

Aula 02

Introdução a Eletrônica de Potência

Prof. Eng. Derig Almeida Vidal
Mestre em Computação Aplicada a Redes de Computadores, Engenheiro de Produção e Tecnólogo em Automação

CENTEC - Cariri
Eletrônica Industrial



Sumário

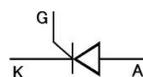
- Introdução
- O que é eletrônica de potência?
- Um reostato x chave como dispositivo de controle
- Chaves semicondutoras de potência
- Perdas de potência em chaves não ideais
 - Perda na condução
 - Perda por chaveamento
- Exercícios
- Bibliografia



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Introdução

- O termo eletrônica de potência vem sendo usado desde a década de 60 após a criação do **SCR** (silicon controlled rectifier).



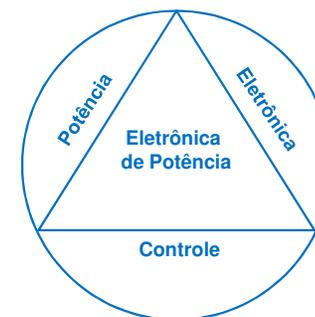
- Progrediu com rapidez nos últimos anos, com o desenvolvimento dos dispositivos que podem chavear altas correntes eficientemente em altas tensões.



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

O que é eletrônica de potência?

- Trata da aplicação de dispositivos semicondutores de potência, como tiristores e transistores, na conversão e no controle de energia elétrica em níveis altos de potência.



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

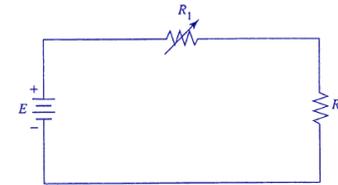
Por que eletrônica de potência?

- A transferência de potência elétrica de uma fonte para uma carga pode ser controlada pela variação da tensão de alimentação ou pela inserção de um regulador.
- Os dispositivos semicondutores utilizados como chaves têm a vantagem do porte pequeno, do custo baixo, da eficiência e da utilização para controle automático da potência.
- Vejamos:



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Um reostato como dispositivo de controle

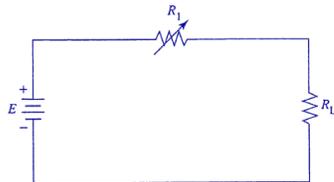


- Quando R_1 tem zero de resistência, a carga recebe toda a potência.
- Quando R_1 é máxima, a potência entregue à carga é praticamente igual a zero.



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Um reostato como dispositivo de controle



- Nas aplicações em que a potência a ser controlada é grande, a eficiência de conversão passa a ser importante.
- Uma eficiência baixa significa grandes perdas, uma preocupação de caráter econômico, além de gerar calor, que terá de ser removido do sistema para evitar superaquecimento.

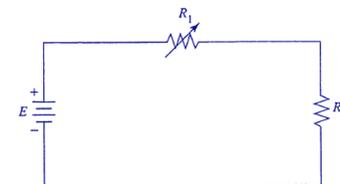


Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Um reostato como dispositivo de controle

- **Exemplo:** Uma fonte DC de 100V está fornecendo energia para uma carga resistiva de 10Ω . Determine a potência entregue à carga (P_L), a potência dissipada no reostato (P_R), a potência total fornecida pela fonte (P_T) e a eficiência η , se o reostato for ajustado para:

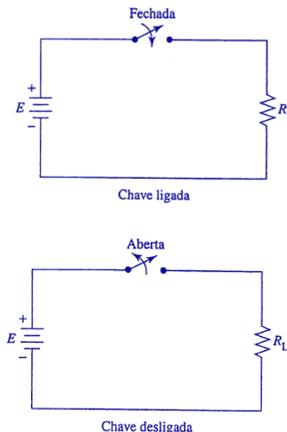
- 0Ω
- 10Ω
- 100Ω



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Uma chave como dispositivo de controle

- Quando a chave está ligada, um máximo de potência é transferido para a carga, ou seja, a perda de potência na chave é nula, uma vez que não há tensão sobre ela.
- Quando a chave está desligada, não existe potência entregue a carga, não existindo perda de potência na chave, pois não passa corrente por ela.



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Uma chave como dispositivo de controle

- A eficiência é de 100%, por que a chave não consome energia em qualquer um dos dois casos.
- O problema é como variar a potência. Para isso pode-se criar esse efeito abrindo e fechando a chave periodicamente (os transistores e SCR possibilitam isso).
 - Se precisarmos de mais potência, a chave eletrônica deve ficar ligada por períodos maiores e desligadas por menor parte do tempo.
 - Do contrário, basta deixar a chave desligada por mais tempo.



