do circuito é de 500 W, mesmo valor da potência na carga. Assim, o rendimento é baixo (50%), mostrando que esta solução é ruim do ponto de vista de aproveitamento de energia.

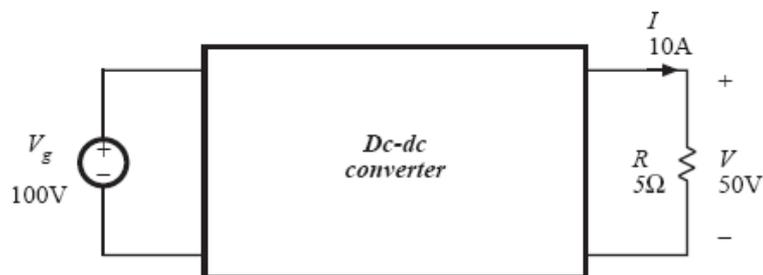


Figura 17 – Problema típico de eletrônica de potência.

Fonte: (Erikson, 1997).

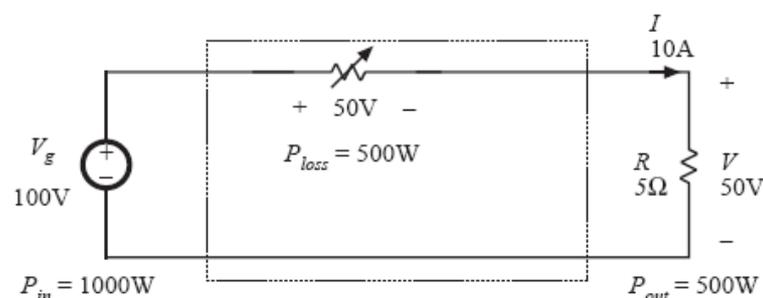


Figura 18 – Solução do problema usando resistores.

Fonte: (Erikson, 1997).

Por outro lado, pode-se usar um transistor operando na região linear, como está mostrado na Figura 19. Neste caso, o princípio de funcionamento do circuito é o mesmo da Figura 18, pois o transistor opera na região linear, como se fosse um resistor variável, provocando uma queda de tensão entre coletor e emissor. O rendimento deste circuito também é de 50%.

Por fim, pode-se utilizar conversores chaveados, ou seja, transistores operando como chave, como está mostrado na Figura 20. Neste caso, com a escolha adequada dos componentes e um projeto rigoroso visando diminuir as perdas, pode-se obter rendimentos próximos de 100%.

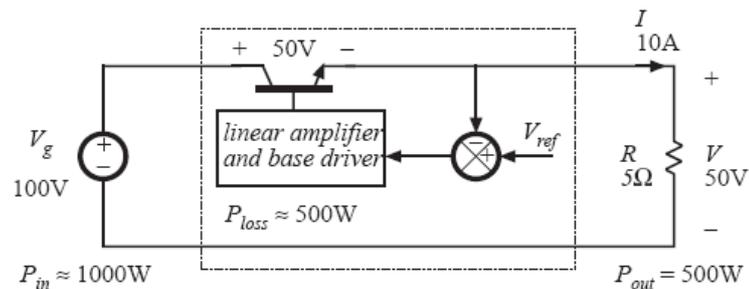


Figura 19 – Solução do problema usando transistores operando na região linear.

Fonte: (Erikson, 1997).

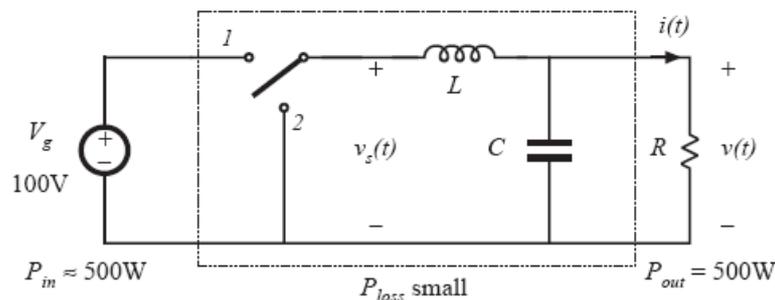


Figura 20 – Solução do problema usando transistores operando como chave.

