

INTRODUÇÃO AOS CONVERSORES CC-CC

1.1. OBJETIVOS

Neste capítulo apresentaremos conceitualmente e funcionalmente os conversores CC-CC não isolados. Também apresentaremos uma classificação sumária quanto à reversibilidade, à topologia e ao ganho estático.

1.2. DESCRIÇÃO FUNCIONAL E DEFINIÇÕES

Seja o sistema representado simplifiadamente na Fig. 1.1. Ele consiste de uma fonte de tensão contínua E_1 , um circuito representado por um bloco denominado conversor CC-CC, e uma fonte de tensão contínua E_2 .

A fonte E_1 está fornecendo energia elétrica ao conversor CC-CC, enquanto este está fornecendo energia elétrica à fonte E_2 . O conversor CC-CC pode então ser conceituado como um sistema, formado por semicondutores de potência operando como interruptores, e por elementos passivos, normalmente indutores e capacitores, que tem por função controlar o fluxo de potência elétrica da fonte de entrada E_1 para a fonte de saída E_2 . A variável de controle ou de entrada do sistema, representada por D , é conhecida como razão-cíclica ou ciclo de trabalho, e será definida formalmente no Capítulo 2 do presente texto.

E_1 funciona como fonte de energia e E_2 funciona como carga. Em algumas aplicações práticas a carga do conversor é constituída por um resistor. Em outras situações pode ser um motor de corrente contínua, um banco de baterias, um dispositivo de soldagem elétrica a arco, ou outro conversor estático.

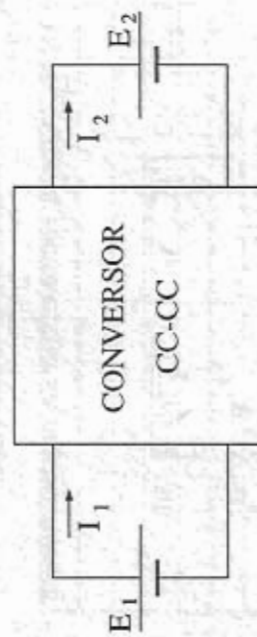


Fig. 1.1: Representação simplificada de um conversor CC-CC.

Num conversor ideal, as perdas internas são nulas e a potência entregue à carga é igual a potência cedida pela fonte E_1 , valendo então as expressões (1.1), (1.2) e (1.3).

$$P_1 = E_1 I_1 \quad (\text{potência de entrada}) \quad (1.1)$$

$$P_2 = E_2 I_2 \quad (\text{potência de saída}) \quad (1.2)$$

$$E_1 I_1 = E_2 I_2 \quad (1.3)$$

O ganho estático de um conversor CC-CC é definido pela expressão (1.4).

$$G = \frac{E_2}{E_1} \quad (1.4)$$

1.3. VANTAGENS DO CONVERSOR CHAVEADO SOBRE O REGULADOR LINEAR

Sejam os circuitos representados nas Figs. 1.2 e 1.3. Na primeira está representado o circuito equivalente de um regulador linear, e na segunda o circuito equivalente de um regulador chaveado, ambos alimentando uma carga resistiva.

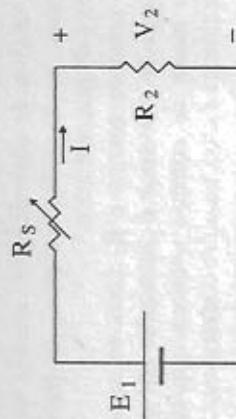


Fig. 1.2: Circuito equivalente de um regulador linear.

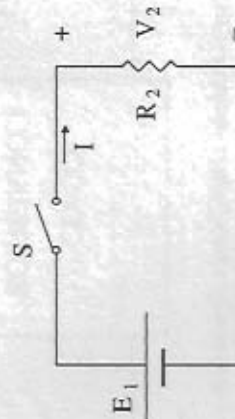


Fig. 1.3: Circuito equivalente de um regulador chaveado.