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Uma chave como dispositivo de controle

- **Exemplo:** Uma fonte DC está fornecendo energia para uma carga resistiva de 10Ω através de uma chave. Determine a potência fornecida à carga (P_L), a perda de potência na chave (P_S) e a potência total fornecida pela fonte (P_T) se a chave estiver:
 - a) Fechada
 - b) Aberta
 - c) Fechada 50% do tempo
 - d) Fechada 20% do tempo



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Chaves semicondutoras de potência

- São os elementos mais importantes em circuitos de eletrônica de potência.
- Os principais são:
 - Diodos;
 - Transistores bipolares de junção (BJTs);
 - Transistores de efeito de campo metal-óxido-semicondutor (MOSFETs)
 - Transistores bipolares de porta isolada (IGBTs);
 - Retificadores controlados de silício (SCRs);
 - Triacs;
 - Tiristores de desligamento por porta (GTO);
 - Tiristores controlados por MOS (MCT).



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Chaves semicondutoras de potência

- Em eletrônica de potência, esses dispositivos são operados no modo de chaveamento.
- As chaves podem ser operadas em alta frequência, a fim de converter e controlar a energia elétrica com alta eficiência e alta resolução.
- A perda de potência na chave, em si, é muito pequena, uma vez que ou a tensão é quase igual a zero (chave ligada) ou a corrente é quase nula (chave desligada).



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Chaves semicondutoras de potência

- A chave ideal satisfaz às seguintes condições:
 1. Liga e desliga instantaneamente;
 2. Quando está ligada, a queda de tensão nela é zero;
 3. Quando está desligada, a corrente que passa por ela é zero;
 4. Não dissipa potência.



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

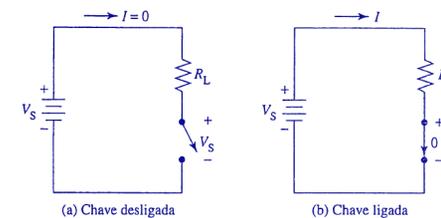
Chaves semicondutoras de potência

- Além disso, as seguintes condições são desejáveis:
 5. Quando ligada, que possa suportar correntes altas.
 6. Quando desligada, que possa suportar tensões altas.
 7. Que utilize pouca potência para o controle da operação.
 8. Que seja altamente confiável.
 9. Que seja pequena e leve.
 10. Que tenha baixo custo.
 11. Que não requeira manutenção.



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Perdas de potência em chaves não ideais



- Ao contrário do que ocorre em uma chave ideal, uma chave real tem duas grandes fontes de perda de potência:
 - Perda na condução; e,
 - Perda por chaveamento



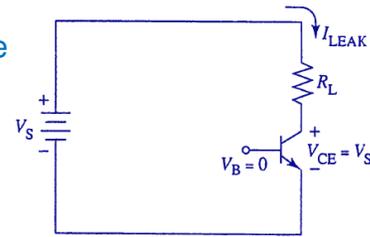
Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Perda na condução

- Quando o **transistor estiver desligado**, por ele passará uma corrente de fuga (I_{LEAK}).
- A perda de potência associada a essa corrente de fuga é:

$$P_{OFF} = V_S \cdot I_{LEAK}$$

Como a corrente de fuga é muito pequena e não varia com a tensão ela costuma ser desprezada.



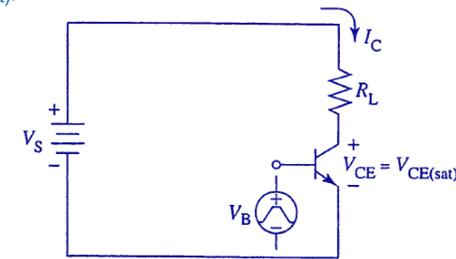
(a) Transistor desligado



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Perda na condução

- Quando o **transistor estiver ligado**, ocorre uma pequena queda de tensão sobre ele.
- Essa tensão é chamada de tensão de saturação ($V_{CE(sat)}$).



