

## Teoria de Circuitos e Fundamentos de Eletrónica

Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Técnico,  
Universidade de Lisboa

T3 - Relatório da Atividade Laboratorial

5 de Maio, 2021

195755 - Miguel Mendes — 196528 - Francisco Assunção — 196532 - Gonçalo Cardoso

### Contents

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Análise Teórica</b>	<b>2</b>
2.1	Estudo do <i>Envelope Detector</i> . . . . .	2
2.2	Estudo do <i>Voltage Regulator</i> . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Simulação do Circuito</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Cálculo da Figura de Mérito</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>10</b>

# 1 Introdução

O objetivo desta atividade laboratorial consiste na concepção de um circuito que transforme corrente alterna (AC - *alternating current*) com amplitude de tensão 230 V, em corrente contínua (DC - *direct current*) de tensão 12 V - *AC-DC Converter*.

O circuito desenvolvido é composto por um *Envelope Detector* e um *Voltage Regulator* e encontra-se representado na figura (1). O funcionamento do mesmo é analisado através de modelos teóricos na secção (2), procurando-se estudar tanto o comportamento do *envelope detector* como o do *voltage regulator*, onde para este efeito realizaram-se: gráficos relativos à voltagem de *output* de cada um dos subcircuitos, um gráfico relativo ao desvio da voltagem do circuito face aos 12 V esperados e tendo-se ainda calculado o *voltage ripple* e a voltagem média aos terminais de saída do circuito.

Na secção 3 procurou-se simular o *AC-DC converter* efetuando-se os mesmos gráficos e cálculos feitos na análise teórica. Nesta secção compararam-se ainda os resultados obtidos através da simulação com os obtidos via métodos teóricos lado a lado. Por outro lado realizou-se ainda o cálculo do mérito do circuito de acordo com os critérios definidos para este trabalho - secção (4).

Por fim, na conclusão, secção (5), resumem-se os resultados principais deste trabalho laboratorial e recapitulam-se as diferenças entre os modelos teóricos e a simulação encontradas.

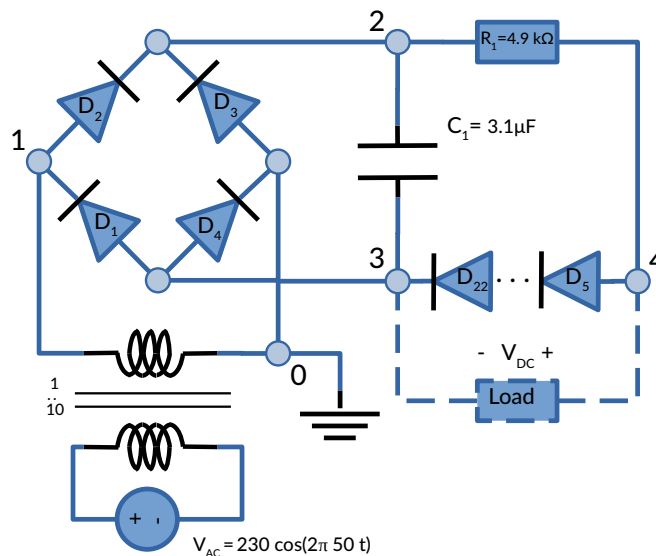


Figure 1: Esquema do circuito utilizado.

## 2 Análise Teórica

### 2.1 Estudo do *Envelope Detector*

Começámos por estudar o *Envelope Detector* utilizado. Este é constituído por um *Full-Wave Bridge Rectifier* em paralelo com um condensador, com capacidade  $C_1 = 3.1 \mu F$  e por uma resistência  $R_1 = 4.9 k\Omega$  e tem como função aproximar a corrente alterna a corrente contínua.

Como visto nas aulas teóricas, sabemos que a tensão de output de um *Full-Wave Bridge Rectifier* corresponde ao módulo da tensão da fonte alternada, que neste caso corresponde à tensão imposta no transformador, ou seja,  $v_R = |1/10 v_{AC}| = |A \cos(\omega t)| : V$ , em que  $A = 23 V$ ,  $\omega = 2\pi f$  e  $f = 50 Hz$ , onde supomos que a tensão imposta pelo transformador é superior a

$V_{ON}$ , ou seja, à tensão a partir da qual circula corrente através dos díodos - consideramos um modelo teórico dos díodos onde supomos que só circula corrente para  $V > V_{ON}$ .

Assim, a tensão no output para  $0 < t < \pi/2\omega$  é dada por  $v_E = A\cos(\omega t) V$ , onde supomos novamente que os díodos estão ligados. De seguida, apresentam-se um conjunto de expressões úteis para o estudo do *Envelope Detector*, onde  $i_d$  é a corrente que passa pelos díodos,  $i_R$  a corrente na resistência e  $i_C$  a corrente no condensador e onde se considerou o intervalo  $0 < t < \pi/2\omega$  (cosseno positivo):

$$i_d = i_R + i_C \quad (1)$$

$$i_C = C_1 \frac{dv_E}{dt} = -C_1 A \omega \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$i_R = \frac{v_E}{R_1} \quad (3)$$

De forma semelhante ao estudo realizado em aula, procuramos descobrir o instante  $t_{OFF}$  em que a corrente que passa pelo díodo é nula (díodo desligado). Utilizando as expressões anteriores e impondo a condição  $i_d = 0$  obtém-se:

$$t_{OFF} = \frac{1}{\omega} \text{atan}\left(\frac{1}{\omega R_1 C_1}\right) \quad (4)$$

Para  $t > t_{OFF}$  o condensador descarrega sobre  $R_1$  já que não passa corrente pelos díodos, pelo que a voltagem de output do *Envelope Detector* é dada pela expressão:

$$v_E(t) = A\cos(\omega t_{OFF}) e^{-\frac{t-t_{OFF}}{R_1 C_1}} \quad (5)$$

O díodo volta a ligar-se quando a função dada pela expressão anterior intersesta a voltagem normal do *Full-Wave*. Por fim, através das expressões anteriores e replicando o comportamento do circuito para 10 períodos, efetuou-se um *plot* da voltagem de output do *Envelope Detector* que se encontra na figura (2).

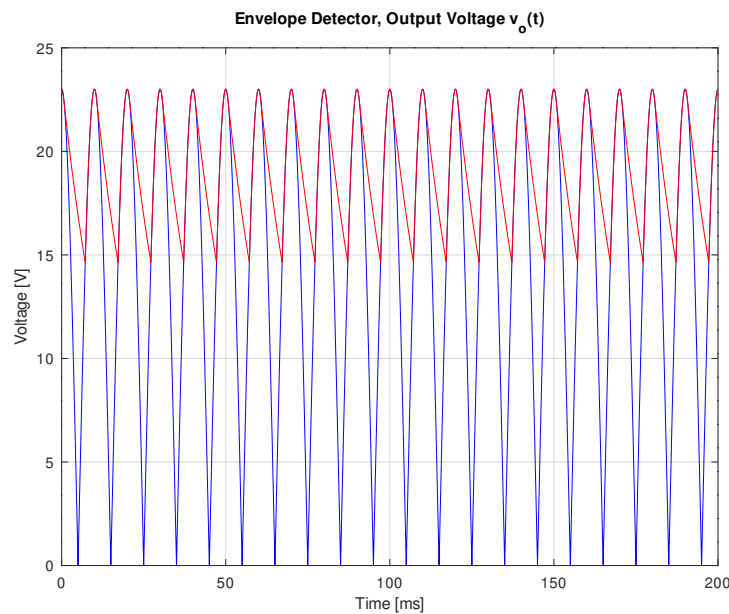


Figure 2: Voltagem no *Envelope Detector* e no *Full-Wave Bridge Rectifier* - Análise Teórica

Como é visível no gráfico da figura (2), o *Envelope Detector* transforma a corrente alternada em corrente aproximadamente contínua, verificando-se no entanto que existe ainda uma

oscilação significativa da tensão - *rippling*. Este efeito será minimizado pelo *Voltage Regulator* que estudamos de seguida.

## 2.2 Estudo do *Voltage Regulator*

O *Voltage Regulator* utilizado neste trabalho é constituído por 18 díodos ligados em série - cujos modelos correspondem ao *default* do *Ngspice*, ver secção (3) - e por uma resistência  $R_1 = 4.9 \text{ k}\Omega$ , tendo como objetivo atenuar o *rippling* referido anteriormente.

Analizou-se o *Voltage Regulator* por análise incremental (*Incremental Analysis*), dividindo o estudo da voltagem de output,  $v_O$ , nas suas componentes DC,  $V_O$ , e AC,  $v_o(t)$ , de acordo com a expressão (6). É de notar que idealmente teríamos  $V_O = 12 \text{ V}$  e  $v_o(t) = 0 \text{ V}$ .

$$v_O = V_O + v_o(t) \quad (6)$$

De forma a realizar este tipo de análise, foi necessário determinar a resistência incremental dos díodos utilizados,  $r_d$ , bem como a voltagem  $V_{ON}$ , cujos valores se encontram na tabela (2). Estes valores foram obtidos através de um *script* de *Ngspice* e serão, portanto, discutidos na secção 3.

A componente DC foi obtida através de *Operating Point Analysis*. Neste caso, os díodos correspondem a fontes de tensão independentes em série com voltagem  $V_{ON}$ , pelo que consideramos que a componente DC de output do circuito corresponderá a  $V_O = nV_{ON}$ .

Na análise da componente AC, o problema reduz-se a um divisor de tensões:

$$v_o(t) = \frac{nr_d}{nr_d + R} v_e(t) \quad (7)$$

Onde  $v_e(t)$  corresponde à componente AC do *Envelope Detector*, ou seja, à voltagem de output do *Envelope Detector* subtraída pela sua média (componente DC).

Assim, é de esperar que o output do conversor AC-DC desenvolvido seja dado por:

$$v_O = nV_{ON} + \frac{nr_d}{nr_d + R} (v_E - V_E) \quad (8)$$

Os valores obtidos para a componente DC,  $V_O$ , e do ripple,  $Ripple(v_O)$ , da voltagem de output do *Voltage Regulator* estão apresentados na seguinte tabela (1):

$V_O \text{ (V)}$	12.000712
$Ripple(v_O) \text{ (V)}$	0.483543

Table 1: Valores obtidos através da análise teórica;

O *plot* da voltagem de output do circuito,  $v_O$ , durante 10 períodos, corresponde à figura (3).

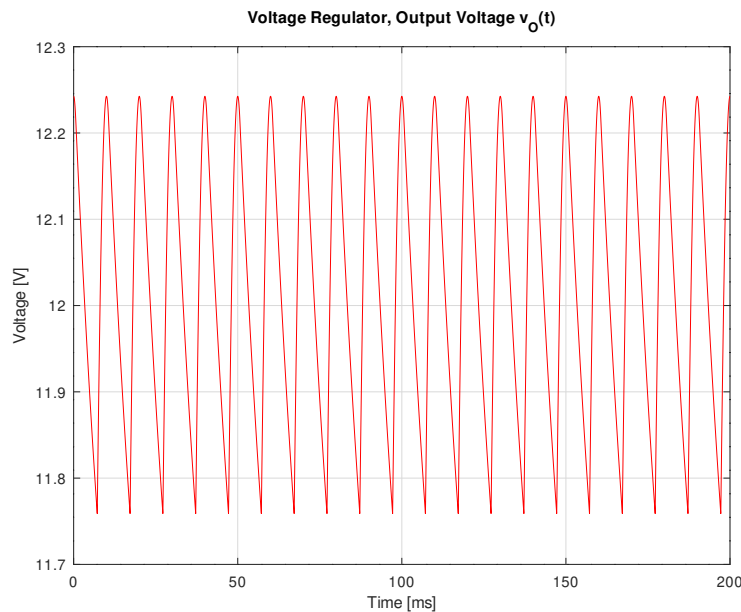


Figure 3: Voltagem no *Voltage Regulator* - Voltagem Output do Circuito - Análise Teórica

Podemos verificar uma diminuição de fenómenos de *voltage rippling*, o que resulta do facto de  $R \gg r_d$  (ver equação (8)), pelo que a função do *voltage regulator* é assim cumprida. Por último, fez-se ainda um *plot* do desvio da voltagem de output face aos 12 V esperados que se apresenta na figura (4). Podemos verificar que a voltagem de output é bastante próxima de corrente DC com flutuações pequenas face aos 12 V.

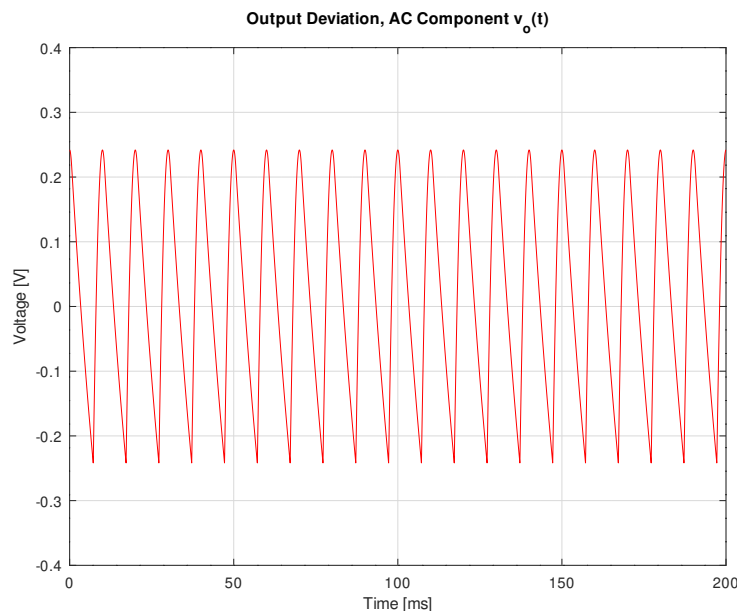


Figure 4: Desvio da voltagem de Output face aos 12 V - Simulação

### 3 Simulação do Circuito

Nesta secção, simulámos o circuito que criámos, ilustrado na figura (1), usando o *Ngspice*. É de notar que a resistência intitulada de *Load* não está efetivamente incluída no circuito simulado e corresponde apenas à resistência de um aparelho genérico ligado à corrente DC. Para

além disso, não se simulou o transformador, colocando apenas uma fonte de tensão alternada,  $v_{in}$ , com a amplitude pretendida,  $A = 23\text{ V}$ , considerando-se o número de espiras  $n = 10$ . A simulação realizada correspondeu a uma análise transiente do circuito durante 10 períodos, ou  $200\text{ ms}$ , com um passo temporal de  $\Delta t = 0.2\text{ ms}$ , de modo a recolher 1000 pontos. Esta permitiu obter a voltagem média de *output* e a *voltage ripple*, onde este último valor corresponde à diferença entre os valores máximos e mínimos da voltagem no *output*. As grandezas em causa encontram-se apresentadas na tabela (2).

Quantidade	Valor (V, $\Omega$ )
mean(v(4,3))	1.200071e+01
maximum(v(4,3)) - minimum(v(4,3))	2.245060e-01
mean(v(4,5))	6.667062e-01
(maximum(v(4,5)) - minimum(v(4,5))) / (maximum(i(vaux)) - minimum(i(vaux)))	1.672289e+01

Table 2: Valores obtidos através da simulação de Ngspice; Por ordem:  $V_O$ ,  $ripple(v_O)$ ,  $V_{ON}$  e  $r_d$

Também se obtiveram os valores para  $V_{ON}$  e  $r_d$  que foram utilizados na secção (2). O primeiro foi considerado a média da voltagem medida nos terminais de um diodo, neste caso  $D_5$ . O segundo foi calculado como sendo a razão das amplitudes de oscilação da voltagem medida nos terminais de um diodo e da corrente que passa num diodo, neste caso  $D_5$ . Por comparação dos valores das tabelas (1) e (2), nota-se que os valores da voltagem de output ( $V_O$  ou mean(v(4,3))) são idênticos, o que confirma que a voltagem de output oscila em torno desse valor, tal como previsto no método de *incremental analysis*, utilizado na na secção 2. No entanto, apesar dos valores do ripple ( $Ripple(v_O)$  ou (maximum(v(4,5)) - minimum(v(4,5))) / (maximum(i(Vaux)) - minimum(i(Vaux)))) serem consistentes já que apresentam a mesma ordem de grandeza, têm um desvio percentual de  $\epsilon_{Ripple(v_O)} = 53\%$ , o que poderá em parte decorrer de uma medição pouco rigorosa da resistência incremental,  $r_d$ , mas dever-se-à também à utilização de um modelo linear na análise teórica que não reflete na totalidade o comportamento do díodo.

Da simulação também se obtiveram os gráficos (5) e (6) correspondentes às voltagens de *output* no *Envelope Detector* e no *Voltage Regulator*.

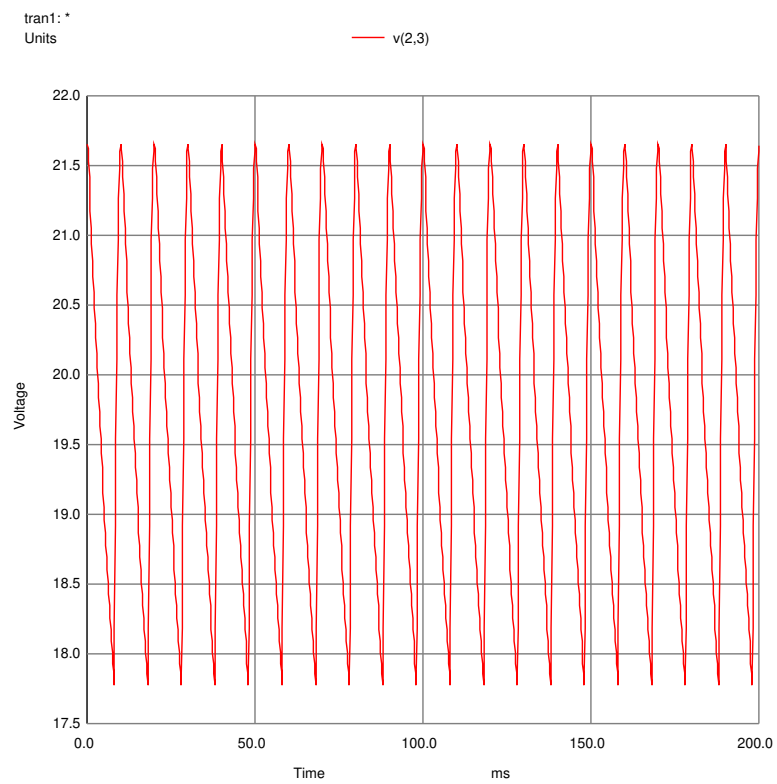


Figure 5: Voltagem no *Envelope Detector* - Simulação

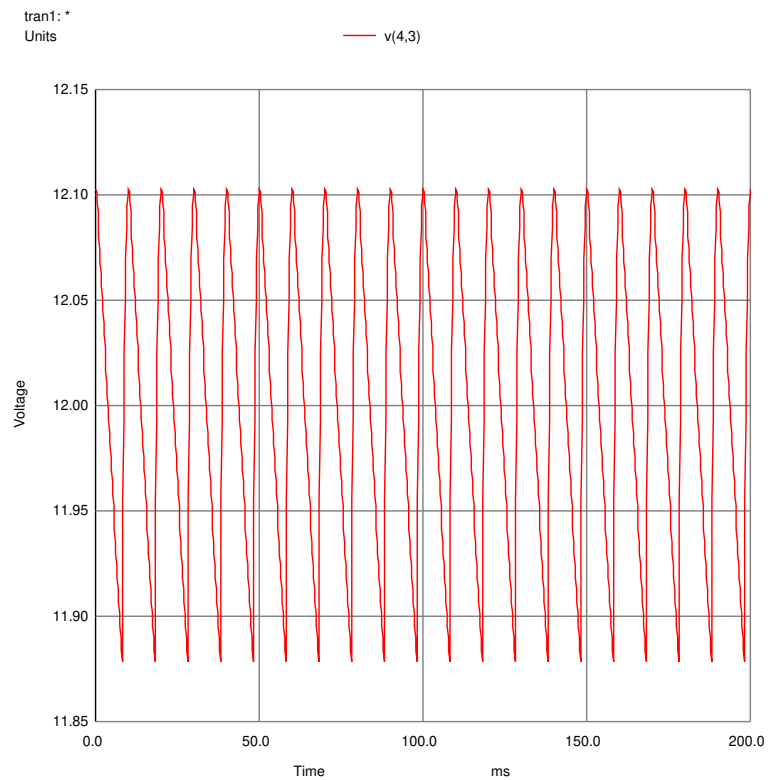


Figure 6: Voltagem no *Voltage Regulator* - Voltagem Output do Circuito - Simulação

Por fim, realizou-se ainda um *plot* do desvio da voltagem de *output* do circuito aos 12 V, ou seja, de  $v_O - 12$  de forma a verificar o quão próximo é a tensão à saída de uma tensão DC ideal. O gráfico em causa corresponde à figura (7).



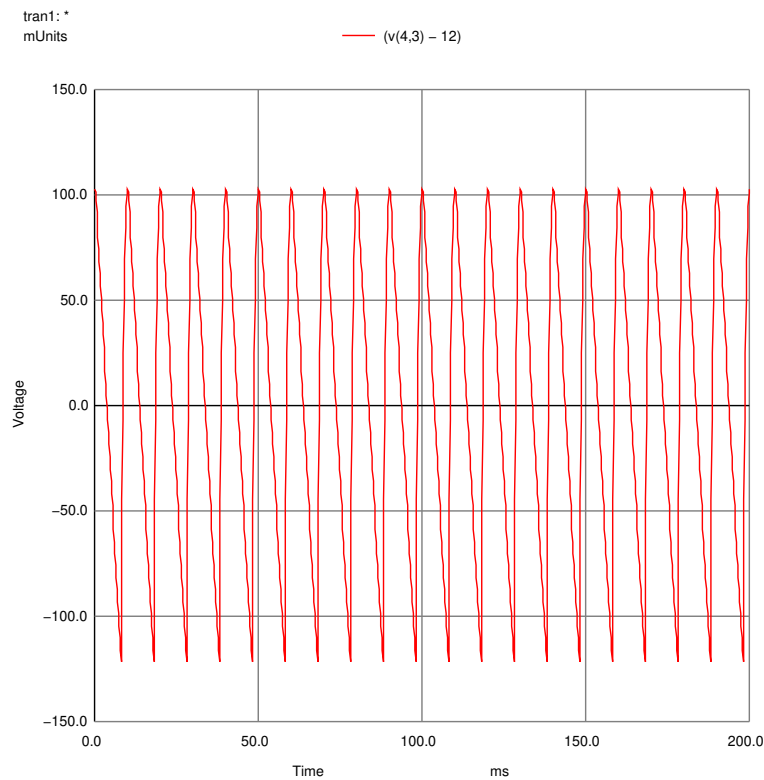


Figure 7: Desvio da voltagem de Output face aos 12 V - Simulação

Por observação dos gráficos obtidos e por comparação com os gráficos da secção da análise teórica, secção (2), nota-se que estes são semelhantes, nomeadamente que oscilam em torno de valores próximos,  $V_E \approx 20\text{ V}$ , no caso dos gráficos da voltagem no *Envelope Detector*, e que são idênticos,  $V_O \approx 12\text{ V}$ , no caso dos gráficos da voltagem no *Voltage Regulator*. Refere-se novamente que as diferenças entre o modelo teórico e a simulação, neste caso o facto das amplitudes de oscilação serem diferentes, que deverá ser consequência em grande parte de na análise teórica ter-se considerado o modelo do díodo ideal, sem resistência interna com corrente nula para  $V_D < V_{ON}$  e tensão constante  $V_D = V_{ON}$  quando ligado, pelo que assim não é tido em conta grande parte do comportamento não linear do díodo que é relevante no modelo mais complexo e mais realista utilizado na simulação pelo *Ngspice*.

Pode-se constatar, portanto, que os resultados obtidos na análise teórica e na simulação são compatíveis, apresentando apenas algumas pequenas diferenças no efeito de *rippling* devidas provavelmente à simplicidade do modelo do díodo utilizado na análise teórica e ainda devido à aproximação linear resultante do método da análise incremental.

## 4 Cálculo da Figura de Mérito

A fórmula utilizada para o cálculo do mérito neste trabalho é dada pela expressão (9).

$$M = \frac{1}{\text{cost} * (\text{ripple}(v_O) + \text{average}(v_O - 12) + 10^{-6})} \quad (9)$$

No circuito desenvolvido neste trabalho utilizaram-se: 22 díodos, 1 condensador ( $C = 3.1 \mu F$ ) e 1 resistência ( $R = 4.9 k\Omega$ ). Assim o custo associado a este circuito (nas unidades monetárias adotadas) é de:

$$\text{cost} = 22 \times 0.1 + 3.1 \times 1 + 4.9 \times 1 = 10.2 MU \quad (10)$$

Considerando o valor do custo, e o valor médio de  $v_O$ ,  $\text{average}(v_O) = 12.00071V$ , e da *ripple*,  $\text{ripple} = 2.245060 \times 10^{-1} V$ , retirados da tabela (2) podemos calcular o mérito deste trabalho obtendo-se:

$$M = 0.4353100 \quad (11)$$

## 5 Conclusion

Neste trabalho desenvolvemos um conversor AC-DC utilizando um *Envelope Detector* e um *Voltage Regulator* que, como verificámos nas secções de análise teórica (2) e através da simulação (3), produz resultados satisfatórios.

O estudo do circuito resultou no cálculo de várias grandezas (voltagem média de *output* ou *voltage ripple*) e *plot's* de gráficos que foram obtidos através da simulação e da análise teórica. Estes resultados foram apresentados e discutidos nas respetivas secções e comparados na secção da simulação (3) tendo-se verificado pequenas diferenças entre o modelo teórico e a simulação do *Ngspice*, principalmente no fenómeno de *voltage rippling*. Estas diferenças deverão ser consequência da lineariedade dos modelos utilizados na secção teórica (modelo ideal do diodo e análise incremental) que, apesar de apresentarem resultados muito satisfatórios (próximos dos da simulação), não são capazes de descrever a vertente não linear do circuito com a mesma precisão que o modelo mais complexo utilizado pelo *Ngspice*.

O mérito do trabalho foi calculado na secção (4), através da determinação do custo dos componentes utilizados no circuito e com os valores médios da voltagem de *output* e do *voltage rippling* determinados através da simulação.

Concluindo, consideramos que os objetivos do trabalho foram atingidos tendo sido possível desenvolver e estudar um conversor AC-DC tanto através de métodos teóricos como através de simulações numéricas.