Em ambos os casos, deseja-se manter constante o valor médio da tensão de saída V_2 , quando a resistência de carga R_2 varia. Vamos admitir que a tensão de entrada E_1 seja constante em ambos os casos, e que a tensão de saída V_2 seja igual à metade da tensão de entrada E_1 .

No caso do regulador linear, a diferença entre a tensão de entrada e a tensão de saída é dada pela queda de tensão no resistor série R_s . Em aplicações reais, o resistor é substituído por um transistor bipolar. Desse modo, no exemplo em questão, a potência dissipada no regulador série é igual à potência entregue ao resistor de carga R_2 . Portanto, apenas a metade da energia cedida pela fonte de entrada E_1 alcança a carga, fazendo com que o rendimento seja igual a 50%.

No caso do regulador chaveado, com chave ideal, a perda na chave é igual a zero. Assim, a fonte de entrada E_1 só cede ao circuito a potência que é transferida à carga. O rendimento teórico do processo é então igual a 100%.

Na prática, o rendimento de um conversor CC-CC não isolado pode variar entre 70% e 98%, dependendo das potências, correntes, tensões, frequências de chaveamento, e das tecnologias empregadas.

A conclusão acima é estendida para todo o conversor estático chaveado, ou seja, a técnica de chaveamento é empregada para o controle do fluxo de energia elétrica, com elevada eficiência.

1.4. CLASSIFICAÇÃO DOS CONVERSORES CC-CC NÃO ISOLADOS QUANTO À TOPOLOGIA E AO GANHO ESTÁTICO

O número de conversores estáticos CC-CC não isolados é muito grande. Contudo, seis deles são mais populares e difundidos, e todos serão estudados em detalhes nos capítulos subsequentes deste texto.

Os seis conversores básicos, e os respectivos ganhos estáticos, são conhecidos como: conversor Buck, Boost, Buck-Boost, Cúk, Sepic e Zeta. Os ganhos estáticos estão representados na Tabela 1.

Tabela 1.1: Conversores Básicos.

Conversor	Ganho estático
Buck	D
Boost	$1/(1-D)$
Buck-Boost	$D/(1-D)$
Cúk	$D/(1-D)$
Sepic	$D/(1-D)$
Zeta	$D/(1-D)$

Os seis conversores CC-CC básicos não-isolados mencionados, estão representados na Fig. 4.