(b) Transistor ligado



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Perda na condução

- A dissipação de potência no transistor ou a perda na condução é devida à tensão de saturação é:

$$P_{ON} = V_{CE(sat)} \cdot I_C$$

- Onde:

$$I_C = (V_S - V_{CE(sat)}) / R_L \approx V_S / R_L$$



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Perda na condução

- Caso a chave permaneça ligada indefinidamente a perda de potência devida a condução é:

$$P_{ON(avg)} = V_{CE(sat)} \cdot I_C \cdot t_{ON} / T = V_{CE(sat)} \cdot I_C \cdot d$$

- De modo semelhante:

$$P_{OFF(avg)} = V_S \cdot I_{LEAK} \cdot t_{OFF} / T$$

- Assim o d é definido como percentual:

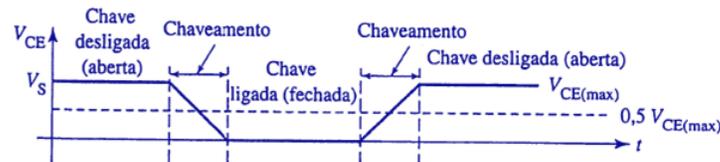
$$d = t_{ON} / (t_{ON} + t_{OFF}) = t_{ON} / T$$



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

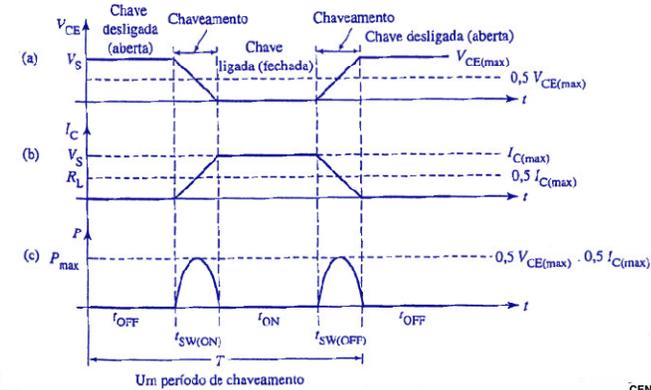
Perda por chaveamento

- Além da perda na condução, uma chave não ideal também possui perdas em virtude do chaveamento porque não pode passar de um estado para outro, de ligado para desligado (e vice-versa), de modo instantâneo.



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

- Formas de onda durante o chaveamento:
 - Tensão na chave;
 - Corrente passando pela chave; e,
 - Potência dissipada na chave.



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Perda por chaveamento

Vamos aos cálculos

- Perda máxima de potência, na passagem do estado desligado para o ligado (pode-se perceber pelo gráfico), é:

$$P_{SW-ON(max)} = 0,5 V_{CE(max)} \cdot 0,5 I_{C(max)}$$

- Já o valor médio é:

$$\begin{aligned} P_{SW-ON(avg)} &= 0,637 P_{SW-ON(max)} \\ &= 0,637 \cdot 0,5 V_{CE(max)} \cdot 0,5 I_{C(max)} \\ &= 0,167 V_{CE(max)} I_{C(max)} \\ &= 1/6 V_{CE(max)} I_{C(max)} \end{aligned}$$



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Perda por chaveamento

Vamos aos cálculos

- Perda de energia (potência x tempo) durante o fechamento será $P_{SW-ON(max)} t_{SW(ON)}$

$$W_{SW-ON} = \frac{1}{6} V_{CE(max)} \cdot I_{C(max)} \cdot t_{SW(ON)} \text{ (joules)}$$

- Já a perda de energia durante o desligamento será:

$$W_{SW-OFF} = \frac{1}{6} V_{CE(max)} \cdot I_{C(max)} \cdot t_{SW(OFF)} \text{ (joules)}$$

- A perda total de energia em um ciclo de chaveamento é:

$$W_{SW} = W_{SW-ON} + W_{SW-OFF} = \frac{1}{6} V_{CE(max)} \cdot I_{C(max)} \cdot [t_{SW(ON)} + t_{SW(OFF)}]$$



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Perda por chaveamento

Vamos aos cálculos

- A dissipação média de potência na chave será:

$$P_{SW} = \frac{W_{SW}}{T} = W_{SW} \cdot f$$

$$P_{SW} = \frac{1}{6} V_{CE(max)} \cdot I_{C(max)} \cdot [t_{SW(ON)} + t_{SW(OFF)}] \cdot f$$

Onde T é o período de chaveamento e f a frequência do chaveamento.



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Perda por chaveamento

Vamos aos cálculos

- Observe que:

$$T = t_{ON} + t_{SW(ON)} + t_{OFF} + t_{SW(OFF)}$$

- Se definirmos:

$$t_{SW(ON)} = t_{SW(OFF)} = t_{SW}$$

- Então:

$$P_{SW} = \frac{1}{6} V_{CE(max)} \cdot I_{C(max)} \cdot (2 t_{SW}) \cdot f$$



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Perda por chaveamento

Vamos aos cálculos

- A perda total de potência na chave é:

$$P_T = P_{ON(avg)} + P_{OFF(avg)} + P_{SW}$$

$$\approx P_{ON(avg)} + P_{SW}$$

$$= d \cdot V_{CE(sat)} \cdot I_C + \frac{1}{3} V_{CE(max)} \cdot I_{C(max)} \cdot t_{SW} \cdot f$$

- Obs: $P_{OFF(avg)}$ foi desconsiderado por que normalmente é muito pequeno.



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

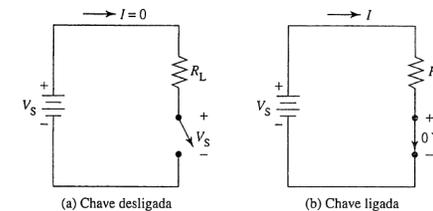
Exercícios

Exemplo 1.3

Na Figura 1.5, $V_S = 50 \text{ V}$, $R_L = 5 \Omega$ e a chave é ideal sem perdas no chaveamento. Se a queda de tensão no estado *ligado* for de $1,5 \text{ V}$ e a corrente de fuga for de $1,5 \text{ mA}$, calcule a perda de potência na chave quando estiver:

- ligada
- desligada

Figura 1.5: Perdas de potência em uma chave ideal.



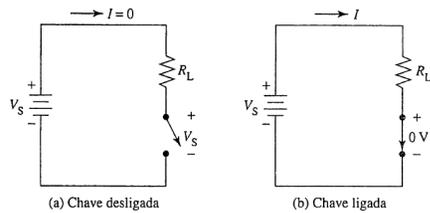
Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Exercícios

Exemplo 1.4

Calcule as perdas máxima e média de potência para a chave do Exemplo 1.3 se a frequência de chaveamento for de 500 Hz com um ciclo de trabalho de 50%.

Figura 1.5: Perdas de potência em uma chave ideal.



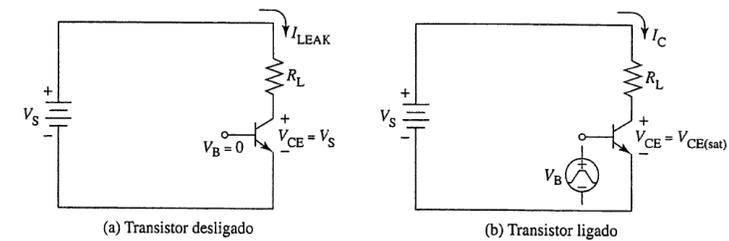
Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Exercícios

Exemplo 1.5

Na Figura 1.6, $V_S = 120$ V, $R_L = 6$ Ω e o transistor é ideal sem perdas na condução. Se $t_{SW(ON)} = t_{SW(OFF)} = 1,5$ μ s, calcule a perda de potência média de chaveamento a uma frequência de chaveamento de 1 kHz.

Figura 1.6: Perdas de potência em uma chave transistorizada.



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Exercícios

Exemplo 1.6

Uma chave transistorizada com as seguintes características controla a potência para uma carga de 25 kW, como mostra a Figura 1.6:

$I_{RATED} = 50$ A
 $V_{RATED} = 500$ V
 $I_{LEAKAGE} = 1$ mA
 $V_{CE(sat)} = 1,5$ V
 tempo de ligação $t_{SW(ON)} = 1,5$ μ s
 tempo de desligamento $t_{SW(OFF)} = 3,0$ μ s

A fonte de tensão $V_S = 500$ V e $R_L = 10$ Ω . Se a frequência de chaveamento for de 100 Hz com um ciclo de trabalho de 50%, determine:

- a perda de potência no estado *ligado*
- a perda de potência no estado *desligado*
- a perda máxima de potência durante a ligação da chave
- a perda de energia durante a ligação da chave
- a perda de energia durante o desligamento da chave
- a perda de energia durante o estado *ligado*
- a perda de energia durante o estado *desligado*
- a perda total de energia
- a perda média de potência



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Exercícios

Exemplo 1.7

Resolva os itens de d) a i) do Exemplo 1.6, para o caso em que a frequência de chaveamento é aumentada para 100 kHz com ciclo de trabalho de 50%.



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri

Bibliografia

- AHMED, Ashfaq. Eletrônica de potência. São Paulo: Pearson, 2000.



Prof. Derig Almeida Vidal
CENTEC - Cariri