Fonte: (Erikson, 1997).

Note que sempre haverá perdas, então na prática o rendimento será sempre inferior a 100%. Os conversores chaveados apresentarão perdas nos semicondutores, que serão: perda de condução quando o elemento (chave) estiver conduzindo e perda de comutação, quando o componente estiver abrindo e fechando, ou seja, realizando as comutações (chaveamentos).

Além disso, um circuito de eletrônica de potência necessitará de circuitos auxiliares, sejam para realizar o controle em malha fechada do conversor, para fazer o acionamento (comandar) da chave, realizar comunicação com o usuário, implementar proteções, etc. Na Figura 21 é mostrado um diagrama de blocos de um conversor cc-cc Buck, onde nota-se o estágio de potência (parte superior) e o estágio de controle em malha fechada (parte inferior) do conjunto.

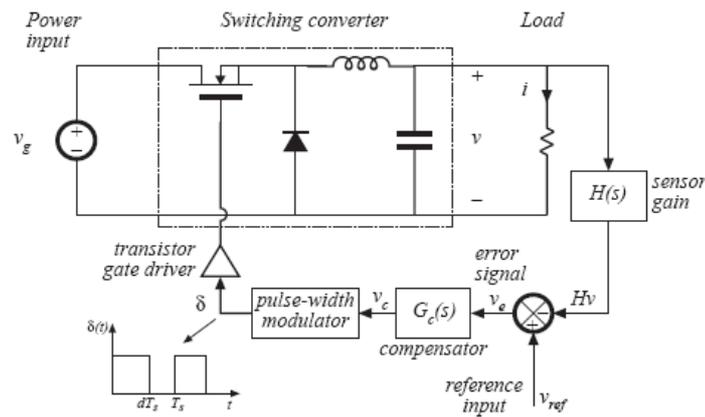


Figura 21 – Diagrama de blocos de um conversor cc-cc Buck.

Fonte: (Erikson, 1997).

## 7 Aplicações da Eletrônica de Potência

O uso da eletrônica de potência está vastamente disseminado, assim como a eletrônica de modo geral. As aplicações iniciais eram eminentemente industriais, por isso nos anos 60, 70 e 80 do século passado, esta área denominava-se de eletrônica industrial. Claro que já existiam aplicações em telecomunicações, em satélites, aviões, e inclusive fontes de alimentação de televisores residenciais.

No entanto, com o desenvolvimento da indústria de semicondutores, a partir dos anos 50 do século passado, com a invenção do transistor, é que a eletrônica de modo geral invadiu os lares de praticamente todas as pessoas, por meio de aparelhos de rádio e posteriormente de televisão. Posteriormente outras aplicações foram surgindo, como controle de temperatura, acionamento de motores em corrente contínua e alternada, fontes ininterruptas de energia e máquinas de uso industrial e medicinal. O processamento de energia em altas potências, seja na geração e na distribuição de energia, também é uma aplicação comum desde a época das válvulas.

As aplicações da eletrônica de potência estão diretamente ligadas à evolução dos componentes eletrônicos, principalmente dos semicondutores. Na Figura 22 mostra-se a evolução da eletrônica de potência em contraste com a evolução dos semicondutores, onde nota-se que se espera uma maior integração dos elementos para os próximos anos.

### Importante:

- Para uma pequena revisão histórica da eletrônica de potência, até o ano de 2005, acesse o site <http://www.ProfessorPetry.com.br> e localize o exame de qualificação na área denominada de pesquisa.

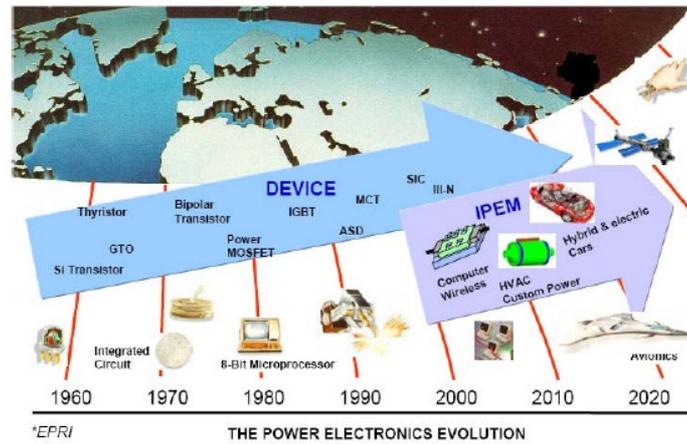


Figura 22 – Evolução da eletrônica de potência.