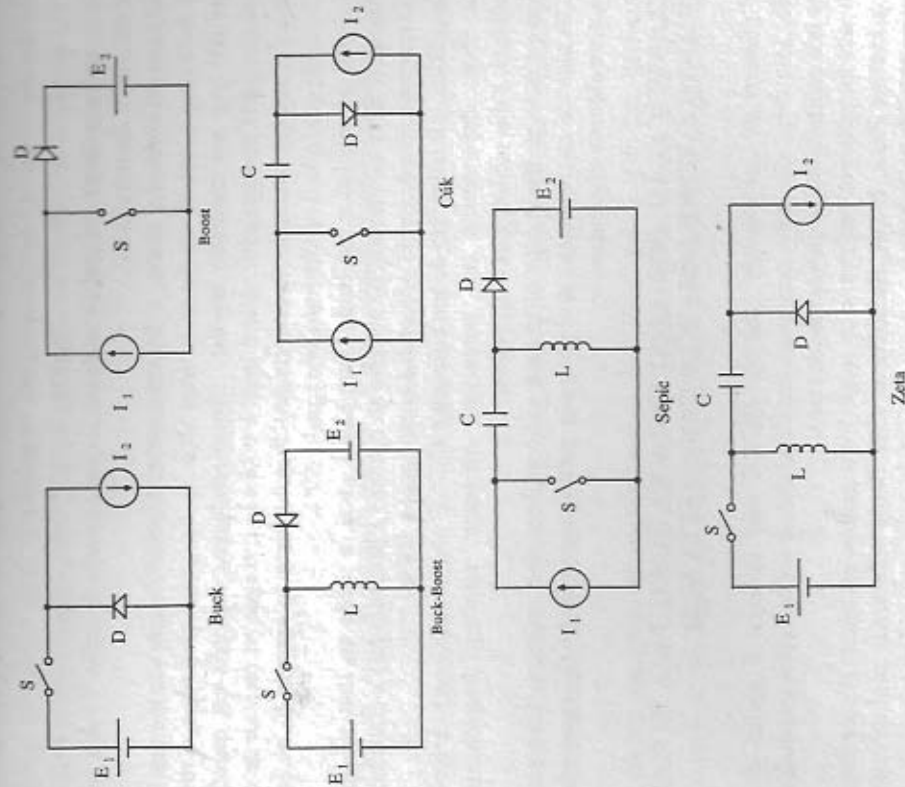


Fig. 1.4: Topologias dos 6 conversores básicos CC-CC não isolados.

Os ganhos estáticos representados na Tabela I revelam que o conversor Buck é apenas abaixador, ou seja, a tensão de carga é sempre menor que a tensão da fonte de entrada.

O conversor Boost é sempre elevador. A tensão mínima de carga é igual à tensão da fonte de entrada.

Por outro lado, os conversores Buck-Boost, Cúk, Sepic e Zeta têm o mesmo ganho estático. Todos eles geram na saída uma tensão menor que a tensão de entrada para $D < 0.5$ e uma tensão maior que a tensão de entrada para $D > 0.5$.

Pode-se também observar que o conversor Buck é o único que apresenta uma relação linear entre a tensão de entrada e a de saída. Por isto é o mais fácil de ser controlado com emprego das técnicas clássicas de controle.

1.5. CLASSIFICAÇÃO QUANTO À REVERSIBILIDADE

Há inúmeras situações práticas onde os conversores CC-CC devem ser reversíveis, ou seja, devem controlar o fluxo de potência tanto da fonte de entrada para a fonte de saída, ou vice-versa. Vejamos os exemplos descritos a seguir.

a) Seja o sistema representado na Fig. 1.5.

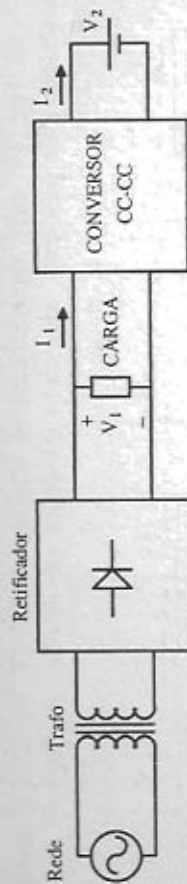


Fig. 1.5: Exemplo de emprego de conversor CC-CC reversível.

Em operação normal, a rede de energia comercial alimenta o transformador. A tensão de saída do retificador alimenta uma carga e ao mesmo tempo alimenta o conversor CC-CC. O conversor CC-CC alimenta a bateria V_2 e a mantém carregada. Nesta situação as correntes I_1 e I_2 são positivas.

Na eventual falha da rede de energia comercial, o conversor CC-CC inverte o fluxo de potência e passa a alimentar a carga a partir da bateria. Neste caso, as correntes I_1 e I_2 tornam-se negativas.

Este é um exemplo de conversor CC-CC não isolado que alimenta uma carga de dois quadrantes. A inversão do fluxo de potência dá-se pela inversão do sentido da corrente. Naturalmente, para que a reversibilidade seja possível, é necessário que a fonte de saída seja reversível em corrente.

b) Seja o sistema representado na Fig. 1.6.

