# 4 . Circuitos a capacitor chaveado

São circuitos envolvendo chaves, capacitores e fontes de tensão, usados na implementação de filtros analógicos, multiplicadores de tensão, inversores, etc. As chaves são implementadas com diodos ou transistores, o que possibilita operação em altas freqüências de chaveamento.

*Figura4. 1: Circuito básico para análise do capacitor chaveado*

## *4.1 Análise do capacitor em regime de chaveamento*

Considerando-se o circuito anterior tem-se que as cargas armazenadas no capacitor estão relacionadas com a capacitância e tensão pela expressão:

$$Q = Vc \cdot C$$

A chave é equivalente a um resistor variável controlado por uma tensão ou corrente externos. Ao ligarmos a chave, haverá uma mudança rápida ($10^{-6}$ a $10^{-9}$ s) na sua resistência Rch, iniciando a carga do capacitor. A relação entre a resistência da chave desligada ($R_{off}$) e ligada ($R_{on}$) é de várias ordens de grandeza ($10^{-9}$ a $10^{-12}$). O tempo de comutação da chave ($T_{sw}$) é normalmente inferior à constante de tempo $C.R_{on}$. Dessa forma a maior parte das cargas são transferidas após a chave estar ligada. .

Este processo de transferência de cargas envolve perdas, que no caso são transformadas em calor (efeito Joule) predominantemente na chave (maior resistência do circuito).

## 4.2 *Transferências de cargas*

Seja o circuito da figura 4.2:

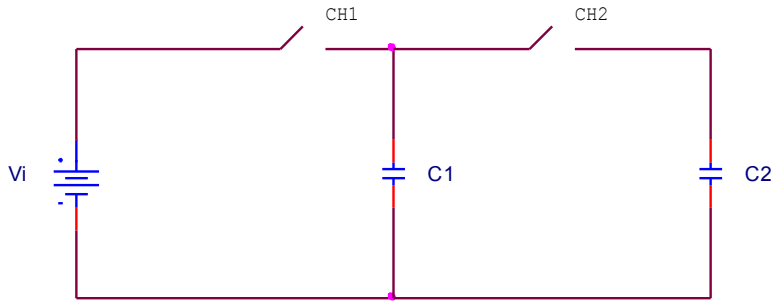


*Figura4. 2: Circuito para análise da transferência de cargas entre 2 capacitores*

Considere-se que no circuito as chaves operam em regime complementar, ou seja, quando CH1 está ligada, CH2 está desligada e vice-versa (Figura 4.3) e que não ocorre sobreposição entre chaves ligadas. Tc é o período de chaveamento, que é igual para ambas as chaves. No primeiro ciclo de chaveamento (CH1="ON", CH2="OFF"), o capacitor C1 carrega-se com a tensão Vi. No segundo ciclo (CH1="OFF", CH2="ON") As cargas armazenadas em C1 são transferidas para C2 até que haja equilíbrio, ou seja, $V_{c1} = V_{c2}$. Este processo se repete até que a tensão em ambos capacitores seja igual a Vi.