Fonte: <http://www.epri.com>. Acesso em: 14/08/2013.

A seguir, o uso da eletrônica de potência também ocorreu na iluminação seja para controle de luminosidade, em reatores eletrônicos e mais recentemente para lâmpadas usando LEDs.

Do mesmo modo, o interesse por energias alternativas despertou inúmeras pesquisas e consequentes aplicações para os conversores eletrônicos de energia. O mesmo ocorre com a tendência de utilização de veículos elétricos (automóveis, bicicletas, motos, etc.) e embarcações elétricas.

A seguir listam-se algumas aplicações da eletrônica de potência:

- Fontes chaveadas;
- Controle de motores de corrente contínua e alternada;
- Conversores para soldagem;
- Alimentação de emergência;
- Carregadores de bateria;
- Retificadores para eletroquímica;
- Transmissão em corrente contínua;
- Reatores eletrônicos;
- Filtros ativos;
- Compensadores estáticos;
- Processamento de energias alternativas;
- Amplificadores de potência;
- Controles de temperatura;
- Entre outras.

## 8 Exercícios

### Exercícios Resolvidos

**ER 01)** Seja o circuito da Figura 23, considerando que a tensão da fonte seja de 5 V, o resistor de  $100 \Omega$  e os LEDs ( $D_1$  e  $D_2$ ) tenham queda de tensão direta de 1,2 V, determine:

- A corrente do circuito;
- A potência processada em cada LED;
- A potência processada no resistor;
- A potência entregue pela fonte;
- O rendimento do circuito.

A tensão sobre o resistor série será:

$$V_{R1} = V_i - V_{LED1} - V_{LED2};$$

$$V_{R1} = 5 - 1,2 - 1,2 = 2,6V.$$

Portanto, a corrente do circuito será:

$$I_{R1} = \frac{V_{R1}}{R_1} = \frac{2,6}{100} = 26mA.$$

Assim, a potência nos diversos elementos será:

$$P_{LED1} = P_{LED2} = V_{LED} \cdot I_{LED} = V_{LED} \cdot I_{R1} = 1,2 \cdot 26m = 31,2mW;$$

$$P_{R1} = V_{R1} \cdot I_{R1} = 2,6 \cdot 26m = 67,6mW;$$

$$P_i = P_{R1} + P_{LED1} + P_{LED2} = 67,6m + 31,2m + 31,2m = 130mW.$$

Finalmente, o rendimento do circuito será:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{P_{LED1} + P_{LED2}}{P_i} = \frac{31,2m + 31,2m}{130m} = 0,48 \text{ ou } 48\%.$$

Note que mesmo sendo um circuito viável de ser implementado, pelo fato de se encontrar resistores comerciais de  $100 \Omega$  e potência de  $1/8 W$ , por exemplo, o rendimento do circuito é muito baixo, o que normalmente não é levado em conta pelos usuários.

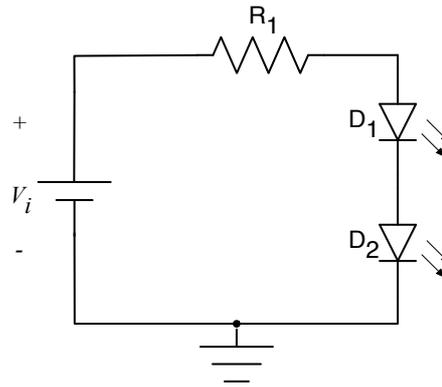


Figura 23 – Circuito com LEDs para exemplo resolvido 01.

## Exercícios Propostos

**EP 01)** Em uma fonte de 12 V devem ser ligados LEDs de potência, cada um com tensão de 3 V e corrente de 500 mA. Determine, considerando 1, 2 ou 3 LEDs ligados:

- A potência processada pelos LEDs;
- A potência dissipada no resistor série;
- A potência fornecida pela fonte;
- A eficiência do circuito.