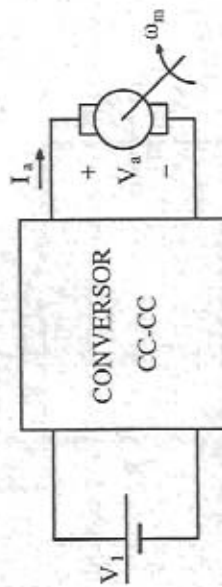


Fig. 1.6: Motor de corrente contínua alimentado por um conversor CC-CC reversível.

Trata-se de um motor de corrente contínua que opera em quatro quadrantes, aumentando por um conversor CC-CC reversível. Para que o motor opere nos quatro quadrantes, o conversor deve ser capaz de produzir na sua saída tanto tensão positiva quanto negativa, com corrente também positiva ou negativa. Essa situação é diferente da anterior, na qual havia necessidade de reversibilidade, porém a tensão de saída era sempre positiva.

Como aplicações típicas, podemos citar o emprego do motor de corrente contínua no controle de posição, e em tração elétrica.

Na Fig. 1.7 estão representados os conversores CC-CC de dois e quatro quadrantes mais populares. Eles serão estudados em detalhes no Capítulo 7 do presente texto.

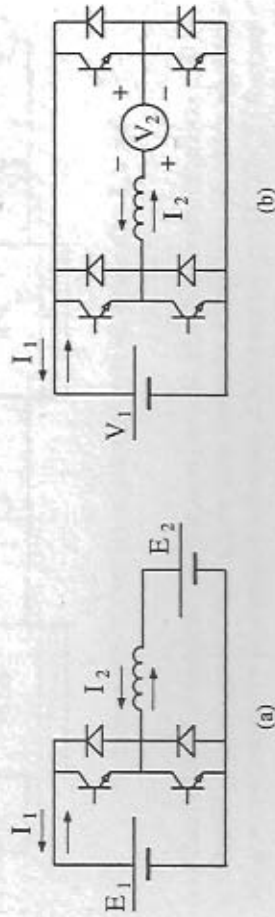


Fig. 1.7: (a) conversor CC-CC para dois e (b) para quatro quadrantes.

1.6. EXERCÍCIOS

1.6.1. EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

1ª) Seja o circuito representado na Fig. 1.8.

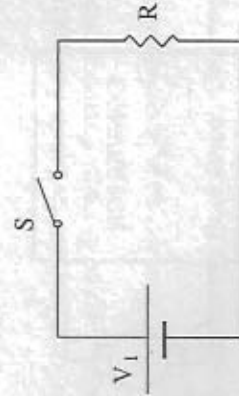


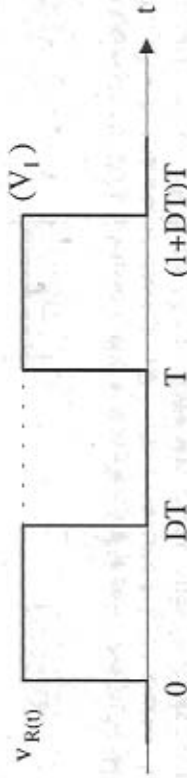
Fig. 1.8: Circuito chaveado.

A chave ideal S fecha e abre periodicamente, com frequência f , e com razão cíclica igual a D .

- Determinar as expressões dos valores médio e eficaz da tensão de carga;
- Determinar a expressão da potência média transferida ao resistor R ;
- Determinar os valores da tensão e corrente média na chave S ;
- Demonstrar que a potência dissipada na chave ideal é igual a zero.