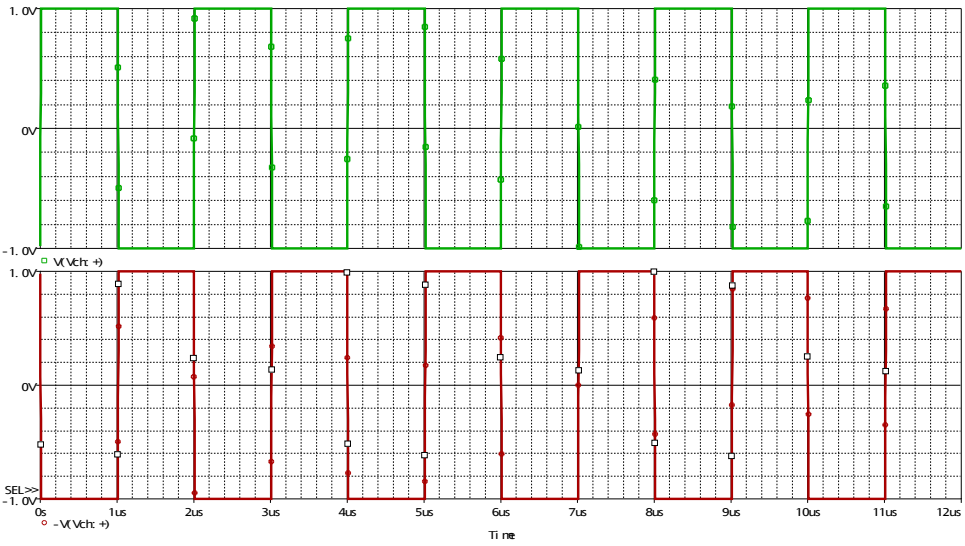


*Figura4. 3: Formas de onda aplicadas nas chaves CH1 e CH2*

### 4.2.1 Análise da transferência de cargas

O processo de transferência de cargas nos capacitores é fortemente não linear, pois depende de como ocorre a variação temporal da resistência da chave, bem como da carga exponencial uma vez estabelecido o valor de $R_{on}$. Entretanto uma análise detalhada desta etapa não é necessária pois no final de cada ciclo de chaveamento $T_C$, considera-se que todas as cargas já foram transferidas. Para que essa consideração seja válida , temos que:

$$R_{ON}\ C1 << T_c$$

$$T_C = T1+T2=T3+T4=...$$

Para t = 0 (condição inicial):

$$v_{C1} = v_{C2} = 0$$

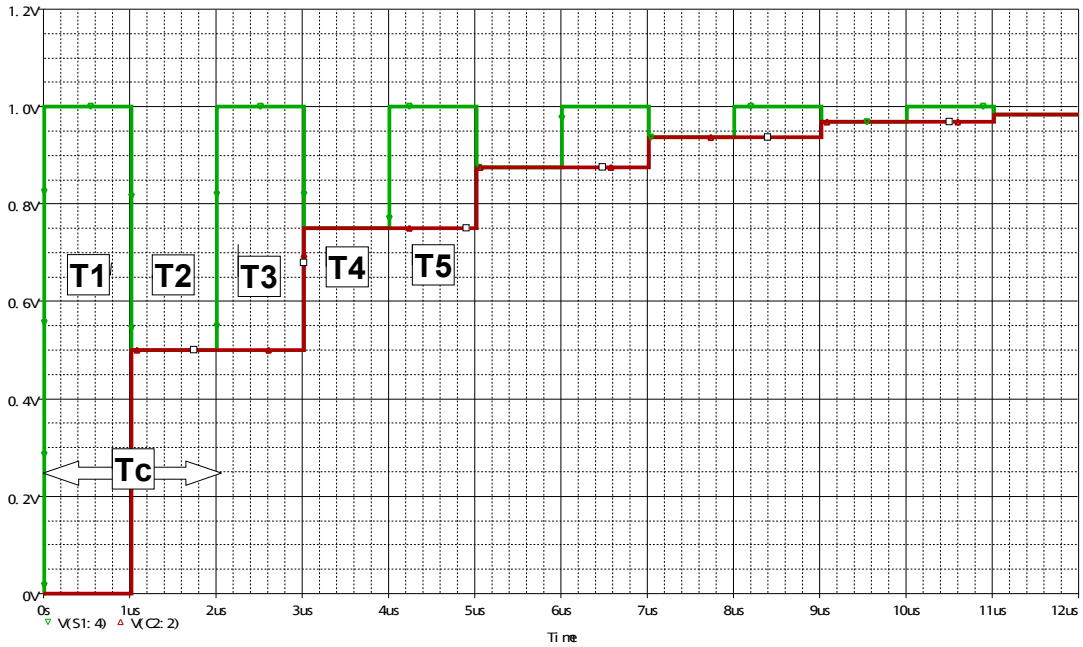


*Figura4. 4: Formas de onda das tensões nos capacitores C1 (verde) e C2 (vermelho)*

1) No final do 1º semiciclo T1:

$$v_{C1} = Vi$$

$$Q_1 = C_1.Vi$$

$$v_{c2} = 0$$

$$Q_2 = 0$$

2) No final do 2º semiciclo T2 ($1T_C$):

$$Q_1 + Q_2 = Q_1' + Q_2'$$

$$C_1.Vi = v_C'.C_1 + v_C'.C_2$$

$$v_C' = Vi.\frac{C_1}{(C_1 + C_2)}$$

3) No final do 3º semiciclo T3:

$$v_{C1} = Vi$$

$$Q_1 = C_1.Vi$$

$$v_{C2} = Vi.\frac{C_1}{(C_1 + C_2)}$$

4) No final do 4º semiciclo T4 ($2T_C$):