**EP 02)** Considerando o que foi estudado neste capítulo, comente sobre a importância da eletrônica de potência para a vida das pessoas.

**EP 03)** Imagine que todos os equipamentos eletrônicos deixem de funcionar. Comente sobre o dia-a-dia das pessoas sem o uso de equipamentos eletrônicos, considerando a sociedade contemporânea.

**EP 04)** Cite 5 aplicações da eletrônica de potência que você tem contato corriqueiramente.

**EP 05)** Cite 5 assuntos que você tenha estudado no curso até o momento e que são necessários para estudar eletrônica de potência.

**EP 06)** Considerando o exercício proposto 01 (EP 01), determine o valor máximo que a tensão da fonte de alimentação poderá assumir para que o rendimento do conjunto seja de 30%.

**EP 07)** Repita o exercício proposto 06 (EP 06) para um rendimento de 50%.

**EP 08)** Repita o exercício proposto 06 (EP 06) para um rendimento de 70%.

**EP 09)** Repita o exercício proposto 06 (EP 06) para um rendimento de 90%.

**EP 10)** Repita o exercício proposto 06 (EP 06) para um rendimento de 100%.

**EP 11)** Deseja-se implementar um *display* de LEDs com oito dígitos, que será conectado em um circuito decodificador BCD para 7 segmentos. Sabendo que o *display* tem o anodo comum,

determine o resistor série necessário para que o circuito opere corretamente em 5 V. Os LEDs do *display* possuem tensão direta de 1,2 V e corrente de 10 mA. Determine o rendimento do conjunto.

**EP 12)** Repita o exercício proposto 11 (EP 11) considerando uma tensão de alimentação de 12 V.

**EP 13)** Comente sobre suas lembranças referentes à equipamentos eletrônicos. Houve algum contato com equipamentos valvulados?

**EP 14)** Cite 5 equipamentos eletrônicos que se tornaram obsoletos e que você tenha tido contato corriqueiramente.

**EP 15)** Considerando o consumo intenso de eletroeletrônicos pela população, comente a respeito do descarte de produtos eletrônicos e suas consequências para a natureza.

**EP 16)** Seja o circuito da Figura 24, considerando que a tensão da fonte ( $V_i$ ) seja de 12 V, o resistor de carga ( $R_o$ ) seja de  $10\ \Omega$  e o transistor ( $S_1$ ) esteja conduzindo e seja ideal, determine:

- A corrente do circuito;
- A potência processada pela carga;
- A potência processada no transistor;
- A potência entregue pela fonte;
- O rendimento do circuito.

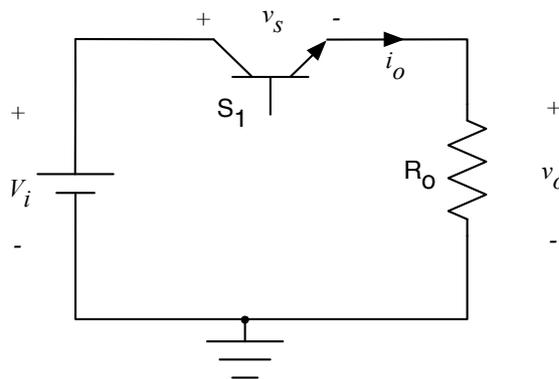


Figura 24 – Circuito típico de eletrônica de potência com transistor bipolar e carga.

**EP 17)** Seja o circuito da Figura 24, considerando que a tensão da fonte ( $V_i$ ) seja de 12 V, o resistor de carga ( $R_o$ ) seja de  $10\ \Omega$  e o transistor ( $S_1$ ) esteja conduzindo e apresente uma queda de tensão de 2 V, determine:

- A corrente do circuito;
- A potência processada pela carga;
- A potência processada no transistor;
- A potência entregue pela fonte;
- O rendimento do circuito.

## 9 Laboratório

### 9.1 Introdução

Esta atividade de laboratório tem por objetivo exercitar o conteúdo estudado nesta aula (capítulo), especificamente sobre o rendimento de circuitos com LEDs.

Em síntese, objetiva-se:

- Identificar e conhecer lâmpadas com LEDs;
- Realizar cálculos e determinar componentes de eletrônica de potência;
- Implementar circuitos de eletrônica de potência;
- Realizar medições em circuitos de eletrônica de potência;
- Analisar os resultados obtidos e concluir a respeito.

### 9.2 Lâmpada de LEDs

A lâmpada de LEDs que será utilizada em laboratório está mostrada nas Figura 25 e Figura 26. As especificações desta lâmpada são:

- Tensão de operação de 12 V;
- Potência de trabalho de 2,5 W;
- LEDs brancos;
- Modelo: Lâmpada de Foco LED Branco Natural G4 2-2.5W 6x5050 SMD 60-70LM 6000-6500K (12V).

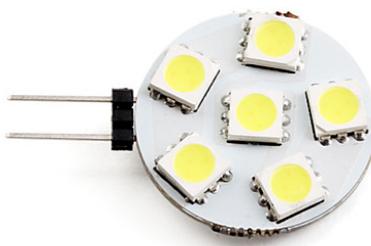


Figura 25 – Lâmpada com LEDs, vista frontal.

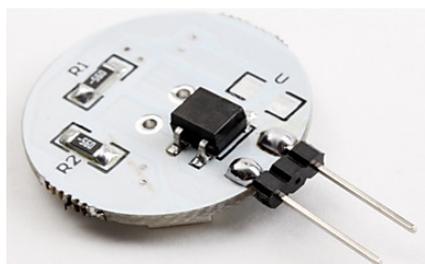


Figura 26 – Lâmpada com LEDs, vista da placa com componentes.

Note que esta lâmpada já possui um circuito de acionamento dos LEDs implementada em sua placa.

### Importante:

- Lembre que o LED será danificado se a corrente ultrapassar seu limite de operação, portanto evite aplicar tensões maiores do que 12 V na lâmpada.

## 9.3 Situação Problema

Deseja-se utilizar esta lâmpada de LEDs em um veículo automotor que possui uma bateria de 24 V.

Assim, será necessário implementar algum circuito entre a bateria que possui 24 V e a lâmpada que opera com 12 V.

## 9.4 Desenvolvimento

Determine um resistor de potência para que seja possível conectar a lâmpada de 12 V na fonte (bateria) de 24 V. Especifique a resistência e a potência do resistor necessário (resistor série =  $R_s$ ).

$$R_s = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$P_s = \underline{\hspace{2cm}}$$

A seguir, implemente o circuito em matriz de contatos, e antes de conectar a fonte, solicite a verificação do professor.

Estando tudo em ordem, realize as seguintes medições:

$$V_{\text{fonte}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$I_{\text{fonte}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$V_{\text{resistor}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$V_{\text{lâmpada}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

## 9.5 Análise

A partir das medições realizadas no item anterior, determine a potência em todos os elementos.

$$P_{\text{lâmpada}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$P_{\text{resistor}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$P_{\text{fonte}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

A seguir, determine o rendimento do conjunto:

$$\eta = \underline{\hspace{2cm}}$$

Responda:

- Os valores medidos condizem com os calculados? Comente.
- O rendimento obtido pode ser considerado bom? Comente.
- Sugira outras soluções para resolver a situação problema desta aula de laboratório.

## 10 Referências

- [1] BARBI, I. Eletrônica de potência. Florianópolis: Edição do Autor, 2005.
- [2] AHMED, A. Eletrônica de potência. São Paulo: Prentice Hall, 2000.
- [3] MELLO, J. L. A. Projetos de fontes chaveadas. São Paulo: Érica, 1987.
- [4] MOHAN, N. Power Electronic Converters, Application and Design. New York: IE-Wilwy, 2003.
- [5] PRESSMAN, A. I. Switching Power Supply Design. New York: McGraw Hill, 1998.
- [6] BARBI, Ivo. Projeto de Fontes Chaveadas. 2ª Edição Revisada, Florianópolis, 2006.
- [7] ERICKSON, Robert W. Fundamentals of Power Electronics. New York, EUA – Chapman & Hall, 1997.
- [8] PETRY, Clovis A. Estabilizadores de Tensão Alternada para Alimentação de Cargas Não-Lineares: Estudo de Variações Topológicas e Métodos de Controle. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2005.