SOLUÇÃO:

- A forma da tensão aplicada ao resistor R está representada a seguir:



Desse modo,

$$V_{Rmed} = \frac{V_1 \cdot DT}{T} \Rightarrow \boxed{V_{Rmed} = DV_1}$$

$$V_{Ref} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{DT} V_1^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} V_1^2 t} \Big|_0^{DT} \Rightarrow \boxed{V_{Ref} = \sqrt{DV_1^2}}$$

$$V_{Ref} = \sqrt{\frac{V_1^2}{T} DT} \Rightarrow \boxed{V_{Ref} = \sqrt{DV_1^2}}$$

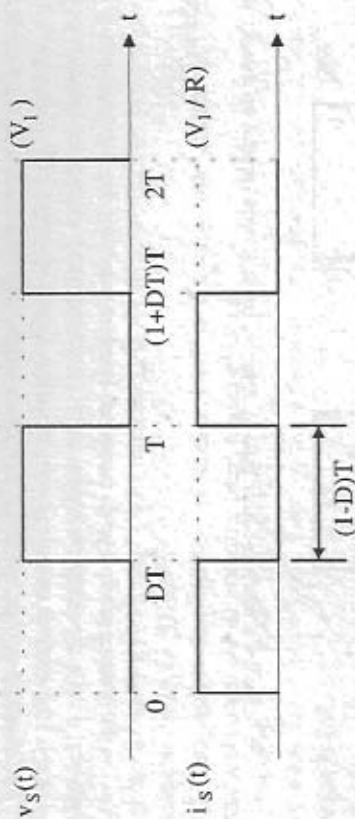
$$b) \quad P_R = \frac{V_{Ref}^2}{R} \Rightarrow \boxed{P_R = \frac{DV_1^2}{R}}$$

- As formas de onda da corrente e tensão na chave S estão representadas a seguir:

Assim:

$$V_{Smed} = \frac{(1-D)T \cdot V_1}{T} \Rightarrow \boxed{V_{Smed} = (1-D)V_1}$$

$$I_{Smed} = \frac{V_1 \cdot DT}{R \cdot T} \Rightarrow \boxed{I_{Smed} = D \frac{V_1}{R}}$$



- d) No intervalo $(0, DT)$, a tensão sobre a chave é igual a zero. Assim, o produto $v_s(t) \cdot i_s(t) = 0$. Durante o intervalo (DT, T) , a corrente é igual a zero. Assim, $v_s(t) \cdot i_s(t) = 0$. Desse modo, fica demonstrado que a potência dissipada numa chave ideal é igual a zero.

2^a) Seja o exemplo anterior. Sejam os seguintes dados:

$$V_1 = 100\text{V}; \quad R = 20\Omega; \quad D = 0,5$$

Calcular V_{Rmed} , V_{Ref} e P_R :

SOLUÇÃO:

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad V_{Rmed} &= D \cdot V_1 = 0,5 \cdot 100 = 50\text{V} \\ \text{(b)} \quad V_{Ref} &= \sqrt{D} \cdot V_1 = 0,707 \cdot 100 = 70,7\text{V} \\ \text{(c)} \quad P_R &= \frac{V_{Ref}^2}{R} = \frac{70,7^2}{20} = 250\text{ W} \end{aligned}$$

- 3^a) No circuito apresentado na Fig. 1.8 deseja-se uma tensão média na carga de 150V. A chave S opera com uma frequência $f = 20\text{kHz}$, e a tensão de entrada V_1 foi ajustada em 200V. Admitindo que a potência dissipada na carga seja de 300W, determinar:

- A razão cíclica (D);
- A tensão eficaz na carga (V_{Rmed});
- Valor da resistência de carga (R);
- A Corrente média na carga (I_{Rmed});
- As formas de onda de tensão e corrente na carga.

SOLUÇÃO:

- a) Razão cíclica (D).

A razão cíclica D pode ser obtida a partir da seguinte expressão:

$$V_{Rmed} = D \cdot V_1 \Rightarrow D = \frac{V_{Rmed}}{V_1} = \frac{150}{200}$$

$$\boxed{D = 0,75}$$

- b) Tensão eficaz na carga (V_{Ref}).

