



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

---

## ES664 - Laboratório de Eletrônica para Automação Industrial

### Relatório - Simulação 3 Conversores DC-DC

---

*Nome:*

Daniel Dello Russo Oliveira  
Marcelli Tiemi Kian

*RA*

101918  
117892

7 de outubro de 2016

# 1 Objetivos

Essa simulação tem como objetivo o estudo dos conversores step-down (buck), step-up (boost) e seus modos de condução contínua e descontínua.

## 2 Conversor Buck

Através do Simulink implementamos o conversor step-down detalhado na figura 1.

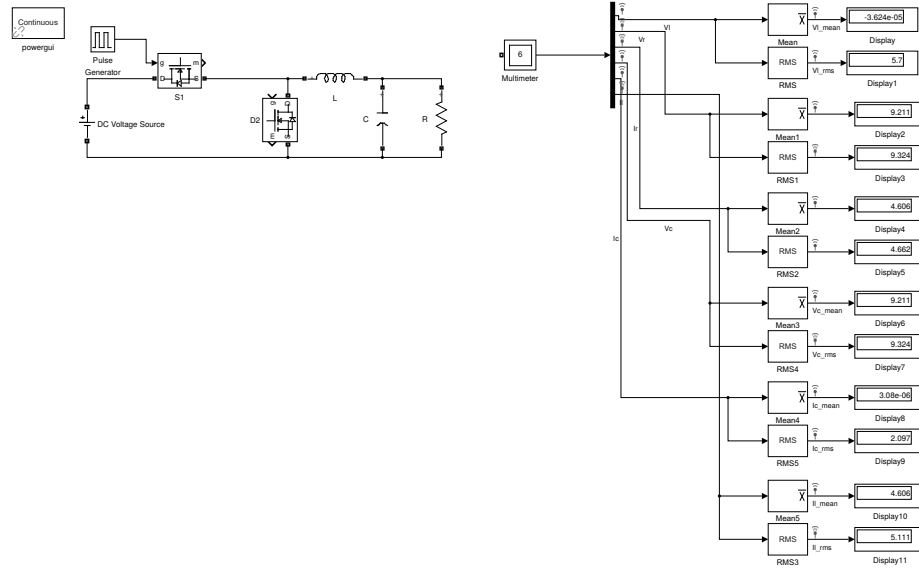


Figura 1: Esquema para simulação do conversor buck

Conforme detalhados no roteiro, setamos os parâmetros  $R = 2\Omega$ ,  $C = 220\mu F$ ,  $L = 330\mu H$  e simulamos o sistema com uma frequência  $f = 1kHz$  e duty-cycle de 80% na chave S1.

Extraímos dessa simulação as curvas de tensão e corrente na carga (figura 2), no indutor (figura 3), no capacitor (figura 4), na chave S1 (figura 5) e no diodo D2 (figura 6).

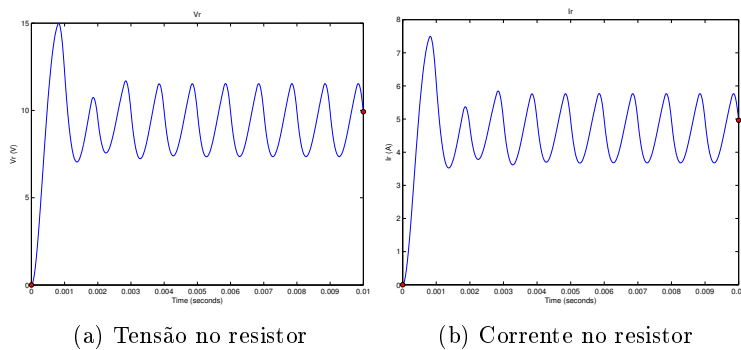


Figura 2: Curvas do resistor para conversor buck

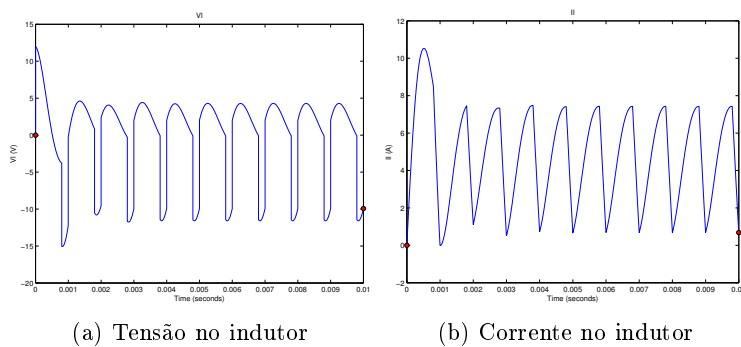


Figura 3: Curvas do indutor para conversor buck

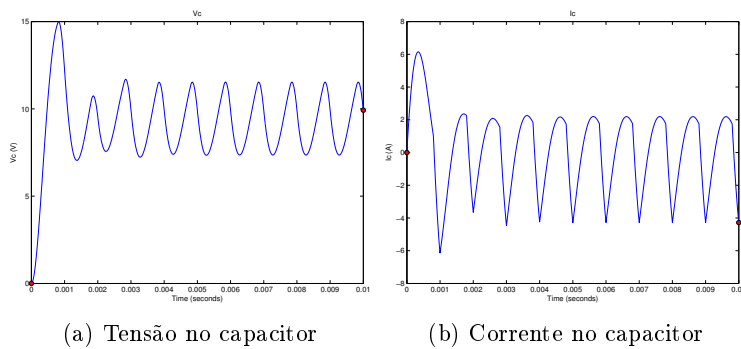
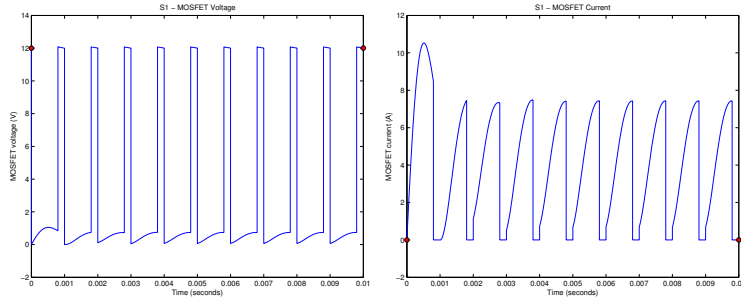


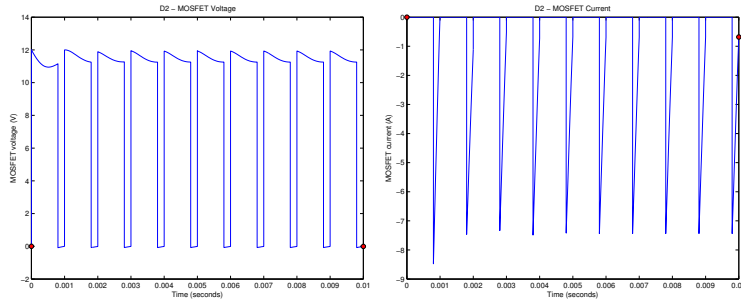
Figura 4: Curvas do capacitor para conversor buck



(a) Tensão na chave S1

(b) Corrente na chave S1

Figura 5: Curvas da chave S1 para conversor buck



(a) Tensão no diodo D2

(b) Corrente no diodo D2

Figura 6: Curvas do diodo D2 para conversor buck

Medimos as tensões média e efetiva no resistor, obtendo os seguintes valores:

$$\overline{Vr} = 9.2111 \text{ V} \quad (1)$$

$$Vr_{rms} = 9.3240 \text{ V} \quad (2)$$

Conforme podemos ver analisando as curvas, a chave S1 corta a tensão de entrada. Quando esta está ligada, a tensão de alimentação transfere energia para o indutor e para o capacitor. Uma vez que a chave é desligada o diodo D2 passa a conduzir e o indutor transfere esse energia para a carga enquanto capacitor faz o mesmo de maneira a garantir uma corrente quase constante na carga.

Podemos calcular a tensão média teórica sobre a carga através considerando

que:

$$\int_0^T V l dt = \int_0^T \frac{L dI}{dt} dt = \frac{LI}{T} \Big|_0^T \quad (3)$$

Como nossa resposta é periódica, sabemos que  $I(0) = I(T)$  logo:

$$\overline{Vl} = 0 \quad (4)$$

Para condução contínua, teremos que quando S1 está ligada:

$$Vl = V - Vr \quad (5)$$

E quando está desligada (D2 está conduzindo):

$$Vl = -Vr \quad (6)$$

Logo temos:

$$\int_0^T V l dt = (V - Vr)DT - Vr(1 - D)T = 0 \quad (7)$$

$$\overline{Vr} = VD \quad (8)$$

Para condução descontínua ( $L < L_b$ ), supondo que o período em que a corrente sobre o indutor é nula seja  $t_x$ , temos quando S1 está ligada:

$$Vl = V - Vr \quad (9)$$

E quando está desligada (D1 está conduzindo) e Il não nula:

$$Vl = Vr \quad (10)$$

Quando Il é nula:

$$Vl = 0 \quad (11)$$

Logo temos:

$$\int_0^T V l dt = (V - Vr)DT - Vr[(1 - D)T - t_x] = 0 \quad (12)$$

Encontramos então:

$$\overline{Vr} = V \frac{D^2}{D^2 + 2K} \quad (13)$$

Com K:

$$K = \frac{LI_o}{VT} \quad (14)$$

Onde  $I_o$  é a corrente na saída do conversor.

