



Universidade do Porto  
Faculdade de Engenharia  
**FEUP**

## **Conversor DC/DC abaixador – topologia *Buck***

Bruno Filipe Torres Costa  
Tiago Henrique Almeida de Sousa

Relatório do Trabalho Prático 1 realizado no âmbito da Unidade Curricular  
Conversão de Energia, da  
Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica e Computadores

21-03-2023

Declaramos que o presente trabalho/relatório é da nossa autoria e não foi utilizado previamente noutro curso ou unidade curricular, desta ou de outra instituição. As referências a outros autores (afirmações, ideias, pensamentos) respeitam escrupulosamente as regras da atribuição, e encontram-se devidamente indicadas no texto e nas referências bibliográficas, de acordo com as normas de referência. Temos consciência de que a prática de plágio e autoplágio constitui um ilícito académico.

In "Código Ético de Conduta Académica", art.14, Universidade do Porto.

# 1 Resumo

Este documento apresenta o estudo detalhado de um conversor DC/DC abaixador. Foi descrito o princípio de operação do conversor, apresentando o esquemático e as equações que regem o comportamento do sistema.

**Palavras-chave:** Conversor DC/DC, Topologia Buck, Eficiência energética, Controle de Tensão, Regime Contínuo/Descontínuo

## 2 Índice

1 Resumo.....	1
2 Índice.....	1
3 Introdução.....	1
4 Análise do Conversor Buck.....	1
4.1 Análise do funcionamento do conversor recorrendo ao simulador PSIM.....	1
4.2 Projeto parcial do conversor.....	10
4.3 Introdução de não idealidades no diodo, no transistor e na Bobine.....	12
5 Conclusões.....	15
6 Anexos.....	15
6.1 Esquema do conversor.....	15
6.2 Obtenção de uma onda quadrada.....	15
6.3 Esquema utilizado para variar as resistências entre 2.5 $\Omega$ e 5 $\Omega$ .....	16

## 3 Introdução

O conversor Buck é um circuito eletrônico de potência utilizado para transformar uma tensão de entrada mais alta em uma tensão de saída mais baixa. Também conhecido como conversor abaixador, o conversor Buck é amplamente utilizado em aplicações eletrônicas, incluindo fontes de alimentação, motores elétricos, lâmpadas LED entre outros.

O conversor Buck funciona utilizando um comando que liga e desliga com uma elevada frequência para controlar a energia que flui através do indutor, permitindo que a tensão de saída seja reduzida para uma tensão menor. Este conversor DC/DC abaixador é projetado para ser altamente eficiente apresentando perdas mínimas de energia sem comprometer a qualidade de energia na saída.

## 4 Análise do Conversor Buck

### 4.1 Análise do funcionamento do conversor recorrendo ao simulador PSIM

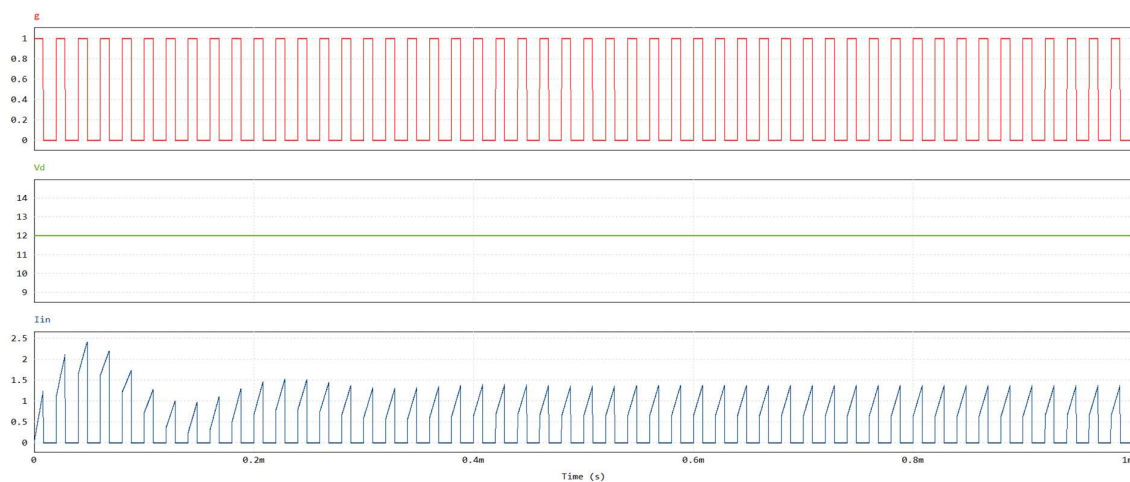
- a) Valores de configuração de F1 e F2 para obter uma onda de comando quadrada (Explicação detalhada presente nos anexos secção 6.2)

$$\text{Amplitude } F1 = \text{duty cycle} = \frac{5}{12} V \approx 42 \%$$

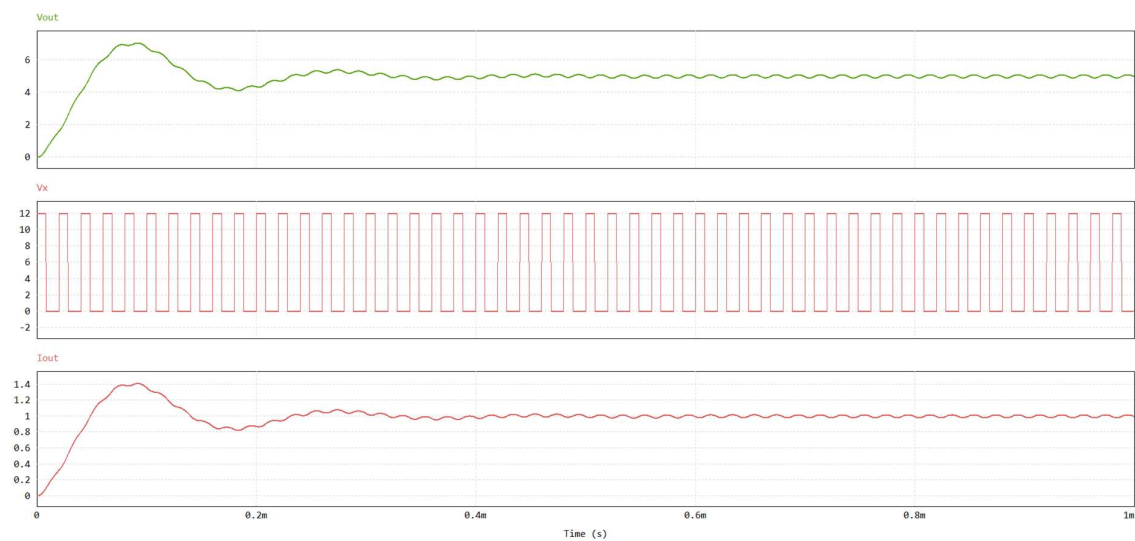
$$\text{Amplitude } F2 = 1V$$

$$\text{Frequência } F2 = 50 \text{ khz}$$

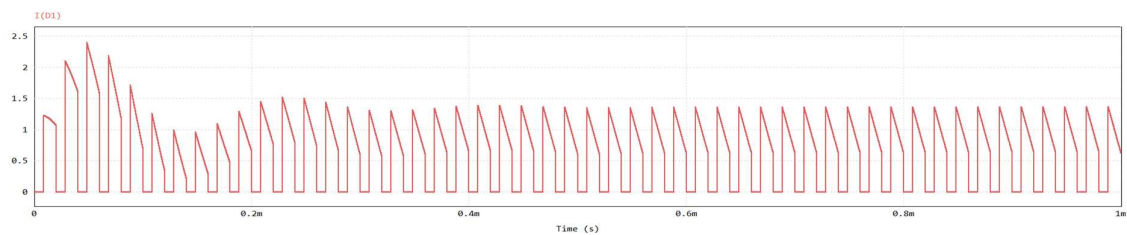
b) Formas de onda importantes no conversor (g),  $V_{in}$ ,  $I_{in}$ ,  $V_{out}$ ,  $V_x$ ,  $I_{out}$ ,  $V_d$ ,  $I_d$ ,  $V_L$ ,  $I_L$  e  $I_C$