$$Q_1 + Q_2' = Q_1'' + Q_2''$$

$$Q_1 = C_1.Vi \qquad Q_2' = Vi\frac{C_1 C_2}{(C_1 + C_2)}$$

$$C_1.Vi + Vi\frac{C_1 C_2}{(C_1 + C_2)} = v_C''.C_1 + v_C''.C_2$$

$$v_C'' = Vi\frac{({C_1}^2 + C_1.C_2 + C_1.C_2)}{(C_1 + C_2)^2} = Vi.\frac{({C_1}^2 + 2C_1.C_2)}{(C_1 + C_2)^2}$$

A transferência de cargas se repete, a tensão em C2 aumenta progressivamente até atingir Vi, para um tempo $t >> T_C$. Pode-se observar que esse aumento ocorre de forma exponencial a cada $T_C$ e depende da relação entre C1 e C2. Quanto maior a relação C2/C1, maior o número de períodos $T_C$ necessários para atingir uma dada tensão em C2.

Para $C_1 = C_2$:

$$v_C' = \frac{Vi}{2} \qquad v_C'' = 2\frac{Vi}{3} \qquad v_C''' = 3\frac{Vi}{4}$$

Para $2C_1 = C_2$:

$$v_C' = \frac{Vi}{3} \qquad v_C'' = 5\frac{Vi}{9} \qquad v_C''' = 19\frac{Vi}{27}$$

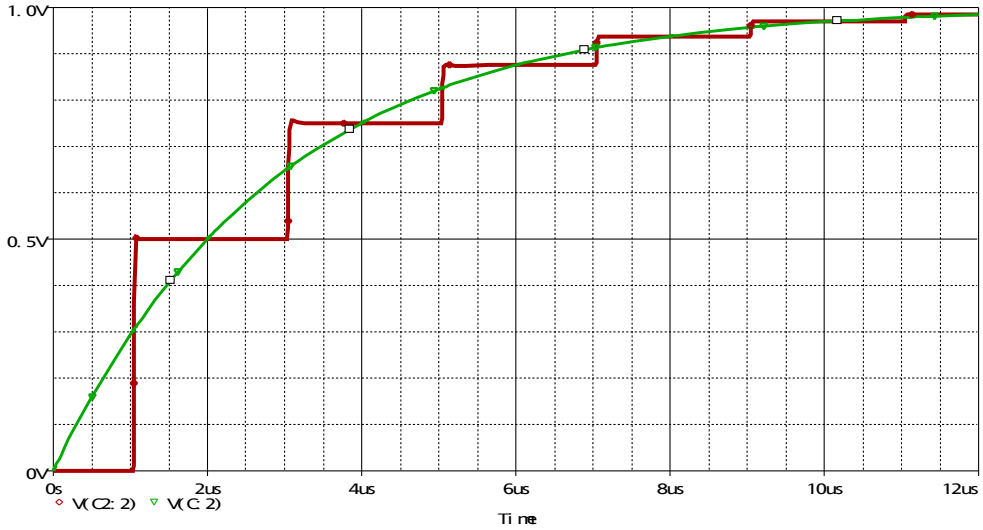


*Figura4. 5: Tensão de carga de C2 (vermelho) e exponencial contínua equivalente (verde) para a condição C1=C2*

O crescimento exponencial da tensão em C2 leva à comparação com um circuito RC equivalente, tendo C=C2 (Figura 4.6). $R_{eq}$ pode ser calculado considerando-se que a cada $T_C$, a tensão no capacitor C2 coincide com a tensão do circuito RC equivalente, como visto na figura 4.5. Aplicando-se a aproximação degrau de tensão, temos:

$$R_{eq} = \frac{T_C}{C2.\ln\left[\frac{C1}{(C1+C2)}\right]}$$

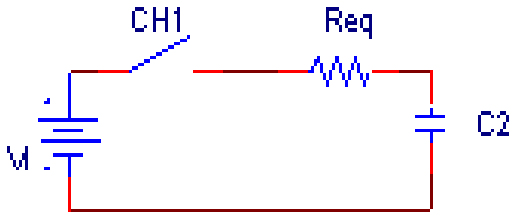


*Figura4. 6: Circuito RC equivalente ao da figura 4.2*