INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Secção de Sistemas e Controlo

# Análise de Circuitos

## 3º Trabalho de Laboratório

Novembro de 2001

Elaborado por:
António Serralheiro
João Freire

Aluno nº _____, _____, Turma_____, Turno ___
Aluno nº _____, _____, Turma_____, Turno ___
Aluno nº _____, _____, Turma_____, Turno ___

Data:_____

# INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE CIRCUITOS DINÂMICOS

*À semelhança dos guias de laboratório anteriores, assinalam-se por* **T** , **E** , **C** e **S** *os tópicos de «respostas» teórica, experimental, comentário e simulação, respectivamente.*

## 1. CIRCUITO R-C DE 1ª ORDEM

### 1.1 INTRODUÇÃO

São variadìssimas as aplicações em que intervêm os componentes dinâmicos (condensadores e bobinas). Estão nestes casos os circuitos de filtragem, de compensação, de atraso, etc. Começaremos o nosso estudo pela análise da resposta temporal de um circuito simples (fonte de tensão, resistência e condensador).

Como sabe, admitimos para o condensador a seguinte VIC[1], $i_C(t) = C\frac{d\,v_C(t)}{d\,t}$, o que significa que a corrente que percorre o condensador é proporcional às variações da tensão aos seus terminais. Se explicitarmos a tensão $v_C$ em função da corrente $i_C$, teremos agora, $v_C(t) = \int_{t_0}^{t} i_C(\tau)\,d\tau + v_C(t_0)$, em que $v_C(t_0)$ representa a tensão que o condensador apresentava (inicialmente) no instante $t = t_0$.

***NOTA***: *Não coloque, durante os ensaios a realizar, as entradas do osciloscópio em **AC**.*

### 1.2 CIRCUITO RC DE 1ª ORDEM PASSA-BAIXO (INTEGRADOR)

**T**

- Comece por analisar o circuito da figura 1, obtendo a equação que relaciona a tensão de saída $v_C(t)$ com a fonte de tensão independente (tensão de entrada), $v_S(t)$. Apresente os seus cálculos em termos de R e de C.

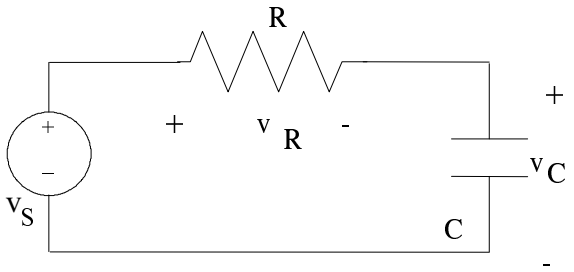


Figura 1. Circuito RC passa-baixo.

[1] VIC, característica corrente-tensão de um elemento eléctrico.

**T**

- Considerando que $v_S(t)$ é um escalão unitário (função de Heaviside), determine analìticamente $v_C(t)$, sabendo que o condensador se encontrava inicialmente descarregado.

**T**

- A partir do resulado anterior, preencha a tabela seguinte, em que $\tau$ representa a constante de tempo (produto RC) do circuito:

| t | $v_C(t)$ [V] | $[v_C(t) / v_C(\infty)]$ x 100 % |
|---|---|---|
| $\tau$ | | |
| $2\tau$ | | |
| $3\tau$ | | |
| $4\tau$ | | |
| $5\tau$ | | |
| $6\tau$ | | |
| $7\tau$ | | |
| $8\tau$ | | |
| $9\tau$ | | |
| $10\tau$ | | |

Tabela 1. Tensão do condensador em função de múltiplos da constante de tempo

**T**

- Represente gràficamente $v_C(t)$ obtido (use papel milimétrico). Indique as escalas utilizadas.

**E**

- Realize o circuito representado na figura 1, utilizando para R uma resistência de 10kΩ e para C um condensador de 100nF. Coloque em $v_S(t)$ um gerador de onda quadrada, escolhendo um período de 10ms. Represente a tensão $v_C(t)$ obtida:

**S**

- Utilizando o programa de simulação PSPICE disponibilizado, confirme a resposta anterior.