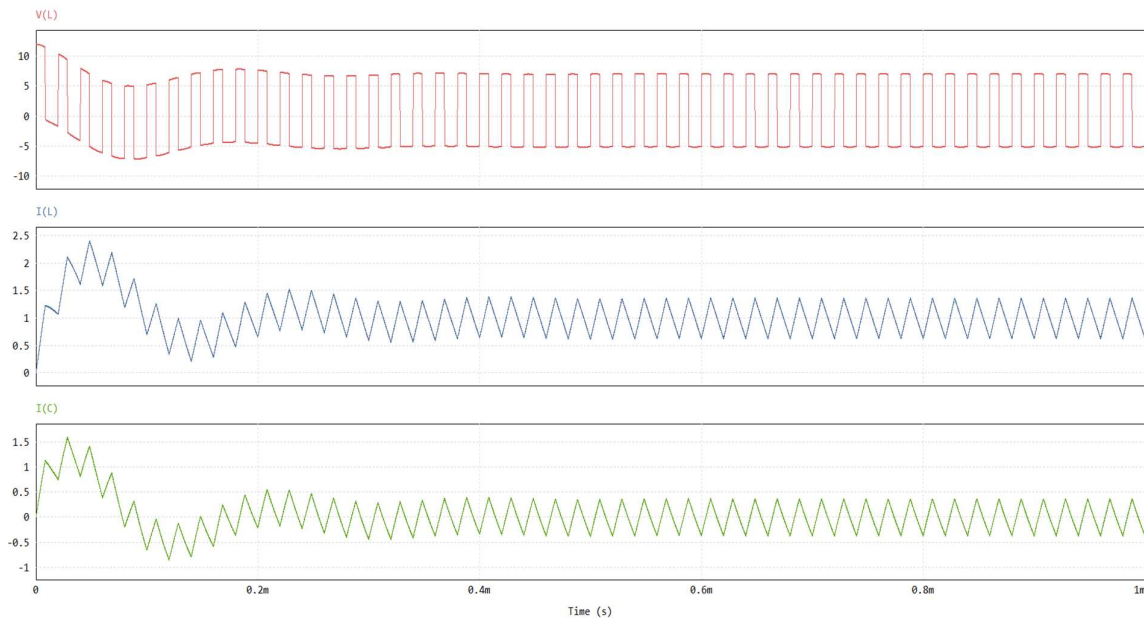
**Figura 1 Onda de Comando (g),  $V_{in} = V_d$  e  $I_{in}$ , respetivamente**



**Figura 2  $V_{out}$ ,  $V_x$  e  $I_{out}$ , respetivamente**



**Figura 3 Corrente no díodo ID1**

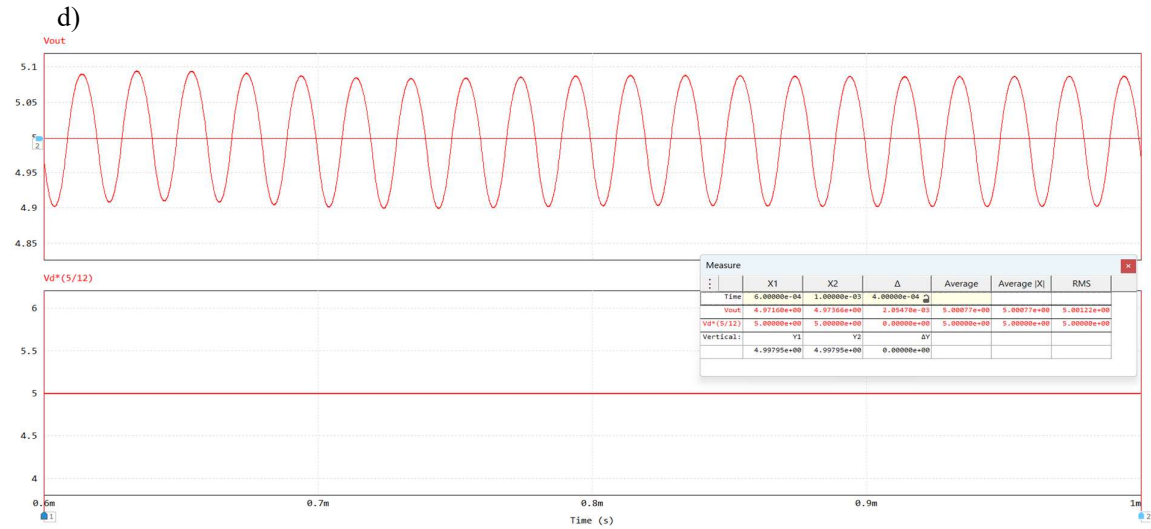


**Figura 4 VL, IL e IC, respetivamente**

- c) Neste tipo de conversores o duty cycle é o fator que nos permite controlar a quantidade de energia que é transmitida para a saída e a respetiva tensão de saída. De acordo com o tempo em que o comando se encontra ligado, uma determinada quantidade de energia é transmitida para a bobine que é armazenada através do seu campo magnético. Quando o comando se encontra desligado, o diódo entra em condução e a energia armazenada na bobine é transferida para a resistência e o condensador. Este efeito está bem evidente na corrente IL, figura 4, em que a corrente na bobina aumenta quando o comando se encontra ligado e diminui quando este se encontra desligado.

É possível também fazer uma análise concisa para as outras ondas do sistema:

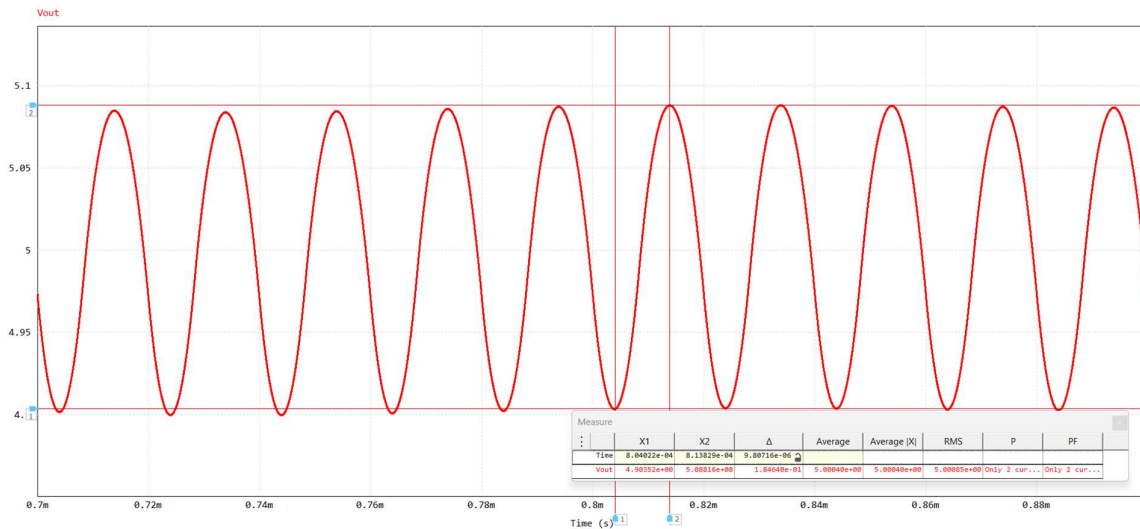
- A tensão  $V_x$  é igual a  $V_{in}$  quando o comando se encontra ligado e é igual ao contrário da queda de tensão no diódo quando o comando se encontra desligado, o que neste caso é zero uma vez que o diódo é ideal, como é possível identificar na figura 2.
- A tensão  $V_{out}$  e a corrente  $I_{out}$  esboçam a mesma curva uma vez que apenas diferem de um fator de escala, a resistência, como é possível identificar na figura 2.
- A corrente no diódo,  $ID1$ , é a corrente de entrada  $I_{in}$  subtraída da corrente da bobine  $I_L$ .
- A tensão  $V_L$  pode ser obtida derivando a corrente  $I_L$  a menos de um fator, facto observável na figura 4.



**Figura 5 Relação do valor médio de Vout com Vin e o duty cycle**

$$\langle V_{out} \rangle = V_{in} \delta \quad (1)$$

Como é possível observar através dos gráficos da figura 5, a relação presente na equação 1 é verdadeira.

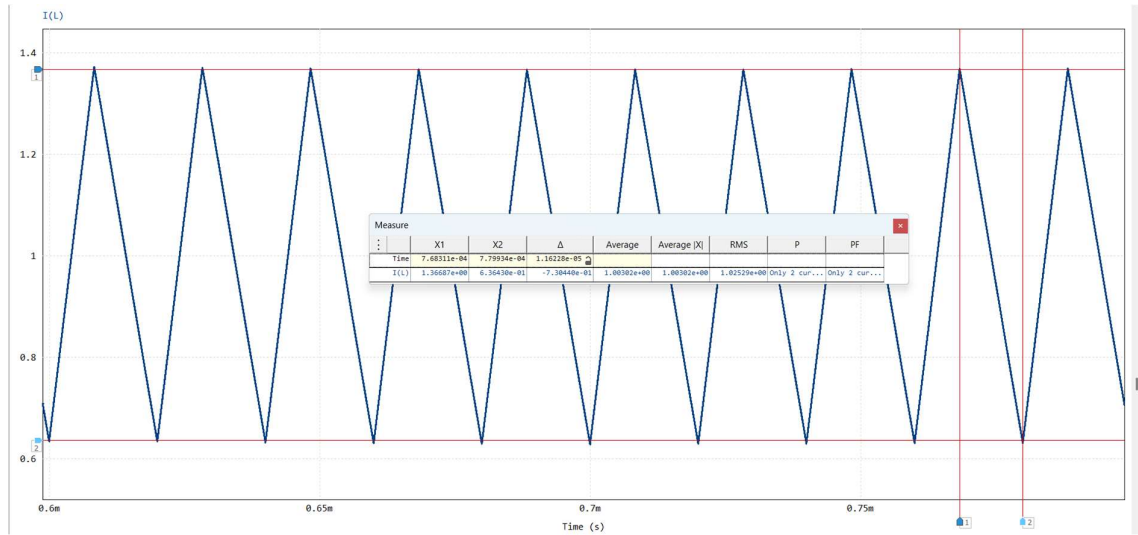


**Figura 6 Tensão de Ondulação de Vo (ΔVo)**

$$\Delta V_{o\_teórico} = \frac{T^2}{8LC} (1 - \delta) T \approx 0.1823 \text{ V} \quad (2)$$

Como é possível observar através da figura 6, a tensão de ondulação da saída de simulação tem um valor próximo do valor teórico:

- $\Delta V_{o\_teórico} \approx 0.1823 \text{ V}$
- $\Delta V_{o\_simulação} \approx 0.1846 \text{ V}$

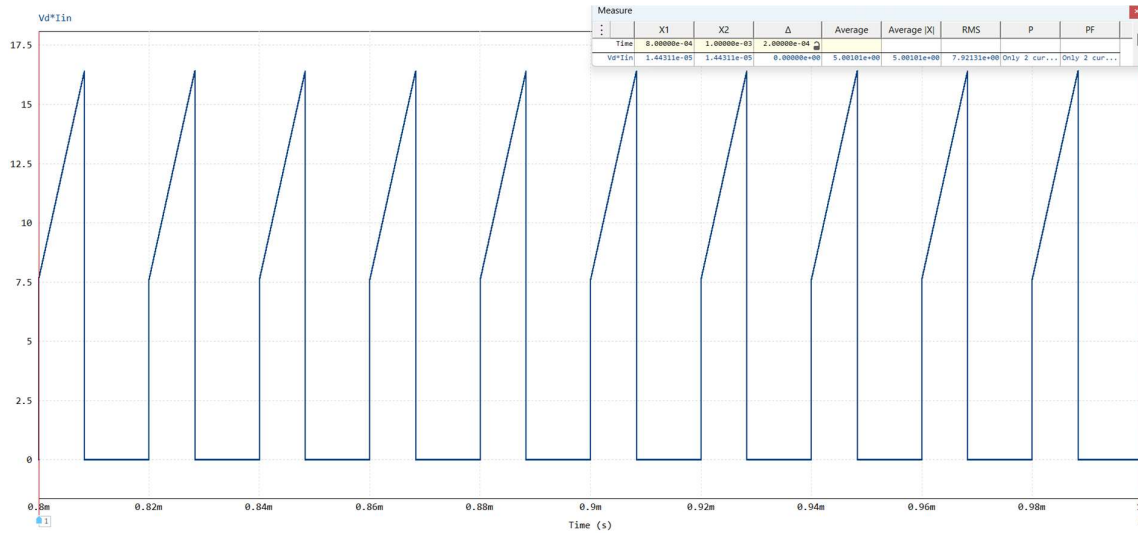


**Figura 7 Ondulação da Corrente da Bobina ( $\Delta I_L$ )**

$$\Delta I_{L\_teórico} = \frac{V_o}{L}(1 - \delta)T \approx 0.7292 A \quad (3)$$

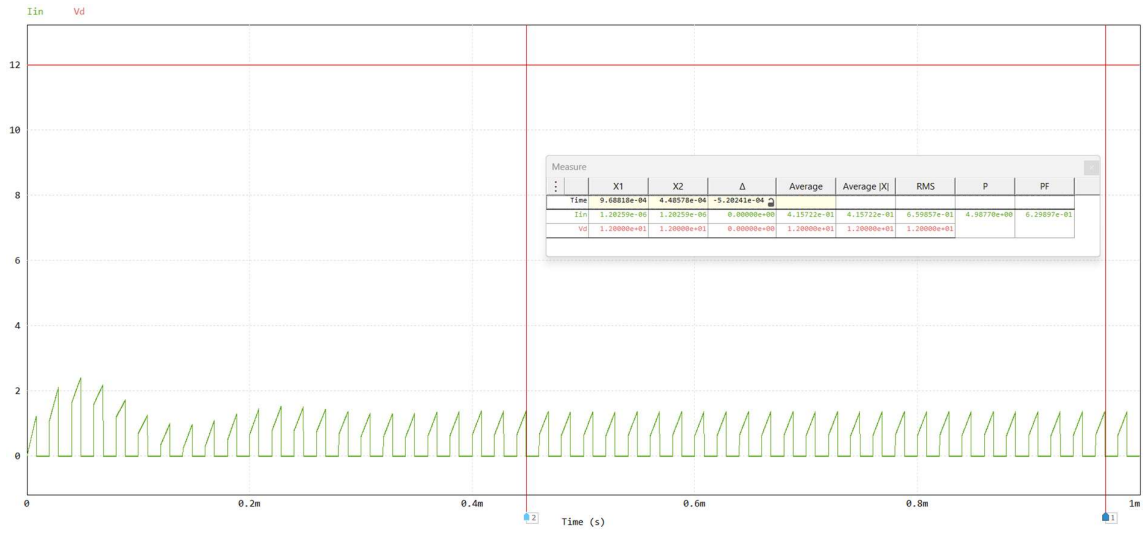
Como é possível observar através da figura 7, a corrente de ondulação da bobine de simulação tem um valor próximo do valor teórico:

- $\Delta I_{L\_teórico} \approx 0.7292 V$
- $\Delta I_{L\_simulação} \approx 0.7304 V$



**Figura 8 Pin (valor médio)**

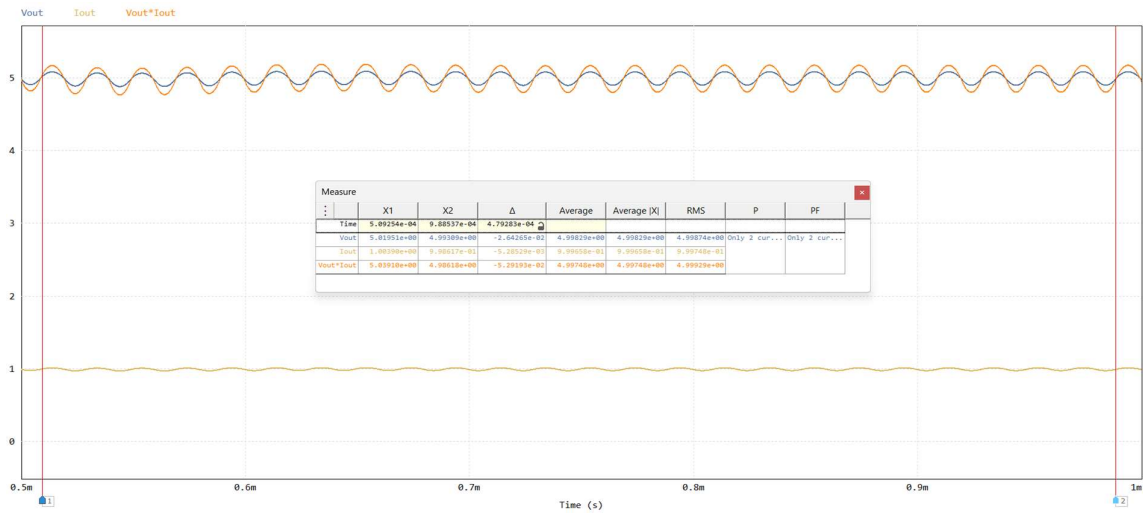
$$P_{in} = V_{in}(\text{constante}) < I_{in} > = 12 \times 0.41675 \approx 5.0010 W \quad (4)$$



**Figura 9 Potência Aparente (S)**

$$S = V_{in} I_{in\_Rms} = 12 \times 0,660 = 7.92 \text{ VA} \quad (5)$$

$$Pf = \frac{P_{in}}{S} = \frac{5.0010}{7.92} = 0.631 \quad (6)$$

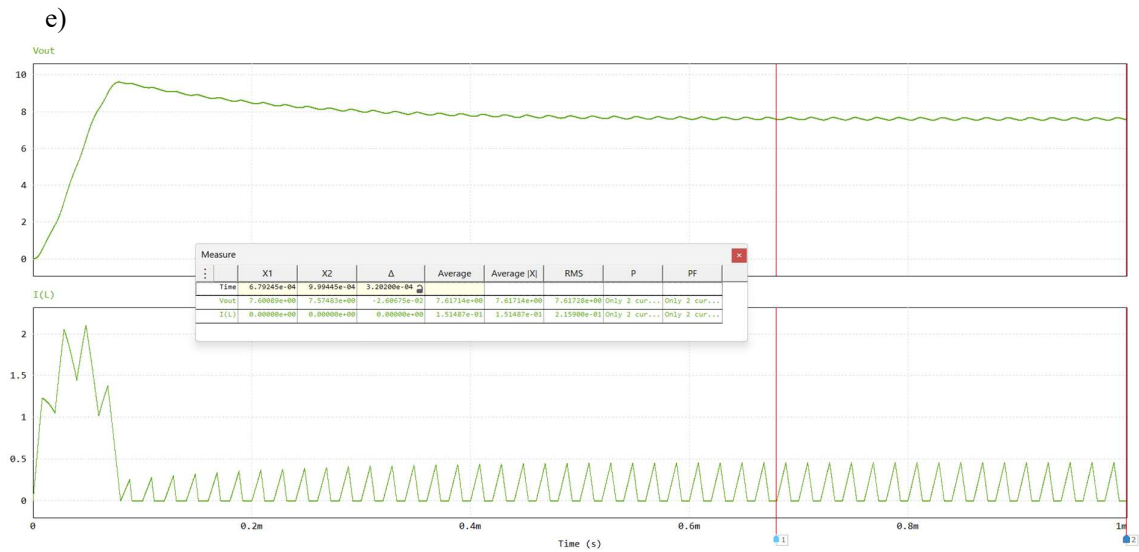


**Figura 10 Rendimento ( $\eta$ )**

$$P_{out} = 4.99 \text{ W} \quad (7)$$

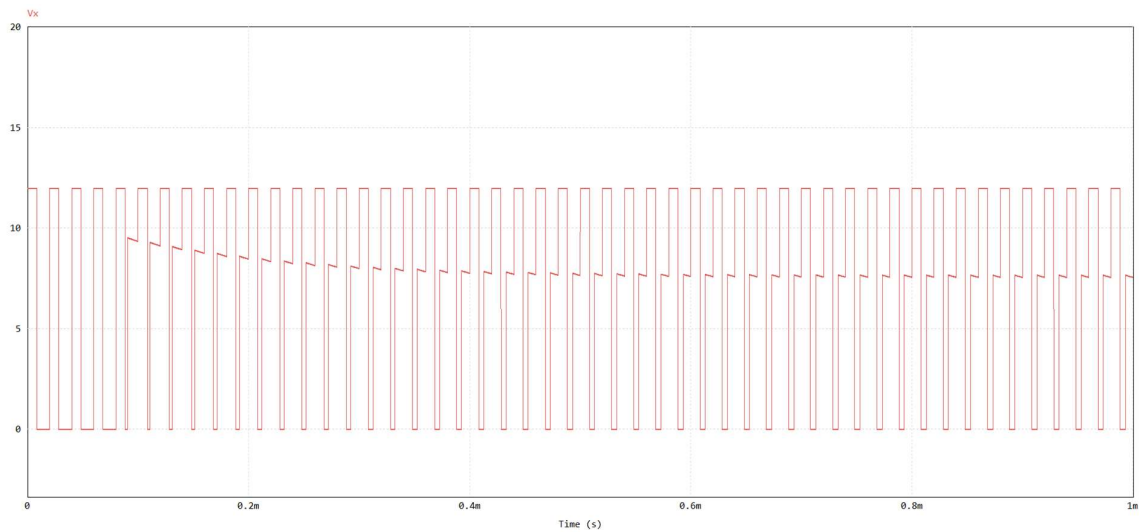
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \approx 99.78\% \quad (8)$$





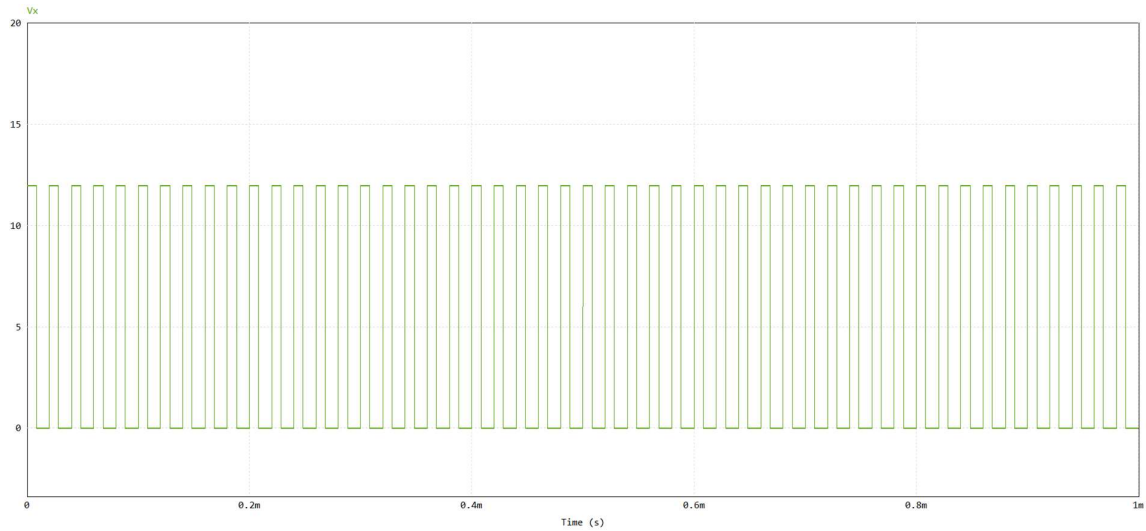
**Figura 11 Vout e IL em modo descontinuo com Rload = 50  $\Omega$**

$$\langle V_{out} \rangle \neq \delta V_{in} \quad (9)$$



**Figura 12 Vx com Rload = 50  $\Omega$**

A tensão  $V_x$  em regime contínuo deve variar entre  $V_{in}$  quando o comando SW se encontra ligado e o contrário da queda de tensão aos terminais do diodo D1 quando o comando SW se encontra desligado (figura13). Contudo, quando se varia a resistência de saída de 5 $\Omega$  para 50 $\Omega$  o mesmo já não acontece e a tensão  $V_x$  sofre uma alteração (figura 12). Este fenómeno deve-se ao facto da corrente mínima na bobine ter atingido o valor nulo e o sistema ter entrado num modo de funcionamento descontinuo, o que se verifica na figura 11 onde  $\langle V_{out} \rangle \neq 5V$  e  $I_{L_{min}} = 0A$ .



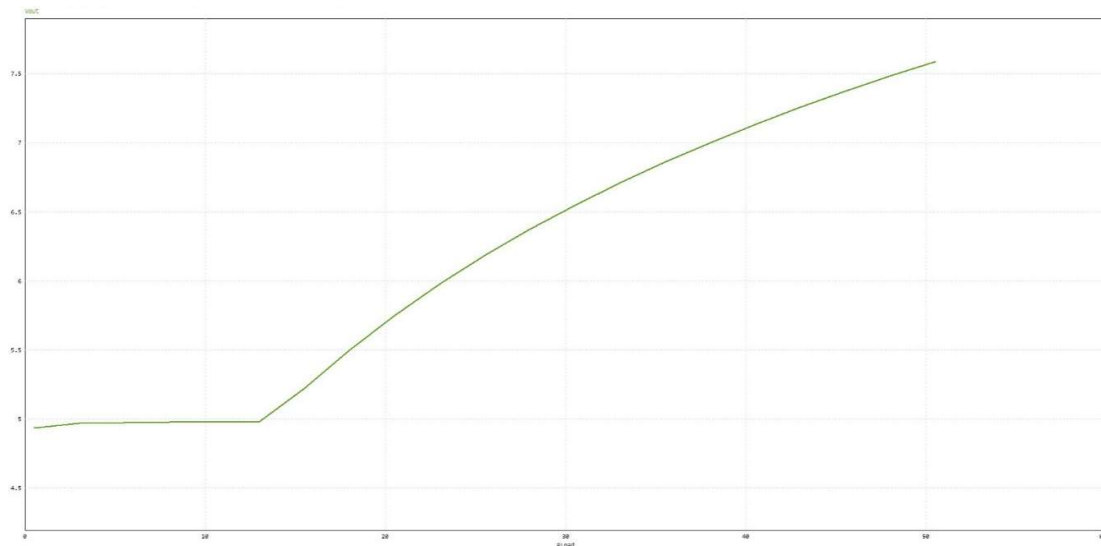
**Figura 13 Vx com Rload = 5**

Concluindo, após observar os gráficos das figuras 11,12 e 13 é possível concluir que o regime descontinuo acontece quando a resistência de saída é mudada, por isso é possível verificar que o conversor buck vai apresentar uma gama de valores de resistência onde vai operar.



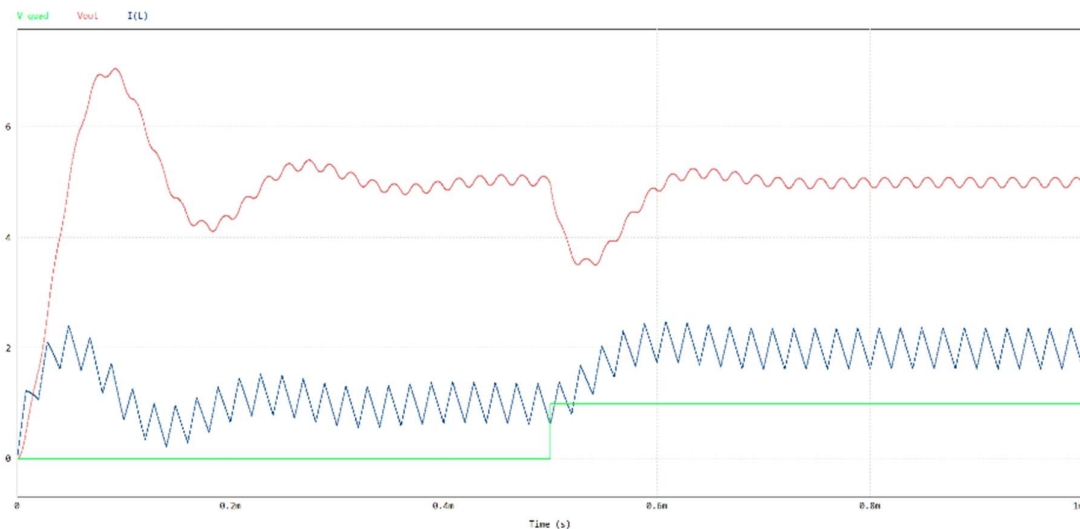
**Figura 14 Sweep de Vout e IL**

Após executar o comando parameter sweep com um incremento de resistências de  $2.5\Omega$  de  $0\Omega$  até  $50\Omega$  é possível verificar que a tensão média de saída se mantém constante até ser atingida uma determinada resistência máxima, neste caso  $R_{load\_max} \approx 13\Omega$ , como é possível observar na figura 15. Este fenómeno deve-se ao facto de a corrente mínima na bobine ter atingido o valor nulo (figura 14), por isso, o conversor entra num regime de funcionamento descontinuo, pelo que não se rege pelas equações descritas anteriormente.



**Figura 15 Relação Vout vs Rload**

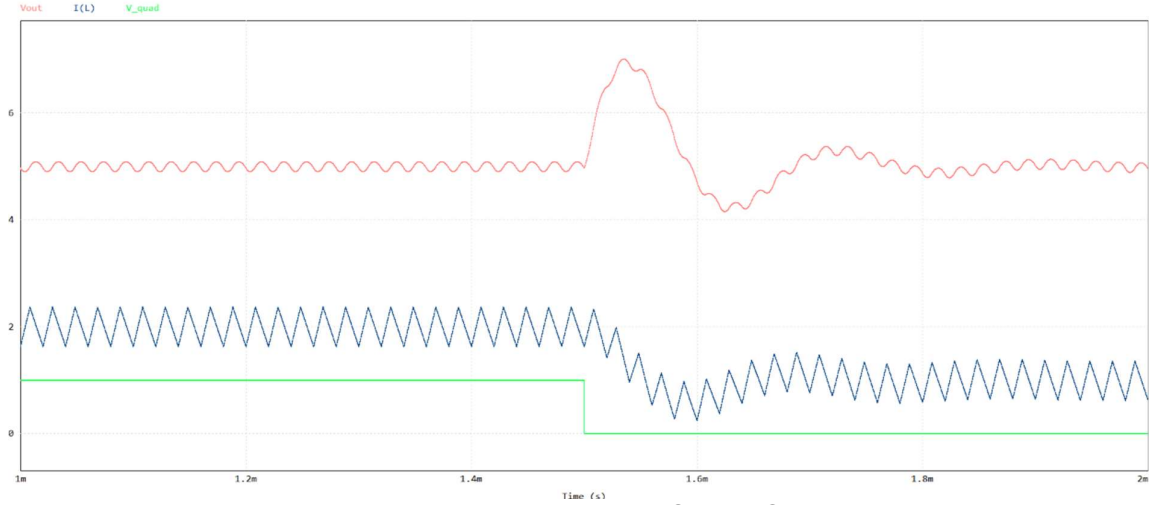
g) Colocou-se em paralelo uma segunda resistência,  $R_{load}$ , também de 5 ohm, e um switch comandado por um circuito que simula um degrau (informações mais detalhadas no anexo 6.3). Utilizou-se um degrau de 0 para 1 e de 1 para 0, que permitiu mudar os valores da carga. Quando o degrau é 0, o switch está aberto, pelo que  $R_{load} = 5 \Omega$ . Quando o degrau é 1, o switch está fechado, e  $R_{load}$  passa a ser o paralelo das duas cargas,  $R_{load} = 2.5 \Omega$ .



**Figura 16 Degrau de  $5\Omega$  para  $2.5\Omega$**

No regime transitório de  $5\Omega$  para  $2.5\Omega$ ,  $V_{out}$  tem um pico descendente e depois estabiliza a sua tensão média em 5V, valor para a qual foi projetado,  $I_{out}$  aumenta o seu valor médio até estabilizar.

Após a mudança de resistências, ao conjugar o gráfico da tensão de saída com o gráfico da corrente de saída, é possível verificar que o conversor adapta a sua corrente para que com a nova resistência continue a fornecer na saída a tensão média pretendida, neste caso os 5V.



**Figura 17 Degrau de  $2.5\Omega$  para  $5\Omega$**

No regime transitório de  $2.5\Omega$  para  $5\Omega$ ,  $V_{out}$  tem um pico ascendente e depois estabiliza a sua tensão média em  $5V$ , valor para a qual foi projetado,  $I_{out}$  diminui o seu valor médio até estabilizar.

Após a mudança de resistências, ao conjugar o gráfico da tensão de saída com o gráfico da corrente de saída, é possível verificar que o conversor adapta a sua corrente para que com a nova resistência continue a fornecer na saída a tensão média pretendida, neste caso os  $5V$ .

## 4.2 Projeto parcial do conversor

a)

Em regime contínuo foi provado anteriormente que  $V_{out} = \delta V_{in} = 5V$ .

Como é pretendido limitar a potência entre determinados valores e sabendo que  $I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{out}}$ , temos que:

- $I_{out\_max} = \frac{P_{out\_max}}{V_{out}} = \frac{100}{5} = 20 A$  (10)

- $I_{out\_min} = \frac{P_{out\_min}}{V_{out}} = \frac{0.5}{5} = 0.1 A$  (11)

- $\Delta V_{out} = 1\% V_{out} = 0.05V$  (12)

- $V_{out} = [4.95 ; 5.05] V$  (13)

Como foi deduzido nas aulas teóricas sabe-se que no pior caso  $\Delta I_L = \frac{2P_{out\_min}}{V_{out}} = 0.2 A$ :

- $T_s = \frac{1}{F_s} = \frac{1}{50KHz}$

Através das fórmulas que foram deduzidas nas aulas teóricas e que se encontram na página 170 do livro *Power Eletronics – Converters Applications and Design (3ª edição)*, conseguimos obter o valor da bobina e do condensador.

- $\Delta I_L = \frac{V_{out}(1-\delta)T_s}{L} \Leftrightarrow 0.2 = \frac{5 \times (1 - \frac{5}{12}) \times \frac{1}{50KHz}}{L} \Leftrightarrow L = 291\mu H$  (14)

- $\Delta V_{out} = \frac{\Delta I_L T_s}{8C} \Leftrightarrow 0.05 = \frac{0.2 \times \frac{1}{50KHz}}{8C} \Leftrightarrow C = 10\mu F$  (15)

Com esta informação por fim é possível calcular a gama de resistências:

- $P = \frac{V^2}{R}$  (16)

- $R_{min} = \frac{V^2}{P_{max}} = \frac{5^2}{100} = 0.25 \Omega$  (17)

- $R_{max} = \frac{V^2}{P_{min}} = \frac{5^2}{0.5} = 50 \Omega$  (18)

b)

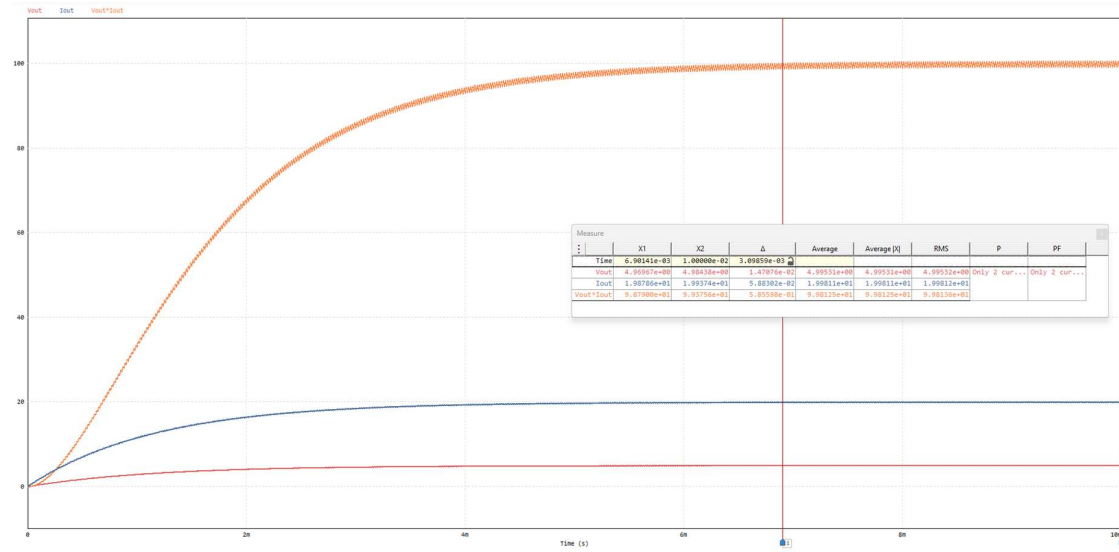


Figura 18 Vout, Iout e Pout com RLoad = 50Ω

Neste caso é possível verificar que a corrente máxima ( $I_{out,max} \approx 20A$ ) fica limitada pela gama máxima de potência atribuída ( $P_{max} \approx 100W$ ) e que os valores em regime permanente corroboram com os calculados  $V_{out} \approx 5V$  e  $I_{out} \approx 20A$ .

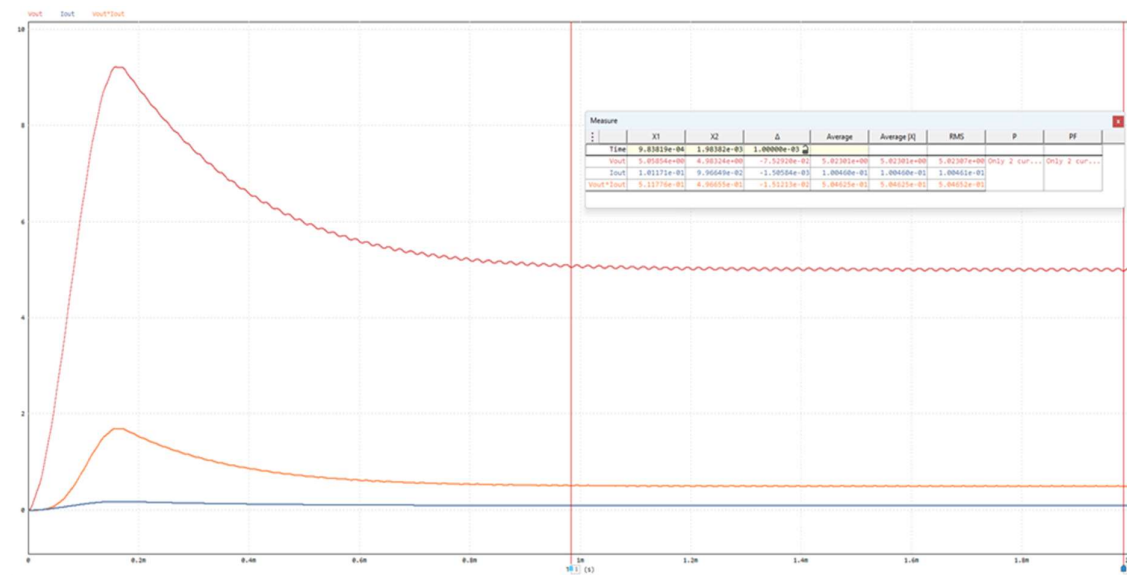


Figura 19 Vout, Iout e Pout com RLoad = 0.25Ω

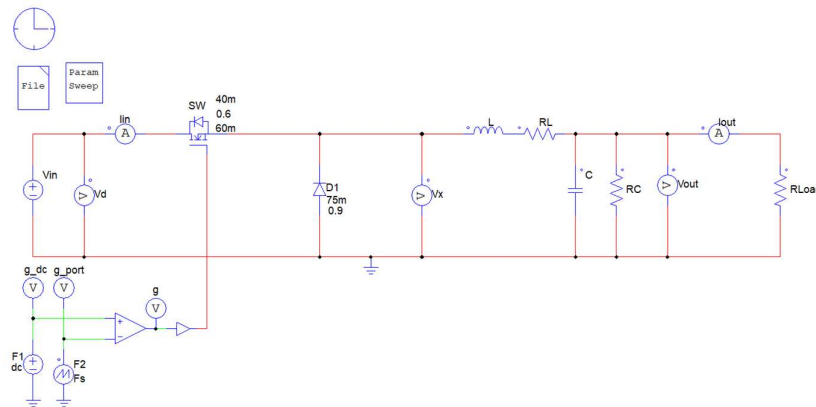
Neste caso é possível verificar que a corrente mínima ( $I_{out\_min} \approx 0.1A$ ) fica limitada pela gama mínima de potência atribuída ( $P_{min} \approx 0.5W$ ) e que os valores em regime permanente corroboram com os calculados  $V_{out} \approx 5V$  e  $I_{out} \approx 0.1A$ .

### 4.3 Introdução de não idealidades no díodo, no transístor e na Bobine

Nesta secção com a tentativa de simular a realidade, foi adicionado ao esquema anterior determinados parâmetros não ideais:

- Bobine – L: indutância = 80 uH; resistência serie = 100 mΩ
- Condensador – C: capacidade 10 uF; resistência paralelo fugas = 1 kΩ:
- Díodo – D1: Forward Voltage = 0.9 V; Resistência = 75 mΩ
- Interruptor – SW: On Resistance = 60 mΩ; Diode Forward Voltage = 0.6 V; Diode Resistance = 40 mΩ
- Carga: 5 Ω

Esquema resultante:



a)

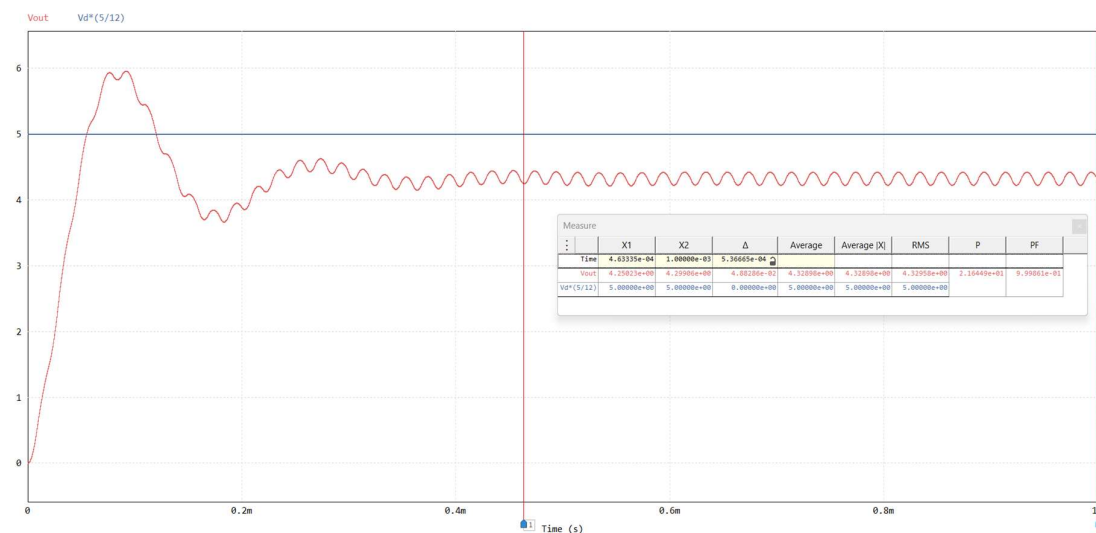


Figura 20 Relação de <Vout> com δVin

Como é possível verificar pela figura a relação  $\langle V_{out} \rangle = V_{in}\delta$  já não se verifica uma vez que existem perdas de energia associadas, por isso  $\langle V_{out} \rangle \approx 4.33V$ , um pouco mais baixo que o projetado.

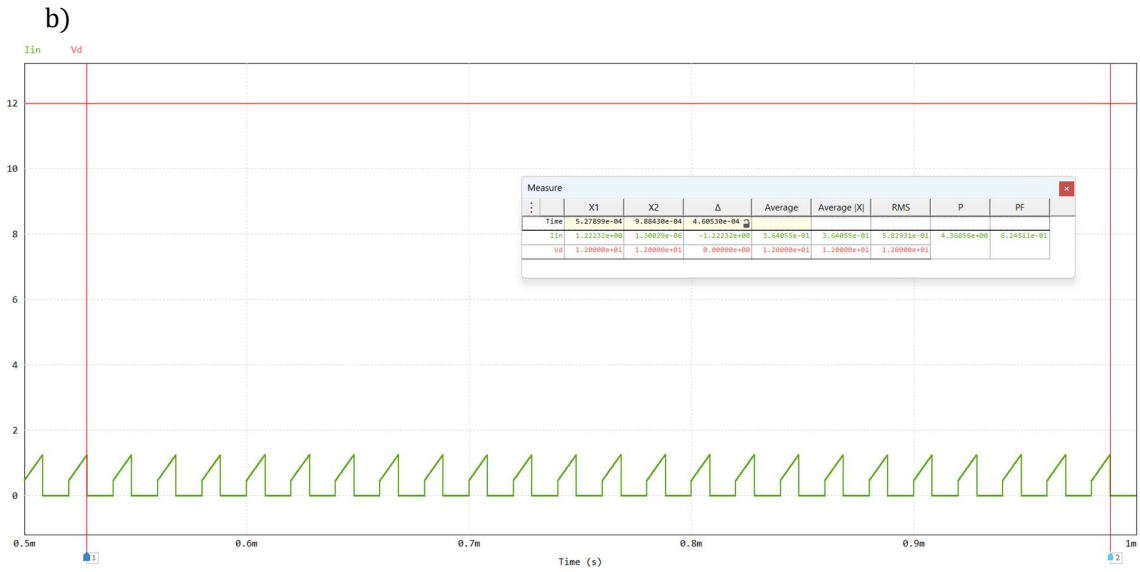


Figura 21 Iin e Vin

$$P_{in} = V_{in}(\text{constante}) \langle I_{in} \rangle = 12 \times 0.364 \approx 4.368 \text{ W} \quad (19)$$

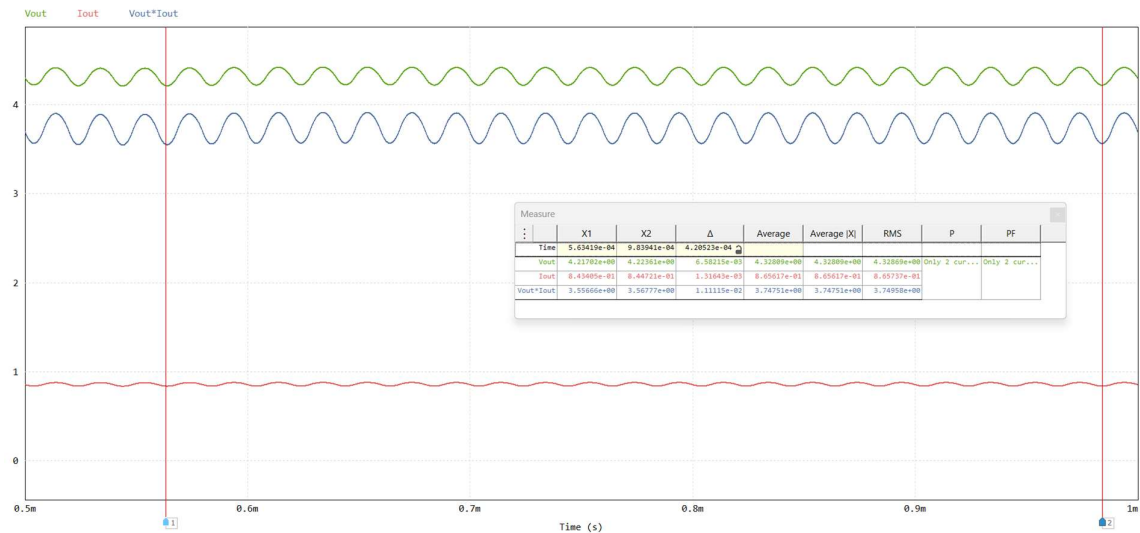


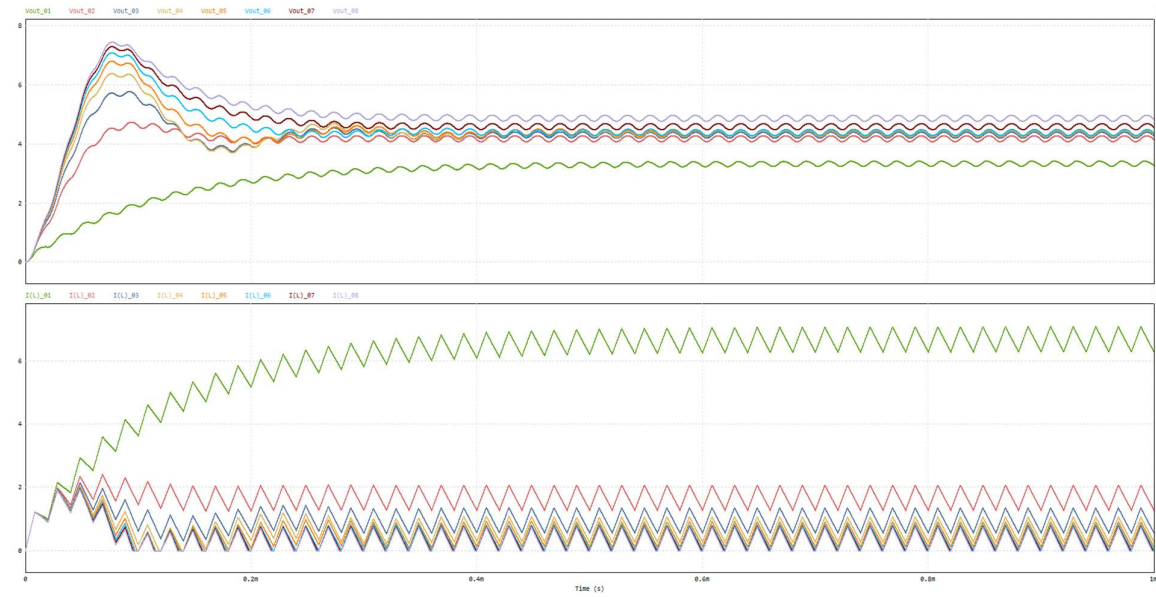
Figura 22 Rendimento ( $\eta$ )

$$P_{out} = 3.7475 \text{ W} \quad (20)$$

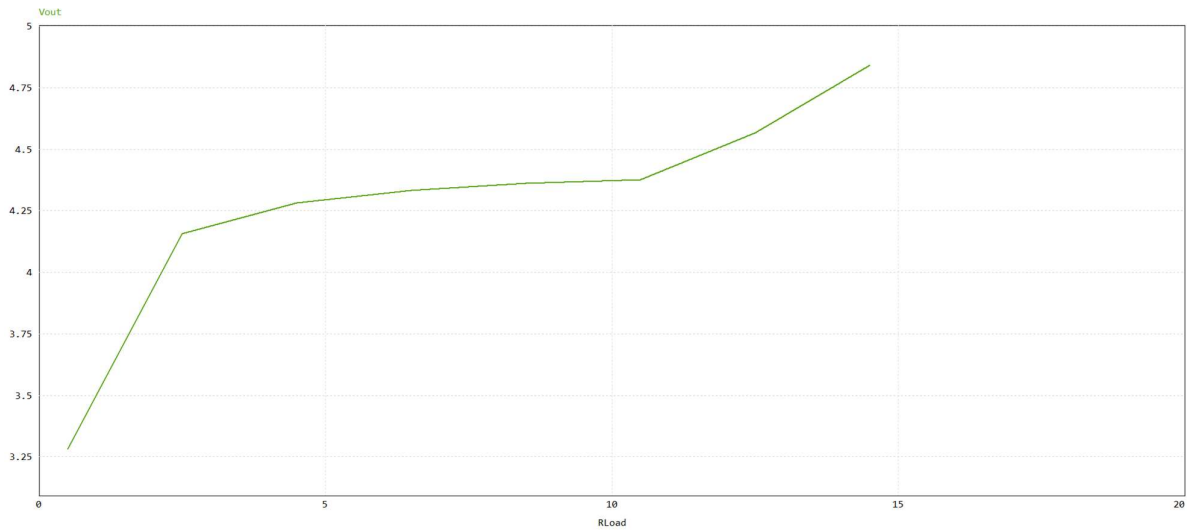
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{3.7475}{4.368} \approx 84,79\% \quad (21)$$

Como já foi referido anteriormente, o rendimento desce consideravelmente devido as perdas de energia envolvidas.

c)



**Figura 23 Sweep de Vout e IL**



**Figura 24 Relação Vout vs Rload**

Ao contrário do que foi verificado anteriormente na figura 15, com a introdução dos parâmetros não ideais nos componentes a gama de resistências também é afetada para valores de  $R_{load}$  baixos, ou seja, o conversor na realidade também tem uma resistência mínima de funcionamento,  $R_{load\_min} \approx 4 \Omega$  neste caso.

Caso em que o conversor é ideal:

- $R_{load} \approx [0; 13] \Omega$



Caso em que o conversor simula realidade:

- $R_{load} \approx [4; 11] \Omega$

## 5 Conclusões

Neste trabalho após explorar o método de funcionamento de um conversor Buck, ficamos familiarizados com o seu modo de funcionamento e possíveis limitações e atenções a ter quando o pretendemos projetar para uma determinada aplicação.

## 6 Anexos

### 6.1 Esquema do conversor

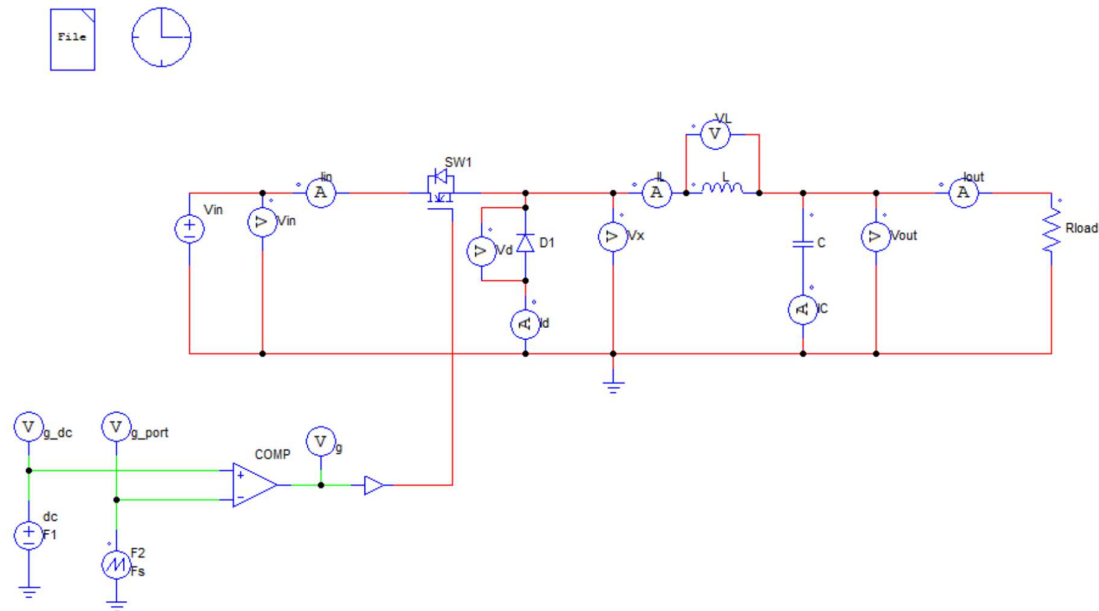


Figura 25 Circuito Eletrónico do Conversor Buck

### 6.2 Obtenção de uma onda quadrada

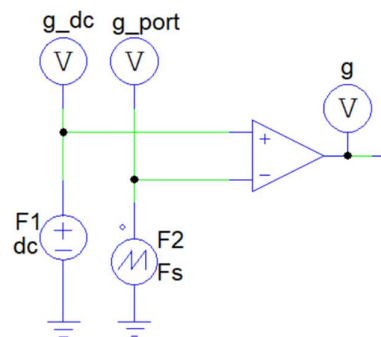


Figura 26 Gerador de onda quadrada

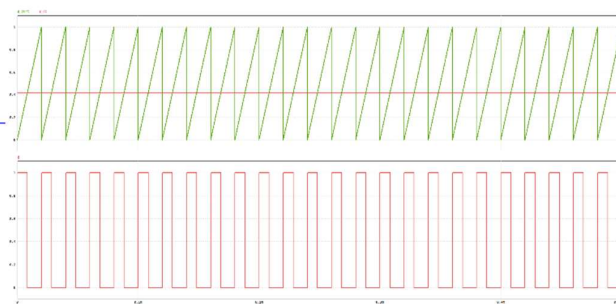


Figura 27 Onda moduladora(F1), portadora(F2) e comando (g)

Uma onda quadrada para funcionar como comando pode ser obtida utilizando uma onda DC moduladora (F1) e uma onda portadora do tipo dente de serra (F2).

Ao realizar a comparação entre as duas ondas através de um comparador é possível obter uma onda quadrada. O tempo que F1 é maior que F2 vai definir o tempo em que a onda de comando (g) se encontra ligada e vice-versa.

$$\delta = \frac{T_{ON}}{T} \quad (10)$$

- $\delta$  – duty cycle onda de comando
- $T_{ON}$  – Tempo em que F1 é maior que F2
- $T$  – Período de F2

### 6.3 Esquema utilizado para variar as resistências entre 2.5 $\Omega$ e 5 $\Omega$

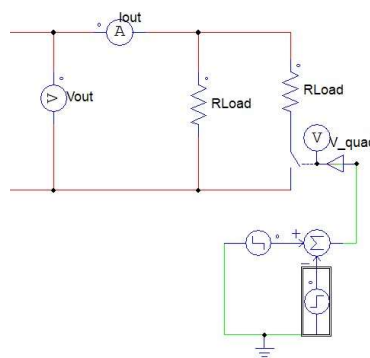


Figura 28 Circuito gerador da onda de degrau no Psim

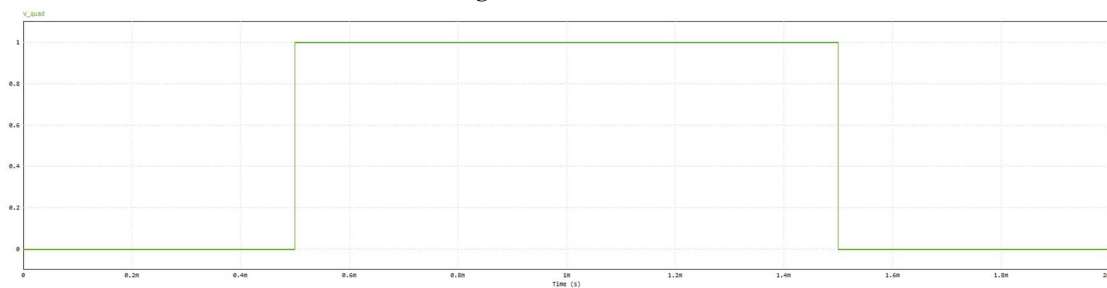


Figura 29 Onda de degrau V\_quad