Variamos então o valor do duty-cycle entre 0 e 100% e encontramos a tensão média sobre a carga. Comparamos esse valor com o valor teórico esperado na figura 7

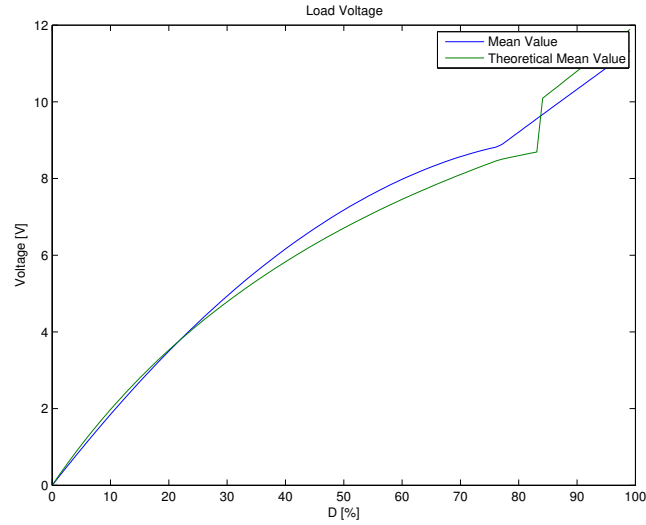


Figura 7: Tensão média no resistor para conversor buck

Como podemos ver os valores obtidos são bem próximos dos esperados teoricamente, as poucas discrepâncias podem ser atribuídas às imprecisões numéricas da simulação, à queda de tensão introduzida pelos diodos, ao pequeno período de amostragem, aos componentes não ideais e a diversos outros fatores.

Podemos calcular o valor da indutância limite  $L_b$  para que o conversor trabalhe em modo de condução contínua utilizando a equação:

$$L_b = \frac{(1 - D)R}{2f_s} \quad (15)$$

Para um duty-cycle  $D = 80\%$ , temos:

$$L_b = 400\mu H \quad (16)$$

Ajustamos então nosso indutor para  $L = \frac{L_b}{2} = 200\mu H$  e rodamos a simulação novamente, obtendo os resultados apresentados nas figuras 8, 9, 10, 11, 12.

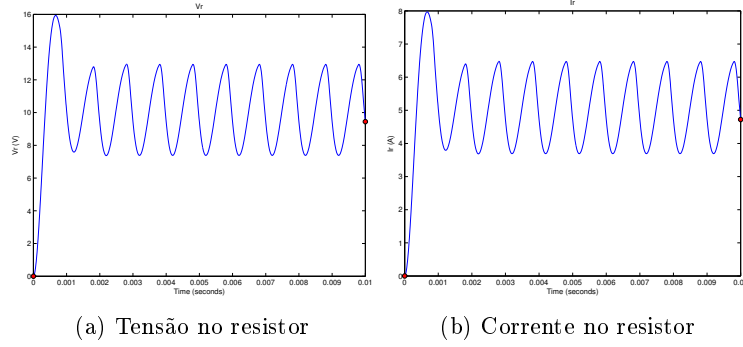


Figura 8: Curvas do resistor para conversor buck com indutância  $\frac{L_b}{2}$

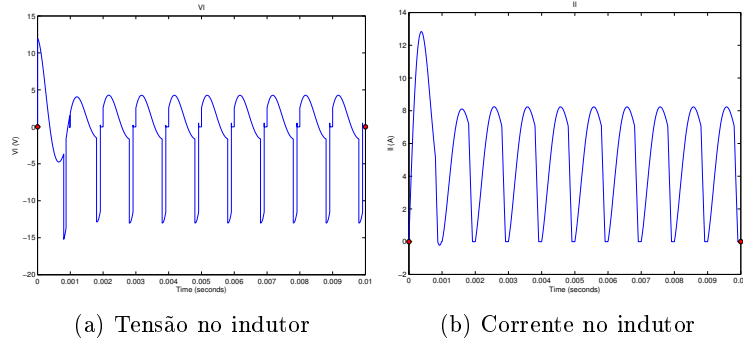


Figura 9: Curvas do indutor para conversor buck com indutância  $\frac{L_b}{2}$

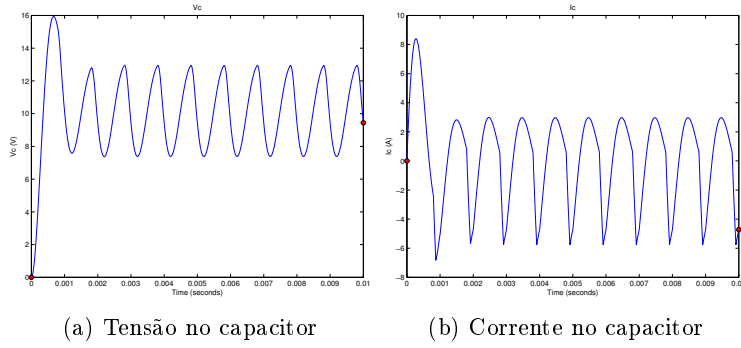


Figura 10: Curvas do capacitor para conversor buck com indutância  $\frac{L_b}{2}$

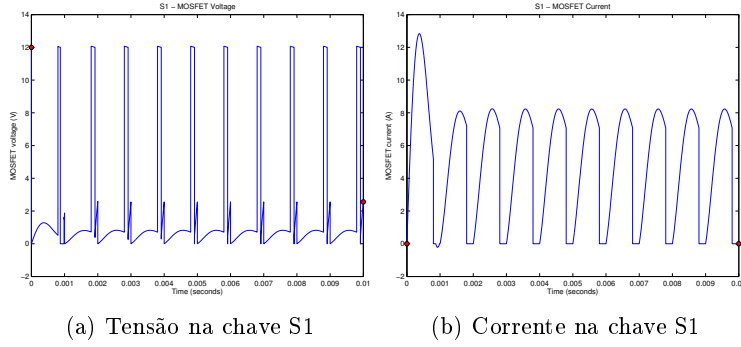


Figura 11: Curvas da chave S1 para conversor buck com indutância  $\frac{L_b}{2}$