**E**

- Sabendo que para t = RC (s) = $10^{-3}$ s, a tensão aos terminais do condensador $v_C(t)$, atinge 63,2% do valor máximo da tensão de entrada, determine **experimentalmente** a constante de tempo do circuito da figura 1.

**C**

- Compare este resultado experimental com o seu valor teórico.

**E**

- Diminua o período do sinal de entrada $v_S(t)$ para 1ms. Esboce agora a tensão $v_C(t)$:

**S**

- Utilizando o programa de simulação PSPICE disponibilizado, confirme a resposta anterior.

**C**

- Explique as alterações que obteve ao usar um período (para a tensão de entrada) de 1ms em vez de 10 ms.

**E**

- Diminua o período do sinal de entrada para 0,1ms. Esboce novamente a tensão $v_C(t)$.

**S**

- Utilizando o programa de simulação PSPICE disponibilizado, confirme a resposta anterior.

**C**

- Explique as alterações que obteve ao usar um período (para a tensão de entrada) de 0,1ms em vez de 1ms.

**T**

- Repare que a tensão aos terminais do condensador se aproxima do integral da tensão de entrada. Por este facto, o circuito em causa também se denomina por circuito integrador (*imperfeito*). Tente arranjar um critério que nos permita determinar em que condições $v_C(t) = K \int v_S(\tau)\, d\tau$. Como explica este comportamento para $v_C(t)$?

E

- Verifique experimentalmente a sua resposta, usando uma tensão sinusoidal na entrada.

### 1.3 ESTUDO DA VARIAÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA (TERMINAIS DO CONDENSADOR) COM A FREQUÊNCIA

Deve ter reparado que, excitando por uma onda sinusoidal o circuito da figura 1, a tensão de saída apresentava uma desfasagem em relação à tensão de entrada; desfasagem essa que variava com a frequência. No entanto, e ao se comportar como um integrador, a desfasagem era constante e de $-\frac{\pi}{2}$ radianos.

E S

- **Mudando a resistência R de 10 kΩ para 1,5 kΩ** e usando uma tensão sinusoidal de 1 V de pico-a-pico ($V_{Spp}$ = 1V) para $v_S(t)$, preencha a seguinte tabela:

| Frequência | Tensão de saída ($V_{Cpp}$) (experimental) | $20 \log_{10} V_{Cpp}$ (experimental) | $20 \log_{10} V_{Cpp}$ (simulação) | desfasagem entre $v_C$ e $v_S$ (em radianos) (experimental) | desfasagem entre $v_C$ e $v_S$ (em radianos) (simulação) |
|---|---|---|---|---|---|
| 100 Hz | | | | | |
| 200 Hz | | | | | |
| 400 Hz | | | | | |
| 800 Hz | | | | | |
| 1 kHz | | | | | |
| 2 kHz | | | | | |
| 4 kHz | | | | | |
| 8 kHz | | | | | |
| 10 kHz | | | | | |
| 20 kHz | | | | | |
| 40 kHz | | | | | |
| 80 kHz | | | | | |

Tabela 2. Variação dos módulo e fase da tensão de saída com a frequência.

- A partir dos valores da tabela anterior, obtenha dois gráficos experimentais (usando papel semi-logarítmico) que representem a evolução de $20 \log_{10} V_{Cpp}$ e da desfasagem $\Delta\phi = \phi_{vc} - \phi_{vs}$ em função do

logaritmo da frequência log(f). Estes gráficos são denominados **diagramas de BODE de amplitude e de fase**. No primeiro, uma escala logarítmica é usada no eixo horizontal — log(f), logaritmo dos valores da 1ª coluna da tabela 2; para eixo das ordenadas, utilizam-se os valores da 3ª coluna da tabela 2, e que representam em **decibel*** a variação da amplitude da saída (para uma entrada unitária). No segundo caso (diagrama de Bode de fase), usa-se o mesmo eixo horizontal, mas o eixo das ordenadas contém a diferença de fase $\Delta\phi$ entre as tensões (sinusoidais) de saída $v_C$ e de entrada $v_S$, coluna 5. Como no circuito em causa, $v_C$ está em atraso em relação a $v_S$, esta diferença de fase é negativa. **Nota: represente, também, nos seus gráficos os resultados da simulação (colunas 4 e 6) por forma a aferir da qualidade das suas medidas** (use, se possível, outra côr).