Segundo o item (a) do exercício resolvido (1), tem-se:

$$V_{Ref} = \sqrt{D} \cdot V_1 \quad \therefore \quad V_{Ref} = \sqrt{0,75} \cdot 200$$

$$\boxed{V_{Ref} = 173,20\text{V}}$$

- c) Valor da resistência de carga (R).

Aplicando a expressão da potência dissipada na carga, obtém-se:

$$P_R = \frac{D \cdot V_1^2}{R} \quad \therefore \quad R = \frac{D \cdot V_1^2}{P_R} = \frac{0,75 \cdot 200^2}{300}$$

$$\boxed{R = 100\Omega}$$

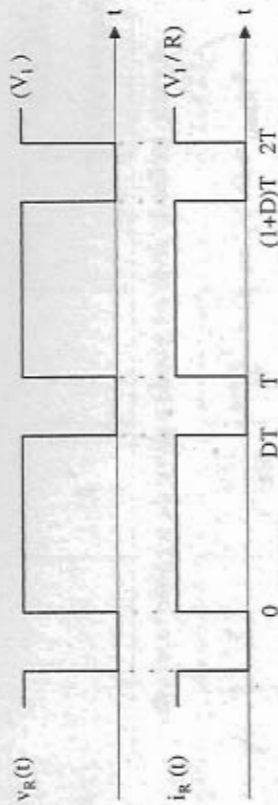
- d) Corrente média na carga (I_{Rmed}).

A corrente média na carga é dada por:

$$V_{Rmed} = R \cdot I_{Rmed} \quad \therefore \quad I_{Rmed} = \frac{V_{Rmed}}{R} = \frac{150}{100}$$

$$\boxed{I_{Rmed} = 1,5\text{A}}$$

- e) Formas de onda de tensão e corrente na carga.



4º) Para as mesmas condições apresentadas no exercício anterior, determinar:

- A corrente máxima, eficaz e média na chave S (I_{Smax} , I_{Sef} e I_{Smed});
- A tensão máxima e média na chave S (V_{Smax} , V_{Smed});
- O tempo durante o qual a chave S permanece em condução (t_c);
- As formas de onda de tensão e corrente na chave S.

SOLUÇÃO:

- Corrente máxima, eficaz e média na chave S (I_{Smax} , I_{Sef} e I_{Smed}).

A corrente máxima na chave S é dada pela expressão:

$$I_{Smax} = \frac{V_1}{R} = \frac{200}{100}$$

$$I_{Smax} = 2,0A$$

A corrente eficaz na chave S pode ser obtida da seguinte forma:

$$I_{Sef} = I_{Ref} = \frac{V_{Ref}}{R} = \frac{\sqrt{D} \cdot V_1}{R} = \frac{\sqrt{0,75} \cdot 200}{100}$$

$$I_{Sef} = 1,73A$$

A partir do equacionamento desenvolvido no exercício resolvido (1), tem-se que:

$$I_{Smed} = \frac{D \cdot V_1}{R} = I_{Rmed}$$

Assim:

$$I_{Smed} = 1,5A$$

- Tensão máxima e média na chave S (V_{Smax} , V_{Smed}).

Quando a chave S está aberta a tensão máxima nos seus terminais é:

$$V_{Smax} = 200V$$

A tensão média é dada por:

$$V_{Smed} = (1-D)V_1 \Rightarrow V_{Smed} = (1-0,75) \cdot 200$$

$$V_{Smed} = 50V$$

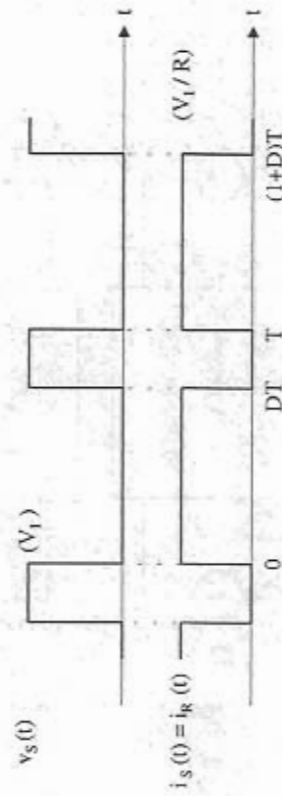
- Tempo durante o qual a chave S permanece em condução (t_c).

O tempo durante o qual a chave S fica fechada é dado por:

$$t_f = D \cdot T = \frac{D}{f} \quad \therefore \quad t_f = \frac{0,75}{20kHz}$$

$$t_f = 37,5\mu s$$

- Formas de onda de tensão e corrente na chave S.



1.6.2. EXERCÍCIOS PROPOSTOS

1º) Imagine uma situação onde se dispõem de um barramento em corrente contínua de 180V, e se deseja manter a tensão nos terminais da carga em 120V. O sistema é concebido de forma a evitar o uso de transformadores. Pergunta-se: qual dos conversores CC-CC não isolados, é o mais adequado para esta aplicação, e por quê?

2º) Qual a função básica de um conversor CC-CC?

3º) Por que na análise teórica dos conversores CC-CC chaveados é possível se considerar um rendimento de 100%?

4º) Entre os conversores CC-CC citados neste capítulo, quais os que podem operar tanto como elevador ou como abaixador de tensão, bastando para isso agir apenas sobre a razão cíclica D ?

5º) Qual a importância da reversibilidade dos conversores CC-CC nas aplicações industriais?

6º) Sejam os sistemas apresentados nas Figs. 1.9 e 1.10. Quais as estruturas de conversores CC-CC não isolados que podem ser aplicadas, de forma a permitir o controle de fluxo de energia entre as fontes? Apresente os respectivos circuitos.

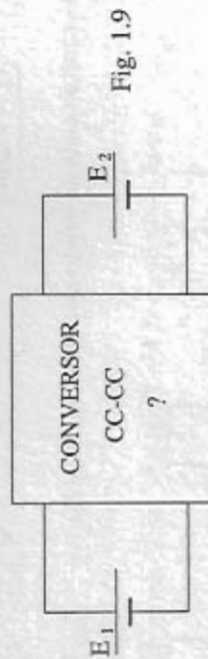


Fig. 1.9

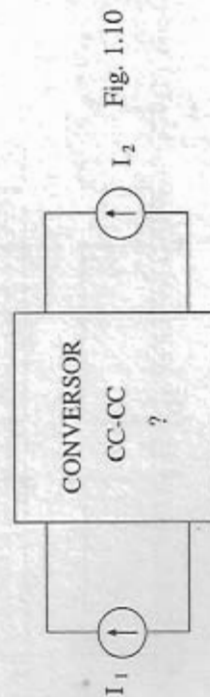


Fig. 1.10

7º) O circuito da Fig. 1.11 apresenta os seguintes valores: $V_1=150V$; $R=50\Omega$; $V_{Rmed} = 60V$, onde V_{Rmed} representa a tensão média sobre o resistor R . A chave

S é considerada ideal, abrindo e fechando periodicamente, com frequência igual a f . A partir desses dados determinar a:

- Razão cíclica (D);
- Corrente média no resistor R (I_{Rmed});
- Corrente máxima na chave S (I_{Smax});
- Tensão eficaz no resistor R (V_{Ref});
- Potência dissipada no resistor R (P_R).

Apresente ainda, as formas de onda de tensão e corrente no resistor R .



Fig. 1.11: Circuito equivalente de um regulador chaveado.

8º) Para as mesmas condições apresentadas no exercício anterior, determinar:

- A corrente média e eficaz na chave S (I_{Smed} ; I_{Sef});
- A tensão máxima e média na chave S (V_{Smax} ; V_{Smed});
- As formas de onda de tensão e corrente na chave S ;
- O tempo durante o qual a chave S permanece fechada (t_f), considerando que a mesma opera com uma frequência de 50kHz.