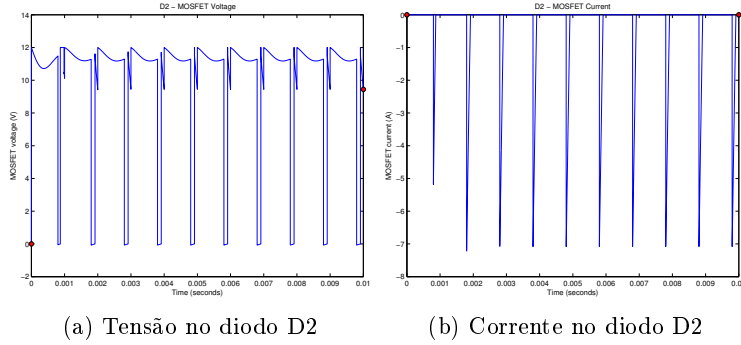


Figura 12: Curvas do diodo D2 para conversor buck com indutância  $\frac{L_b}{2}$

Vemos que no modo de condução descontínua a corrente sobre o indutor chega a zero, nesse caso a tensão sobre o indutor assume valor nulo durante



parte do período. Isso causa uma mudança na resposta do circuito conforme detalhado nas equações teóricas acima.

Por fim voltamos a nossa indutância original porém retiramos o filtro capacitivo, encontramos então a curva de tensão sobre o resistor apresentada na figura 13.

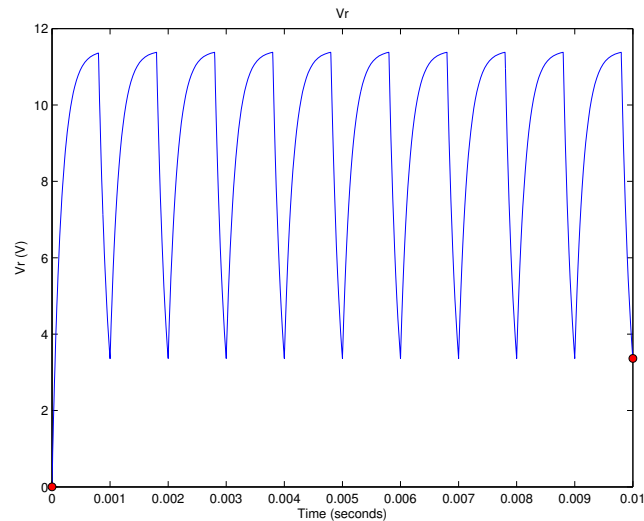


Figura 13: Tensão no resistor para conversor buck sem filtro capacitivo

Podemos ver que sem o filtro capacitivo as variações de tensão sobre a carga são bem mais drásticas e a resposta do circuito fica mais longe de uma resposta constante.

### 3 Conversor Boost

Através do Simulink implementamos o conversor step-up detalhado na figura 14.

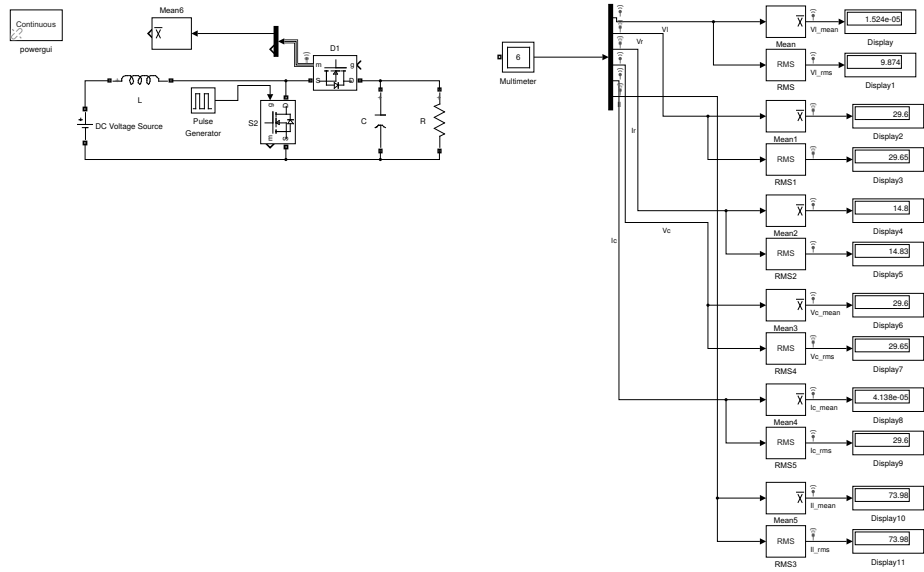


Figura 14: Esquema para simulação do conversor boost

Conforme detalhados no roteiro, setamos os parâmetros  $R = 2\Omega$ ,  $C = 220\mu F$ ,  $L = 330\mu H$  e simulamos o sistema com uma frequência  $f = 10kHz$  e duty-cycle de 80% na chave S2. Extraímos dessa simulação as curvas de tensão e corrente na carga (figura 15), no indutor (figura 16), no capacitor (figura 17), na chave S2 (figura 18) e no diodo D1 (figura 19).

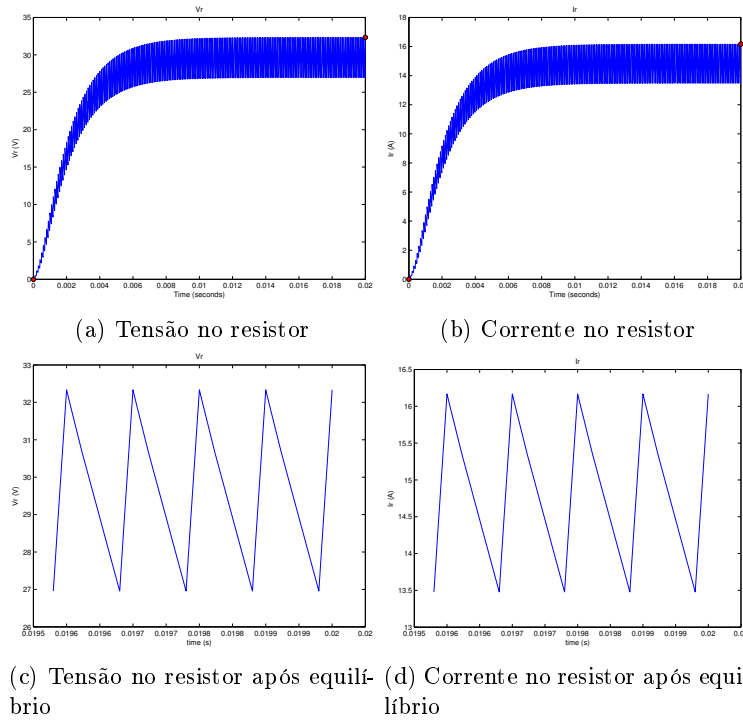


Figura 15: Curvas do resistor para conversor boost

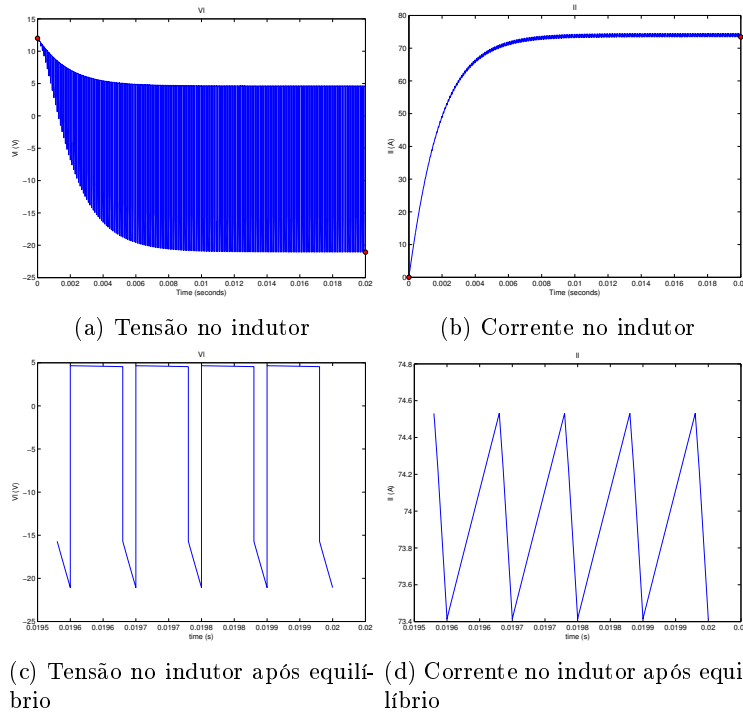
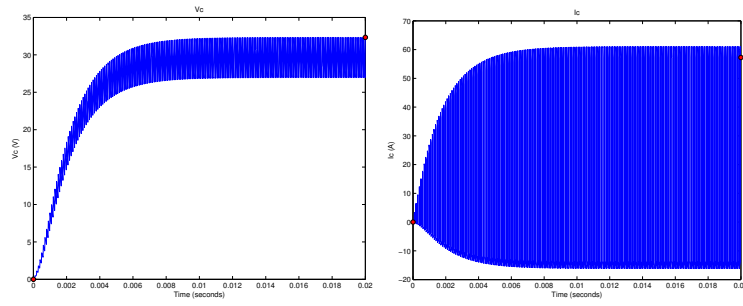
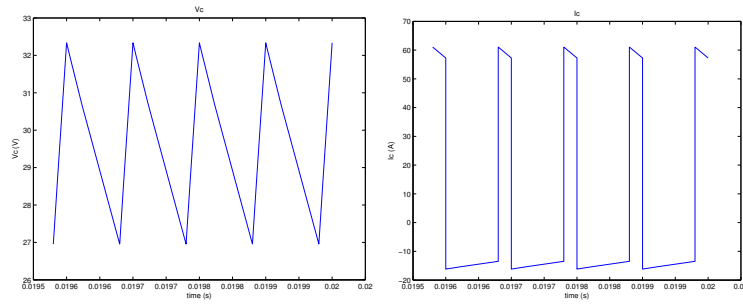


Figura 16: Curvas do indutor para conversor boost



(a) Tensão no capacitor

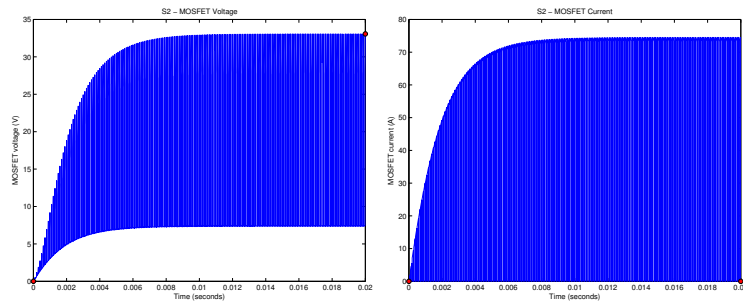
(b) Corrente no capacitor



(c) Tensão no capacitor após equilíbrio

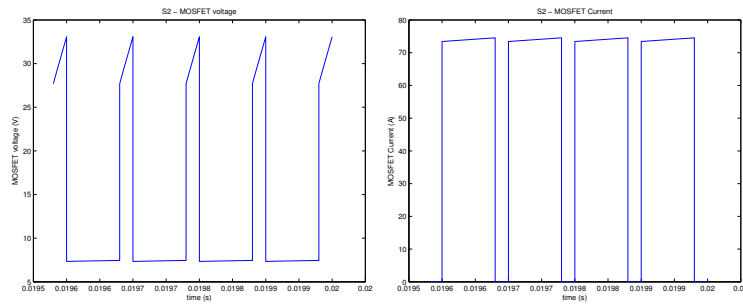
(d) Corrente no capacitor após equilíbrio

Figura 17: Curvas do capacitor para conversor boost



(a) Tensão na chave S2

(b) Corrente na chave S2



(c) Tensão na chave S2 após equi-  
líbrio

(d) Corrente na chave S2 após  
equilíbrio

Figura 18: Curvas da chave S2 para conversor boost

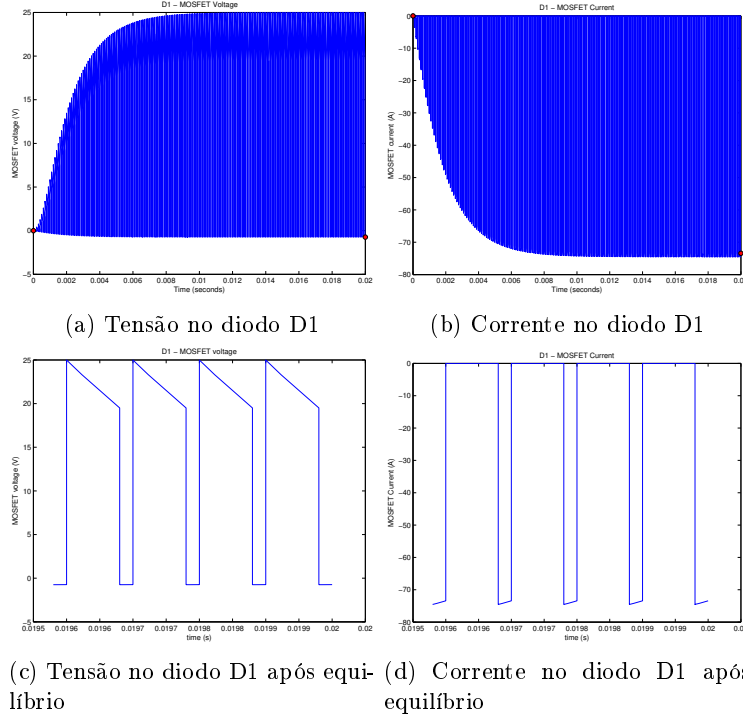


Figura 19: Curvas do diodo D1 para conversor boost

Medimos as tensões média e efetiva no resistor, obtendo os seguintes valores:

$$\overline{V_r} = 29.6 \text{ V} \quad (17)$$

$$V_{r_{rms}} = 29.65 \text{ V} \quad (18)$$

Conforme podemos ver analisando as curvas, quando a chave S2 está ligada, a tensão de alimentação é aplicada sobre o indutor e o diodo D1 estará reversamente polarizado. O indutor acumulará energia e a transferirá ao capacitor e à carga quando a chave S2 desligar.

Podemos calcular a tensão média teórica sobre a carga através considerando que:

$$\int_0^T V l dt = \int_0^T \frac{L dI}{dt} dt = \frac{LI}{T} \Big|_0^T \quad (19)$$

Como nossa resposta é periódica, sabemos que  $I(0) = I(T)$  logo:

$$\overline{Vl} = 0 \quad (20)$$

Para condução contínua, teremos que quando S2 está ligada:

$$Vl = V \quad (21)$$

E quando está desligada (D1 está conduzindo):

$$Vl = -(Vr - V) \quad (22)$$

Logo temos:

$$\int_0^T Vldt = VDT - (Vr - V)(1 - D)T = 0 \quad (23)$$

$$\overline{Vr} = \frac{V}{1 - D} \quad (24)$$

Para condução descontínua ( $L < L_b$ ), supondo que o período em que a corrente sobre o indutor é nula seja  $t_x$ , temos quando S2 está ligada:

$$Vl = V \quad (25)$$

E quando está desligada (D1 está conduzindo) e Il não nula:

$$Vl = -(Vr - V) \quad (26)$$

Quando Il é nula:

$$Vl = 0 \quad (27)$$

Logo temos:

$$\int_0^T Vldt = VDT - (Vr - V)[(1 - D)T - t_x] = 0 \quad (28)$$

Encontramos então:

$$\overline{Vr} = V(1 + \frac{D^2}{2K}) \quad (29)$$

Com K:

$$K = \frac{LI_o}{VT} \quad (30)$$



Onde  $I_o$  é a corrente na saída do conversor.

Variamos então o valor do duty-cycle entre 0 e 100% e encontramos a tensão média sobre a carga. Comparamos esse valor com o valor teórico esperado na figura 20

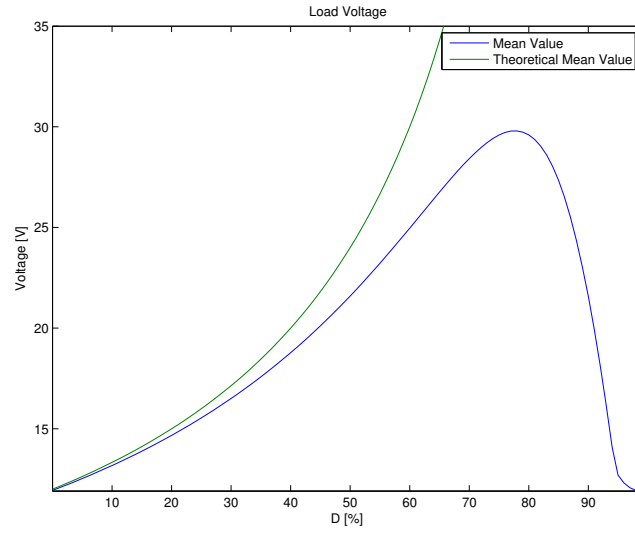


Figura 20: Tensão média no resistor para conversor boost

Como podemos ver os valores obtidos diferem dos esperados teoricamente, principalmente para duty-cycles altos, isso se notavelmente aos efeitos parasíticos introduzidos pelos componentes não ideais que evitam que toda a potência fornecida seja transferida ao resistor (Notamos que ao transformar nossas chaves em chaves ideais as duas curvas se aproximam mais conforme figura 21).

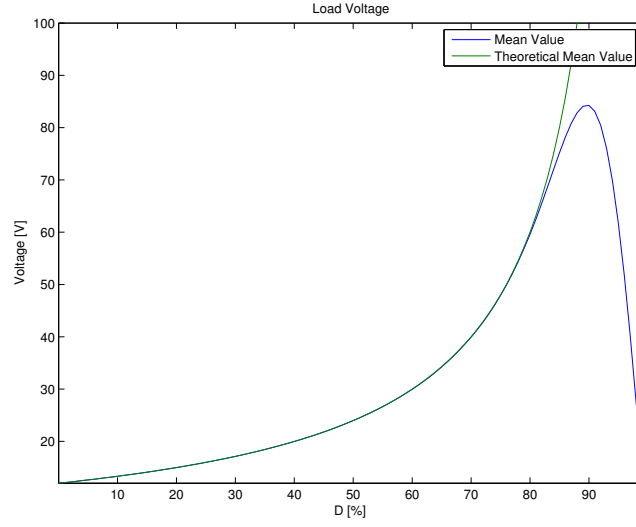


Figura 21: Tensão média no resistor para conversor boost com componentes ideais

Podemos calcular o valor da indutância limite  $L_b$  para que o conversor trabalhe em modo de condução contínua utilizando a equação:

$$L_b = \frac{(1 - D)^2 DR}{2f_s} \quad (31)$$

Para um duty-cycle  $D = 80\%$ , temos:

$$L_b = 3.2\mu H \quad (32)$$

Ajustamos então nosso indutor para  $L = \frac{L_b}{2} = 1.6\mu H$  e rodamos a simulação novamente, obtendo os resultados apresentados nas figuras 22, 23, 24, 25, 26.

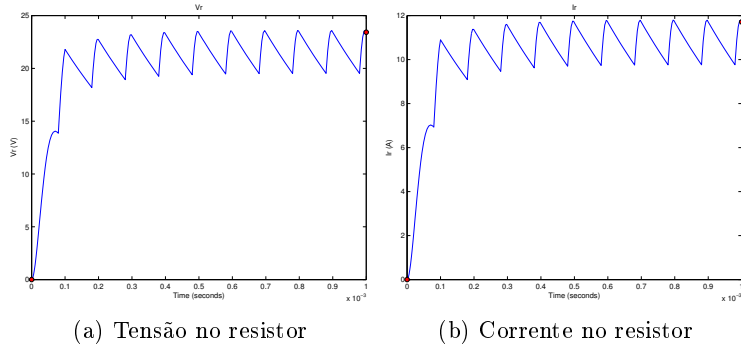


Figura 22: Curvas do resistor para conversor boost com indutância  $\frac{L_b}{2}$

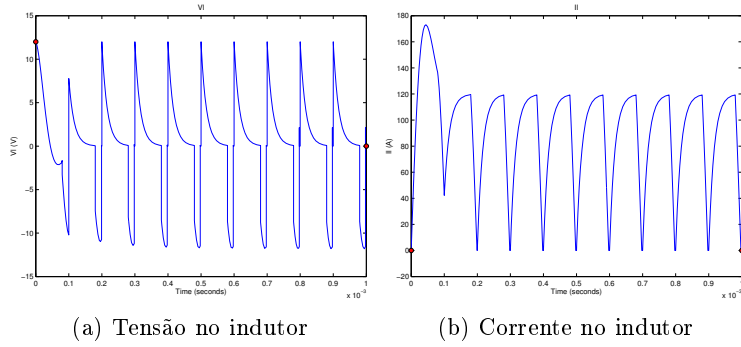


Figura 23: Curvas do indutor para conversor boost com indutância  $\frac{L_b}{2}$

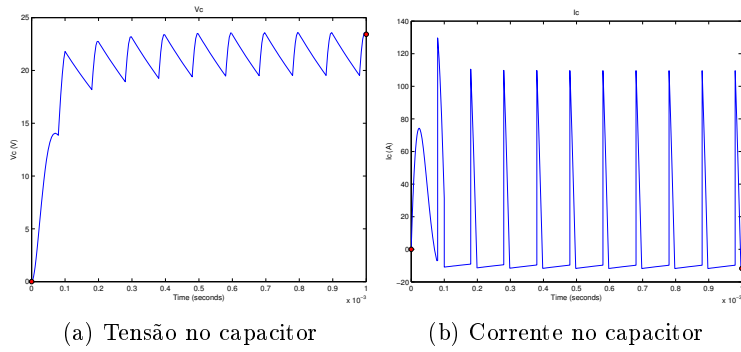


Figura 24: Curvas do capacitor para conversor boost com indutância  $\frac{L_b}{2}$

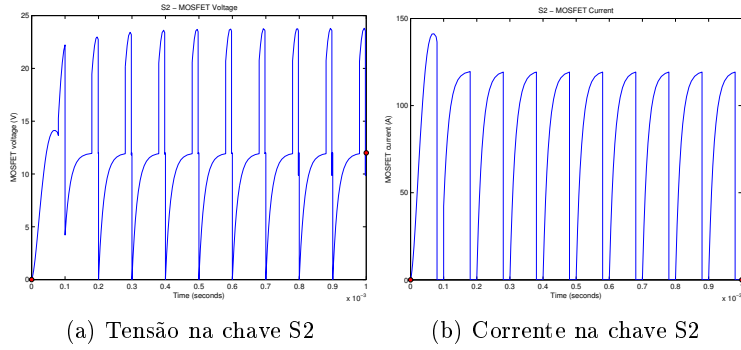


Figura 25: Curvas da chave S2 para conversor boost com indutância  $\frac{L_b}{2}$

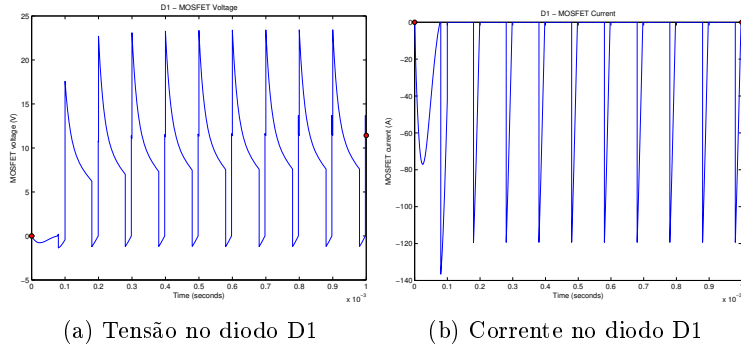


Figura 26: Curvas do diodo D1 para conversor boost com indutância  $\frac{L_b}{2}$

Vemos que no modo de condução descontínua a corrente sobre o indutor chega a zero, nesse caso a tensão sobre o indutor assume valor nulo durante parte do período. Isso causa uma mudança na resposta do circuito conforme detalhado nas equações teóricas acima.

Podemos ver que ao permutar a carga e o capacitor do circuito apresentado na figura 1 com a fonte de tensão e trocar o gerador de pulso para que esse controle o outro mosfet, obtemos o circuito da figura 14. Quando a fonte está próxima ao mosfet 1 e este está chaveando, nosso conversor opera em modo buck, quando a carga está próxima do mosfet 1 e o mosfet 2 está chaveando nosso conversor opera em modo boost.