**C**

- Observe o diagrama de Bode de amplitude que desenhou. Porque se denomina este circuito de *PASSA-BAIXO*?

### 1.4 CIRCUITO RC PASSA-ALTO (DERIVADOR)

O circuito da figura 2 é semelhante ao da figura trocando-se a resistência com o condensador. Considera-se a tensão de saída aos terminais da resistência, em vez do condensador.

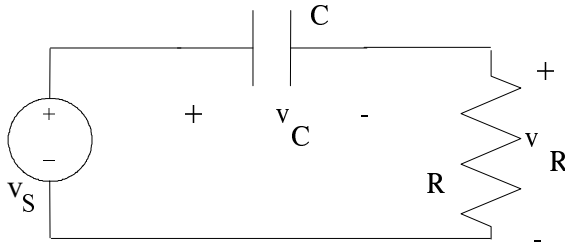


Figura 2. Circuito RC passa-alto

* O decibel (*dB*) é a décima parte do Bell (*B*) e define-se como sendo igual a 20 vezes o logaritmo decimal do módulo de uma dada relação. Convém notar que, em verdade, o B é uma unidade adimensional, uma vez que exprime um logaritmo de um quociente. No nosso caso, trata-se do quociente entre as amplitudes das tensões de saída e de entrada, e quando estas são sinusoidais, tem o nome de **ganho** do circuito. Assim, o ganho (expresso em dB) será:
$20 \log_{10} \left| \frac{V_{Cm}}{V_{Sm}} \right|$ o que, para $v_S$ unitário dá apenas $20 \log_{10} |V_{Cm}|$.

**T**

- Tente apresentar uma aplicação em que este circuito possa ser útil.

**E**

- Realize o circuito da figura 2, usando para R uma resistência de 10kΩ e para C um condensador de 100nF. Use uma onda rectangular para $v_S$ de período 10 ms. Esboce a tensão aos terminais da resistência:

**E**

- Determine agora experimentalmente a constante de tempo da tensão de saída. Neste caso, ao fim de t = RC segundos, a tensão na resistência desceu 63,2% do seu valor máximo.

**T**

- Repare que $v_R$ se aproxima da derivada da entrada. Tente apresentar um critério que compare o período da tensão de entrada com a constante de tempo do circuito, para que ele se comporte como um diferenciador:

E S

- Colocando uma tensão sinusoidal de 1 $V_{pp}$, e mudando novamente R para 1,5kΩ, preencha a tabela seguinte:

| **Frequência** | **Tensão de saída ($V_{Cpp}$) (experimental)** | **$20 \log_{10} V_{Cpp}$ (experimental)** | **$20 \log_{10} V_{Cpp}$ (simulação)** |
|---|---|---|---|
| **100 Hz** | | | |
| **200 Hz** | | | |
| **400 Hz** | | | |
| **800 Hz** | | | |
| **1 kHz** | | | |
| **2 kHz** | | | |
| **4 kHz** | | | |
| **8 kHz** | | | |
| **10 kHz** | | | |
| **20 kHz** | | | |
| **40 kHz** | | | |
| **80 kHz** | | | |

Tabela 3. Variação do módulo da tensão de saída com a frequência.

- A partir dos valores da tabela anterior, obtenha dois gráficos (usando papel semi-logarítmico) que representem a evolução de $20 \log_{10} V_{Cpp}$. Como já sabe, este gráfico é denominado *diagrama de BODE de amplitude.*

**Nota: represente, também, nos seu gráfico os resultados da simulação por forma a aferir da qualidade das suas medidas** (use, se possível, outra côr).

C

- Resuma o comportamento deste circuito com a frequência:

C

- Porque se denomina de *PASSA-ALTO* este circuito?

C

- Qual o seu comportamento a uma tensão contínua em $v_S$?

☛ Foi-lhe chamada a atenção, no início deste trabalho, para **NÃO** colocar a entrada do osciloscópio em **AC**. Se o fizer, equivale a medir tensões (nodais) através de um circuito do tipo do indicado na figura 2, em que R = 1MΩ.

C

- Baseando-se nos ensaios efectuados, tente dimensionar uma experiência para determinar qual a capacidade que o osciloscópio internamente coloca em série com a entrada: