

Capítulo 10

Capacitores e Circuito RC

10.1

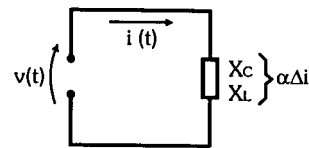
Conceito de Dispositivos Reativos

Nos dois próximos capítulos, vamos tratar de dois dispositivos chamados reativos, a saber: o capacitor e o indutor, bem como de suas aplicações em corrente contínua.

Primeiramente, cabe aqui uma rápida explicação sobre a diferença entre os dispositivos resistivo e reativo. Um dispositivo *resistivo*, como, por exemplo, o resistor, é aquele que *resiste à passagem de corrente*, mantendo o seu valor ôhmico constante tanto para a corrente contínua como para a corrente alternada.

Já, o dispositivo *reativo reage às variações de corrente*, sendo que seu valor ôhmico muda conforme a velocidade da variação da corrente nele aplicada.

Essa reação às variações de corrente é denominada *reatância capacitiva X_C* ou *reatância indutiva X_L* , cujas unidades de medida é o *ohm $[\Omega]$* .

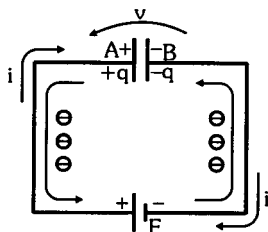


Primeiramente, trataremos do comportamento desse tipo de dispositivo apenas em corrente contínua, incluindo, porém, o período de transição entre a ligação do circuito reativo e a sua estabilização.

10.2

Capacitor e Conceito de Capacitância

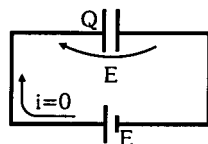
Considere duas placas condutoras paralelas *A* e *B*, denominadas *armaduras*, separadas por um material isolante denominado *dielétrico*.



Aplicando uma diferença de potencial (tensão) entre as placas, com potencial positivo na placa *A* e potencial negativo na placa *B*, a placa *A* começa a ceder elétrons para o pólo positivo da fonte, carregando-se positivamente, e a placa *B*, simultaneamente, começa a atrair elétrons do pólo negativo da fonte, carregando-se negativamente, formando um fluxo de elétrons (corrente *i*).

Porém, como entre as placas existe um material isolante, esse fluxo de elétrons não o atravessa, fazendo com que as cargas fiquem armazenadas nas placas.

Conforme aumenta a carga *q* armazenada nas placas, aumenta a diferença de potencial *v* entre elas, fazendo com que o fluxo de elétrons diminua.

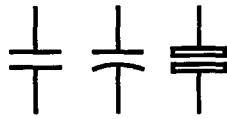


Após um determinado tempo, a carga armazenada atinge o seu valor máximo *Q*. Isso ocorre quando a diferença de potencial entre as placas se iguala à tensão da fonte ($v = E$), cessando o fluxo de elétrons ($i = 0$).

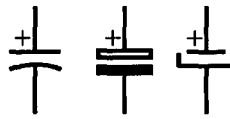
Nota: Consulte no Apêndice 1, os tópicos VI e VII.

Esse dispositivo, com capacidade de armazenar cargas elétricas (energia eletrostática), é chamado de *capacitor* ou *condensador*, cujos símbolos mais comuns estão representados abaixo.

Capacitor Não Polarizado



Capacitor Polarizado



Capacitor Variável



Em geral, nos capacitores fabricados com placas condutoras separadas por um dielétrico, a tensão pode ser aplicada aos seus terminais com qualquer polaridade.

Porém, em alguns capacitores, como os eletrolíticos de alumínio ou de tântalo, as placas devem ser polarizadas corretamente; caso contrário, eles podem se danificar. Para isso, o fabricante identifica o terminal positivo ou negativo no próprio encapsulamento, por meio dos sinais + ou -.

Capacitância x Características Elétricas

A capacidade de armazenamento de cargas elétricas é chamada de *capacitância*, simbolizada pela letra C .

A capacitância é a medida da carga elétrica q que o capacitor pode armazenar por unidade de tensão v_c .

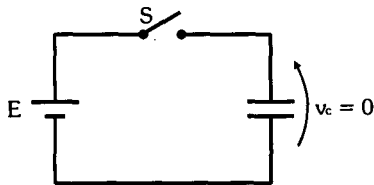
Matematicamente:

$$C = \frac{q}{v_c}$$



Por esta fórmula, a unidade de capacitância é *coulomb/volt* [C/V] ou, simplesmente, *farad* [F].

Comportamento Elétrico do Capacitor



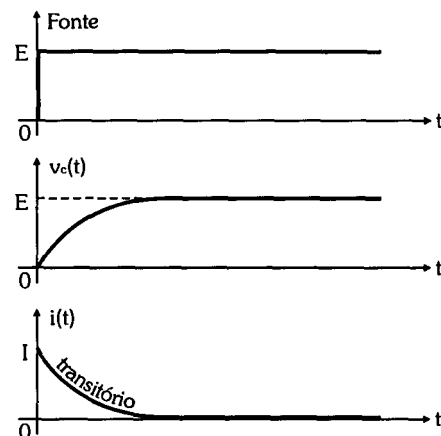
Fechando a chave no instante $t = 0$, a tensão entre as placas do capacitor cresce exponencialmente até atingir o valor máximo, isto é, $v_c = E$.

Com a corrente acontece o contrário. Inicialmente, com as placas do capacitor descarregadas, a corrente não encontra qualquer resistência para fluir, tendo um valor máximo $i = I$, caindo exponencialmente até cessar, $i = 0$.

O período entre o fechamento da chave e a estabilização da tensão é rápido, mas não instantâneo, sendo denominado *transitório*.

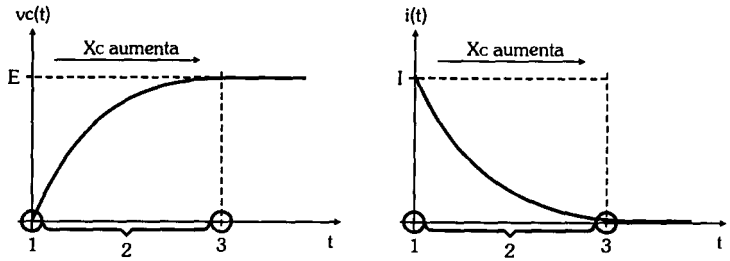
Vamos analisar, em detalhes, o comportamento da tensão e da corrente no capacitor.

Considere o circuito ao lado, com a chave S aberta e com o capacitor inicialmente descarregado, isto é, $v_c = 0$.



Esse comportamento do capacitor leva-nos às seguintes conclusões:

- 1) Quando o capacitor está totalmente descarregado, a fonte o “enxerga” como um curto-circuito ($X_C = 0$). Por isso, $v_c = 0$ e $i = I$.
- 2) Conforme as placas se carregam e a tensão v_c aumenta, a fonte “enxerga” o capacitor como se ele fosse uma reatância X_C crescente, fazendo com que a corrente i diminua.



- 3) Quando o capacitor está totalmente carregado, a tensão entre as placas se iguala à da fonte, $v_c = E$, que o “enxerga” como um circuito aberto ($X_C = \infty$). Por isso, $i = 0$.

A relação entre a tensão v_c e a corrente i no capacitor pode ser dada matematicamente por meio das expressões:

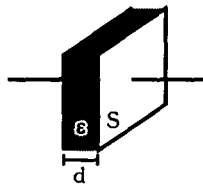
$$v_c = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i \cdot dt + v_{c0}$$

e

$$i = C \cdot \frac{dv_c}{dt}$$

em que v_{c0} é tensão no capacitor em $t = 0$.

Capacitância x Características Físicas



A capacitância de um capacitor de placas paralelas depende da área $S [m^2]$ das placas, da distância $d [m]$ entre elas e do material dielétrico, que é caracterizado por sua *permissividade absoluta*, representada pela letra grega ϵ (epsílon), cuja unidade de medida é *farad/metro* $[F/m]$.

Matematicamente:

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d}$$

No vácuo, $\epsilon_0 = 8,9 \times 10^{-12} F/m$. Para os demais materiais, essa característica pode ser dada em relação à *permissividade do vácuo*, conforme a tabela seguinte:

Dielétrico	Permissividade - ϵ $[F/m]$
ar	ϵ_0
polietileno	$2,3 \cdot \epsilon_0$
papel	$3,5 \cdot \epsilon_0$
baquelite	$4,8 \cdot \epsilon_0$
mica	$6 \cdot \epsilon_0$
porcelana	$6,5 \cdot \epsilon_0$

Michael Faraday (1791 – 1867)

Cientista inglês, estudou as relações entre a eletricidade estática e a corrente elétrica, e entre a eletricidade e a luz, chegando a formular uma teoria sobre a natureza eletromagnética da luz. Inventou o voltímetro durante suas pesquisas sobre eletrólise.

A unidade de medida de capacitância é farad, em sua homenagem.



Comercialmente, existem diversos tipos de capacitores fixos e variáveis, que abrangem uma ampla faixa de capacitâncias, desde alguns *picoFarads* [*pF*] até alguns *milifarads* [*mF*].

Especificações dos Capacitores

Os fabricantes de capacitores, além de seus valores nominais, fornecem várias outras especificações em seus catálogos e manuais, das quais destacamos as seguintes:

Tolerância

Dependendo da tecnologia de fabricação e do material dielétrico empregado, a tolerância dos capacitores pode variar. Em geral, ela está entre $\pm 1\%$ e $\pm 20\%$.

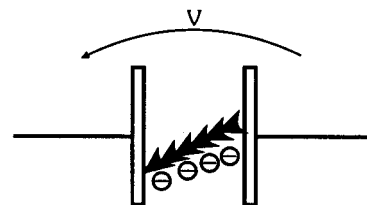
Tensão de Isolação

É a máxima tensão que pode ser aplicada continuamente ao capacitor, indo desde alguns *volts* [*V*] até alguns *quilovolts* [*kV*].

A máxima tensão de isolação está relacionada, principalmente, com o dielétrico utilizado na fabricação do capacitor.

Isso se justifica pelo fato de que uma tensão muito elevada pode gerar um campo elétrico entre as placas, suficiente para romper o dielétrico, abrindo um caminho de baixa resistência para a corrente.

Quando isso ocorre, dizemos que o capacitor possui uma resistência de fuga, podendo, inclusive, entrar em curto-circuito.



Nos capacitores cerâmicos e plásticos (poliéster, poliestireno e polipropileno), a tensão de isolação está na faixa de algumas dezenas de volts até alguns quilovolts.

Nos capacitores eletrolíticos (de alumínio e de tântalo), a tensão de isolação é limitada a algumas dezenas de volts.






Capacitores Comerciais


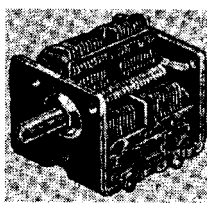
Os valores comerciais de capacitores são diversos, porém os mais comuns são de múltiplos e submúltiplos das décadas mostradas na tabela seguinte:

Capacitores não Eletrolíticos até $1\mu F$												
10	12	15	18	22	27	33	47	56	68	75	82	91

Capacitores Eletrolíticos até $10000\mu F$					
10	22	27	33	47	68

A tabela seguinte mostra alguns tipos de capacitores fixos e variáveis, bem como algumas de suas características.

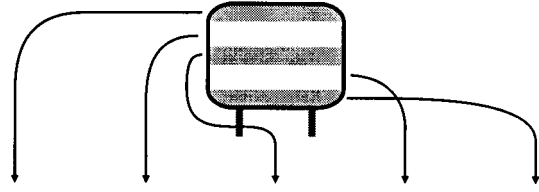
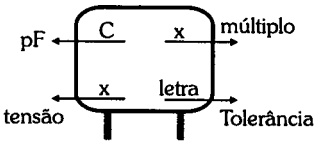
Tipos de Capacitores Fixos				
Cerâmico 	Plástico Metalizado 	Eletrolítico (alumínio) 	Eletrolítico (tântalo) 	SMD 
Polaridade: não Capacitância: pF - nF Isolação: V - kV	Polaridade: não Capacitância: nF - μF Isolação: V - kV	Polaridade: sim Capacitância: μF - mF Isolação: V	Polaridade: sim Capacitância: nF - μF Isolação: V	Polaridade: sim e não Capacitância: pF - μF Isolação: V

Tipos de Capacitores Variáveis	
Trimmer 	Placas Paralelas 
Polaridade: não Capacitância: pF - nF Isolação: V	Polaridade: não Capacitância: pF - nF Isolação: V

Obs.: Estas características podem variar em função do fabricante de capacitores.

Códigos de Especificação de Capacitores

Em geral, os capacitores não trazem as suas especificações no próprio encapsulamento. Por isso, existem três códigos para expressá-las: *código de cores* (para capacitância nominal, tolerância e tensão de isolação) é usado principalmente nos capacitores de poliéster metalizado, o *código alfabético* (para tolerância) é usado em diversos tipos de capacitor e o *código numérico* (para capacitância nominal e tensão de isolação) é usado principalmente nos capacitores cerâmicos.

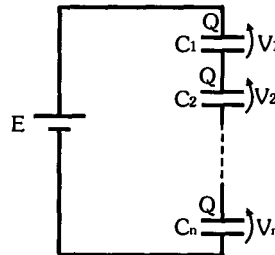
Capacitores de Poliéster Metalizado (Código de Cores)						Capacitores Cerâmicos (Código Alfanumérico)			
									
Cores	1º Díg.	2º Díg.	Múltiplo	± (%)	Tensão	Nº (x)	Múltiplo	Tensão	Tolerância
Preto		0		20		0			C ± 0,25pF
Marrom	1	1	x 10 pF		100 a 150 V	1	x 10 pF	100 V	D ± 0,25pF
Vermelho	2	2	x 10 ² pF		200 a 250 V	2	x 10 ² pF	25 V	F ± 1pF
Laranja	3	3	x 10 ³ pF		300 a 350 V	3	x 10 ³ pF		F ± 1 %
Amarelo	4	4	x 10 ⁴ pF		400 a 450 V	4	x 10 ⁴ pF		G ± 2 %
Verde	5	5	x 10 ⁵ pF		500 a 550 V	5	x 10 ⁵ pF	50 V	J ± 5 %
Azul	6	6			600 a 650 V	6	x 10 ⁶ pF		K ± 10 %
Violeta	7	7				7	x 10 ⁷ pF		L ± 20 %
Cinza	8	8	x 10 ⁻² pF			8	x 10 ⁻² pF		
Branco	9	9	x 10 ⁻¹ pF	10		9	x 10 ⁻¹ pF		

Obs.: O logotipo do fabricante pode ser usado para representar a tensão de isolação, cujo valor depende de código específico.

Num circuito, os capacitores podem estar ligados em série e/ou em paralelo, em função da necessidade de dividir a tensão e/ou a corrente ou de obter uma capacitância diferente dos valores comerciais.

Associação Série de Capacitores

Na associação série, os capacitores estão ligados de forma que a carga Q armazenada em cada um deles seja a mesma, e a tensão E total aplicada aos capacitores se subdivide entre eles de forma inversamente proporcional aos seus valores.



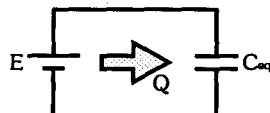
Pela Lei de Kirchhoff para Tensões, a soma das tensões nos capacitores é igual à tensão total E aplicada:

$$E = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

Como $V_i = \frac{Q}{C_i}$, tem-se:
$$E = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \dots + \frac{Q}{C_n} \Rightarrow \frac{E}{Q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

O termo E/Q corresponde ao inverso da capacitância equivalente vista pela fonte de alimentação. Assim:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$



Isso significa que, se todos os capacitores dessa associação forem substituídos por uma única capacitância de valor C_{eq} , a fonte de alimentação E fornecerá a mesma carga Q ao circuito.

No caso de n capacitores iguais a C em série, tem-se:

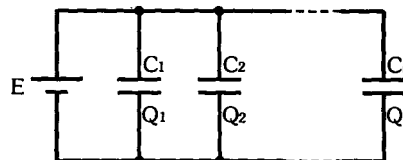
$$C_{eq} = \frac{C}{n}$$

Para dois capacitores em série, tem-se:

$$C_{eq} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

Associação Paralela de Capacitores

Na associação paralela, os capacitores estão ligados de forma que a tensão total E aplicada ao circuito seja a mesma em todos os capacitores, e a carga total Q do circuito se subdivide entre eles proporcionalmente aos seus valores.



Adaptando a Lei de Kirchhoff para a distribuição das cargas, a soma das cargas nos capacitores é igual à carga total Q fornecida pela fonte: $Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$

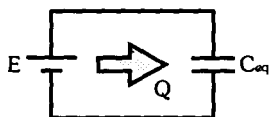
Substituindo as cargas dos capacitores por $Q_i = E \cdot C_i$, tem-se:

$$Q = C_1 \cdot E + C_2 \cdot E + \dots + C_n \cdot E \Rightarrow Q = E \cdot (C_1 + C_2 + \dots + C_n)$$

Dividindo a carga Q pela tensão E , chega-se a: $\frac{Q}{E} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$

O resultado Q/E corresponde à capacitância equivalente C_{eq} da associação paralela, isto é, a capacitância que a fonte de alimentação entende como sendo a sua carga. Assim:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$



Isso significa que se todos os capacitores dessa associação forem substituídos por uma única capacitância de valor C_{eq} , a fonte de alimentação E fornecerá a mesma carga Q ao circuito.

No caso de n capacitores iguais a C em paralelo, tem-se:

$$C_{eq} = n \cdot C$$

Obs.: Num texto, podemos representar dois capacitores em paralelo por: $C_1 // C_2$.

Associação Mista

A associação mista é formada por capacitores ligados em série e em paralelo, não existindo uma equação geral para a capacitância equivalente, pois ela depende da configuração do circuito. Assim, o cálculo deve ser feito por etapas, conforme as ligações entre os capacitores.

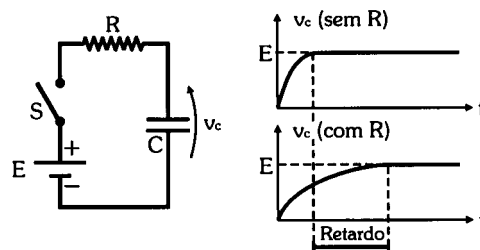
Um circuito temporizador é aquele que executa uma ação após um intervalo de tempo preestabelecido.

Neste tópico, analisaremos o comportamento de um circuito formado por um resistor e um capacitor ligados em série que, como veremos, estabelece uma relação entre níveis de tensão e um intervalo de tempo definido pelos valores do resistor e do capacitor.

Constante de Tempo

Como vimos no tópico 10.2, o tempo de carga de um capacitor alimentado diretamente por uma fonte de tensão não é instantâneo, embora seja muito pequeno.

Ligando um resistor em série com o capacitor, pode-se retardar o tempo de carga, fazendo com que a tensão entre os seus terminais cresça mais lentamente.



Vamos analisar dimensionalmente o produto entre resistência e capacitância $[R.C]$, considerando as seguintes unidades de medida das grandezas envolvidas:

- $[R] = \Omega$ (ohm) = V/A (volt/ampère)
- $[C] = F$ (farad) = C/V (coulomb/volt)
- $[I] = A$ (ampère) = C/s (coulomb/segundo)

$$[R.C] = \Omega.F = \frac{V}{A} \cdot \frac{C}{V} = \frac{C}{A} = \frac{I}{\frac{I}{s}} = \frac{C.s}{C} \Rightarrow [R.C] = s = \text{segundo}$$

Portanto, o produto $R.C$ resulta na grandeza tempo [segundo]. Esse produto é denominado *constante de tempo*, representado pela letra grega τ (tau).

Matematicamente:

$$\tau = R.C$$

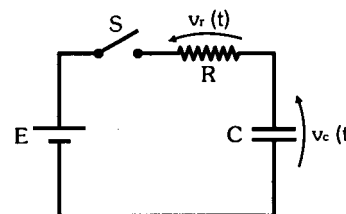
Num circuito RC, quanto maior a constante de tempo, maior é o tempo necessário para que o capacitor se carregue.

Carga do Capacitor

Considere um circuito RC série ligado a uma fonte de tensão contínua E e a uma chave S aberta, com o capacitor completamente descarregado.

Pela Lei de Kirchhoff para Tensões, a equação geral desse circuito é (S fechada):

$$v_c(t) + v_r(t) = E$$



A corrente que flui no circuito durante a carga do capacitor pode ser determinada aplicando a Primeira Lei de Ohm no resistor R :

$$i(t) = \frac{v_r(t)}{R}$$

Ligando a chave S no instante $t = 0$, observa-se que as tensões e a corrente do circuito resultam nos seguintes gráficos e expressões:

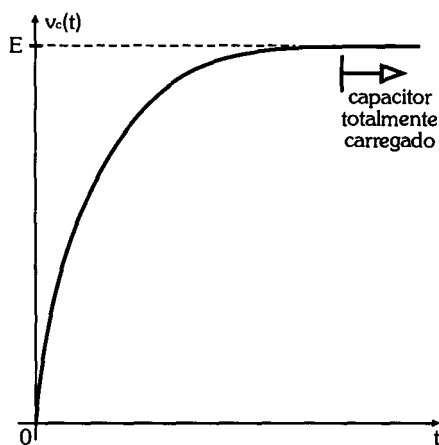
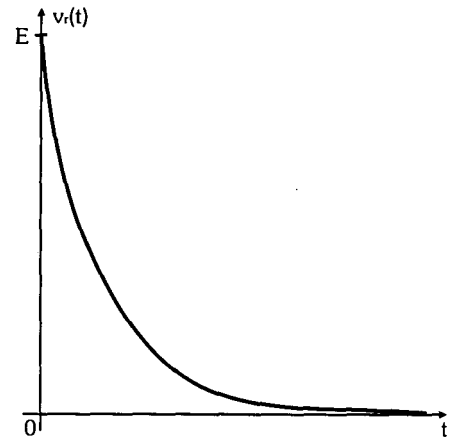
Tensão no Resistor

A tensão v_r cai exponencialmente de E até zero, pois o capacitor descarregado comporta-se como um curto-circuito e totalmente carregado comporta-se como um circuito aberto. Matematicamente:

$$v_r(t) = E \cdot e^{-t/\tau}$$

Em que: $e \cong 2,72 =$ algarismo neperiano

Observe que o termo $e^{-t/\tau}$ diminui com o aumento do instante t .



Tensão no Capacitor

A tensão v_c no capacitor cresce exponencialmente desde zero até a tensão E , quando a sua carga é total. Portanto, a tensão no capacitor é uma exponencial crescente, que pode ser deduzida da equação geral do circuito e da expressão de v_r :

$$v_c(t) + v_r(t) = E \Rightarrow v_c(t) = E - E \cdot e^{-t/\tau} \Rightarrow$$

$$v_c(t) = E \cdot (1 - e^{-t/\tau})$$

Observe que o termo $(1 - e^{-t/\tau})$ aumenta com o aumento do instante t .

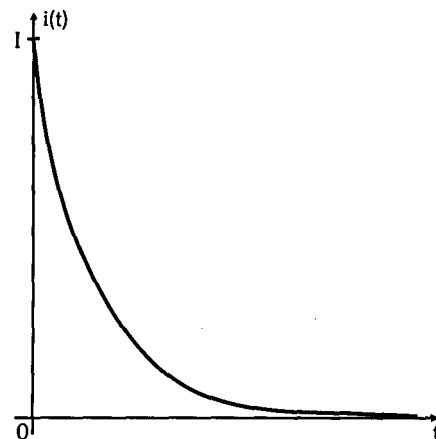
Corrente no Circuito

A corrente i inicia com um valor máximo $I = E/R$ quando o capacitor está descarregado (curto-circuito), caindo até zero quando o capacitor está totalmente carregado (circuito aberto). Matematicamente:

$$i(t) = \frac{v_r(t)}{R} \Rightarrow$$

$$i(t) = I \cdot e^{-t/\tau}$$

Observe que o termo $e^{-t/\tau}$ diminui com o aumento do instante t .



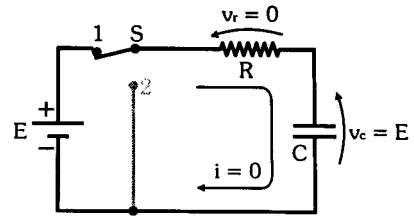
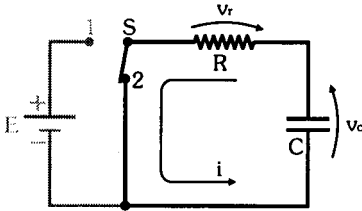
Análise do circuito durante a carga do capacitor:		
$v_c(t)$	$v_r(t)$	$i(t)$
<p style="text-align: center;">$v_c(t) = E.(1 - e^{-t/\tau})$</p>	<p style="text-align: center;">$v_r(t) = E.e^{-t/\tau}$</p>	<p style="text-align: center;">$i(t) = I.e^{-t/\tau}$</p>
No instante $t = 0$:		
$v_c(0) = E.(1 - e^{0/\tau}) \Rightarrow$ $v_c(0) = E.(1 - e^0) = E.(1 - 1) \Rightarrow$ $v_c(0) = 0$	$v_r(0) = E.e^{0/\tau} \Rightarrow$ $v_r(0) = E.e^0 = E.I \Rightarrow$ $v_r(0) = E$	$i(0) = I.e^{0/\tau} \Rightarrow$ $i(0) = I.e^0 = I.I \Rightarrow$ $i(0) = I$
Análise: Em $t = 0$, a tensão no capacitor é nula, a tensão no resistor é máxima e a corrente no circuito é máxima.		
No instante $t = \tau$:		
$v_c(\tau) = E.(1 - e^{-\tau/\tau}) \Rightarrow$ $v_c(\tau) = E.(1 - e^{-1}) = E.(1 - 0,37) \Rightarrow$ $v_c(\tau) = 0,63.E$	$v_r(\tau) = E.e^{-\tau/\tau} \Rightarrow$ $v_r(\tau) = E.e^{-1} \Rightarrow$ $v_r(\tau) = 0,37.E$	$i(\tau) = I.e^{-\tau/\tau} \Rightarrow$ $i(\tau) = I.e^{-1} \Rightarrow$ $i(\tau) = 0,37.I$
Análise: Em $t = \tau$, a tensão no capacitor cresce até 63% da tensão da fonte ($v_c = 0,63.E$), a tensão no resistor cai 63% ($v_r = 0,37.E$) e a corrente no circuito cai 63% ($i = 0,37.I$).		
No instante $t = 5.\tau$:		
$v_c(5.\tau) = E.(1 - e^{-5.\tau/\tau}) \Rightarrow$ $v_c(5.\tau) = E.(1 - e^{-5}) = E.(1 - 0,01) \Rightarrow$ $v_c(5.\tau) = 0,99.E$	$v_r(5.\tau) = E.e^{-5.\tau/\tau} \Rightarrow$ $v_r(5.\tau) = E.e^{-5} \Rightarrow$ $v_r(5.\tau) = 0,01.E$	$i(5.\tau) = I.e^{-5.\tau/\tau} \Rightarrow$ $i(5.\tau) = I.e^{-5} \Rightarrow$ $i(5.\tau) = 0,01.I$
Análise: Em $t = 5.\tau$, a tensão no capacitor cresce até 99% da tensão da fonte ($v_c = 0,99.E$), a tensão no resistor cai 99% ($v_r = 0,01.E$) e a corrente no circuito cai 99% ($i = 0,01.I$). Nesse caso, podemos considerar que o capacitor já se encontra totalmente carregado.		

Descarga do Capacitor

Considere um circuito RC série ligado a uma fonte de tensão E e a uma chave S inicialmente na posição 1, com o capacitor já completamente carregado.

Dessa forma, tem-se:

$$i = 0 ; v_c = E ; v_r = 0$$



Ao mudar a chave S para a posição 2 no instante $t = 0$, a fonte de alimentação é desligada, ficando o circuito RC em curto.

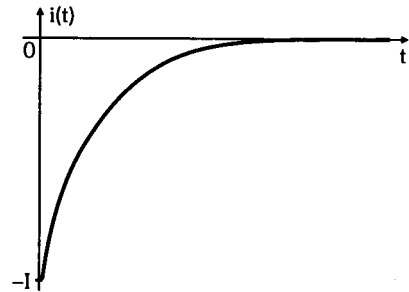
Assim, o capacitor se descarrega sobre o resistor, de forma que sua tensão descreve uma curva exponencial decrescente.

Nesse caso, o capacitor comporta-se como uma fonte de tensão, cuja capacidade de fornecimento de corrente é limitada pelo tempo de descarga.

Corrente no Circuito

A corrente i flui agora no sentido contrário, decrescendo exponencialmente desde $-I = -E/R$ até zero, devido à descarga do capacitor. Assim, a sua expressão é dada por:

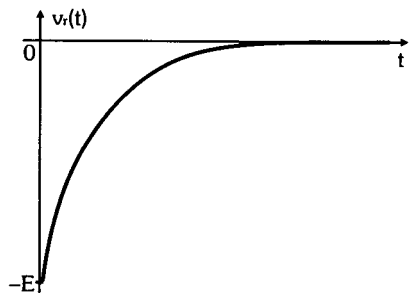
$$i(t) = -I.e^{-t/\tau}$$



Tensão no Resistor

A tensão v_r no resistor acompanha a corrente, de forma que a sua expressão é dada por:

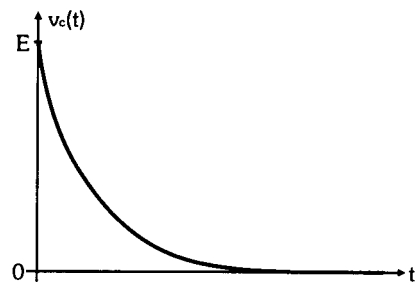
$$v_r(t) = -E.e^{-t/\tau}$$



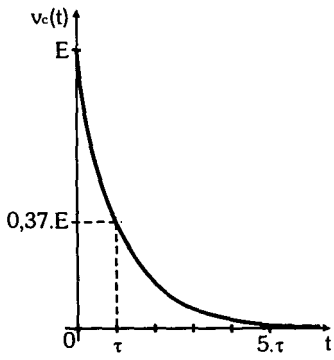
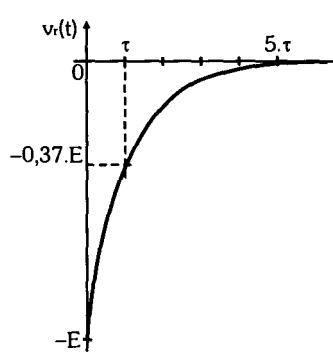
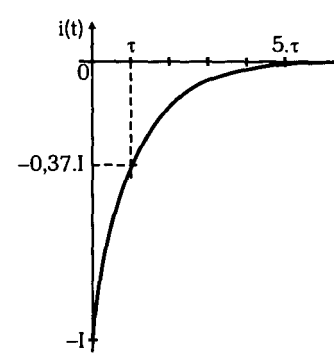
Tensão no Capacitor

A expressão da descarga do capacitor é dada por:

$$v_c(t) = E.e^{-t/\tau}$$



Análise do circuito durante a descarga do capacitor:

$v_c(t)$	$v_r(t)$	$i(t)$
 <p align="center">$v_c(t) = E.e^{-t/\tau}$</p>	 <p align="center">$v_r(t) = -E.e^{-t/\tau}$</p>	 <p align="center">$i(t) = -I.e^{-t/\tau}$</p>
No instante $t = 0$:		
$v_c(0) = E.e^{0/\tau} \Rightarrow$	$v_r(0) = -E.e^{0/\tau} \Rightarrow$	$i(0) = -I.e^{0/\tau} \Rightarrow$
$v_c(0) = E.e^0 = E.1 \Rightarrow$	$v_r(0) = -E.e^0 = -E.1 \Rightarrow$	$i(0) = -I.e^0 = -I.1 \Rightarrow$
$v_c(0) = E$	$v_r(0) = -E$	$i(0) = -I$
Análise: Em $t = 0$, as tensões no capacitor e no resistor e a corrente no circuito são máximas.		
No instante $t = \tau$:		
$v_c(\tau) = E.e^{-\tau/\tau} \Rightarrow$	$v_r(\tau) = -E.e^{-\tau/\tau} \Rightarrow$	$i(\tau) = -I.e^{-\tau/\tau} \Rightarrow$
$v_c(\tau) = E.e^{-1} \Rightarrow$	$v_r(\tau) = -E.e^{-1} \Rightarrow$	$i(\tau) = -I.e^{-1} \Rightarrow$
$v_c(\tau) = 0,37.E$	$v_r(\tau) = -0,37.E$	$i(\tau) = -0,37.I$
Análise: Em $t = \tau$, a tensão no capacitor cai 63% ($v_c = 0,37.E$), a tensão no resistor cai 63% ($v_r = -0,37.E$) e a corrente no circuito cai 63% ($i = -0,37.I$).		
No instante $t = 5.\tau$:		
$v_c(5.\tau) = E.e^{-5.\tau/\tau} \Rightarrow$	$v_r(5.\tau) = -E.e^{-5.\tau/\tau} \Rightarrow$	$i(5.\tau) = -I.e^{-5.\tau/\tau} \Rightarrow$
$v_c(5.\tau) = E.e^{-5} \Rightarrow$	$v_r(5.\tau) = -E.e^{-5} \Rightarrow$	$i(5.\tau) = -I.e^{-5} \Rightarrow$
$v_c(5.\tau) = 0,01.E$	$v_r(5.\tau) = -0,01.E$	$i(5.\tau) = -0,01.I$
Análise: Em $t = 5.\tau$, a tensão no capacitor cai 99% ($v_c = 0,01.E$), a tensão no resistor cai 99% ($v_r = -0,01.E$) e a corrente no circuito cai 99% ($i = -0,01.I$). Nesse caso, podemos considerar que o capacitor já se encontra totalmente descarregado.		

Neste tópico, analisaremos duas aplicações práticas do circuito RC: um circuito gerador de onda quadrada e um circuito de inicialização automática e manual para computador.

Porém, esses dois circuitos utilizam dois dispositivos que não foram objetos de estudo deste livro: a porta lógica inversora e o diodo semicondutor. Caso você não os conheça, não há problema, pois iniciaremos este tópico com uma rápida análise desses dispositivos.

Porta Lógica Inversora

A eletrônica digital trabalha com apenas dois níveis de tensão, caracterizando, assim, o nível lógico de um "bit".

O nível lógico "0" corresponde a uma tensão baixa ou 0V. O nível lógico "1" corresponde a uma tensão alta cujo valor depende da tensão de alimentação V_{cc} do circuito integrado considerado, sendo V_{cc} igual a 5V se a família for TTL e entre 3V e 18V se a família for CMOS.

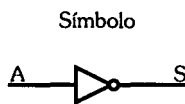
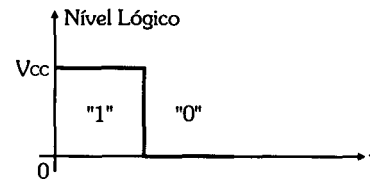


Tabela Verdade

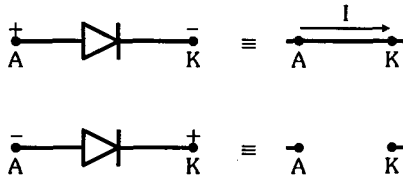
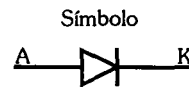
A	S
0	1
1	0

A porta lógica inversora, também denominada porta *NÃO* (*NOT*), caracteriza-se por complementar o nível lógico presente em sua entrada, isto é, $S = \bar{A}$, conforme mostra a sua tabela-verdade ao lado.

Diodo Semicondutor

O diodo é um dispositivo fabricado com material semicondutor, sendo que sua principal característica é permitir a condução da corrente elétrica num único sentido.

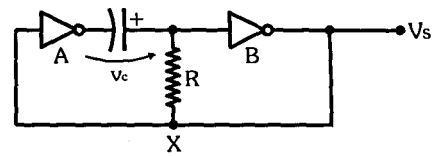
O comportamento do diodo depende de como os seus terminais anodo (A) e catodo (K) estão polarizados.



Quando o anodo é positivo em relação ao catodo, ele fica polarizado diretamente e comporta-se como um curto-circuito, conduzindo corrente elétrica; caso contrário, ele fica polarizado reversamente e comporta-se como um circuito aberto, não permitindo a condução da corrente elétrica.

Aplicação I – Gerador de Onda Quadrada

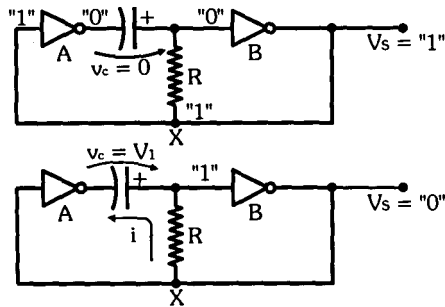
O circuito ao lado é muito utilizado para gerar uma onda quadrada de alta frequência (*MHz*), servindo como sinal de relógio (*clock*) em sistemas digitais seqüenciais e microprocessados.



Considerando inicialmente o capacitor descarregado, a entrada da porta *B* encontra-se com nível lógico "0", de forma que a saída do circuito apresenta nível lógico "1".

O nível lógico "1" da saída é realimentado simultaneamente para a entrada da porta *A* (impondo nível lógico "0" em sua saída) e para a extremidade *X* do resistor *R*.

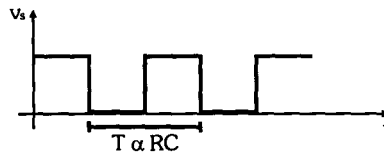
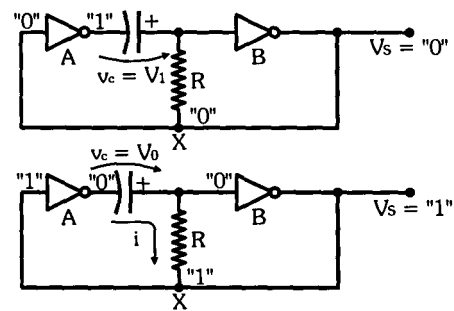
Assim, o capacitor *C* começa a se carregar por meio de *R*. Quando v_c atinge um nível V_1 suficientemente alto, a porta *B* complementa a saída, que passa a ter nível lógico "0".



O nível lógico "0" da saída é agora realimentado simultaneamente para a entrada da porta *A* (impondo nível lógico "1" em sua saída) e para a extremidade *X* do resistor *R*.

Assim, o capacitor *C* começa a se descarregar por meio de *R*. Quando v_c atinge um nível V_0 suficientemente baixo, a porta *B* atua, de forma que a saída do circuito é novamente complementada, voltando a apresentar nível lógico "1".

Este processo cíclico repete-se continuamente, fazendo com que o sinal de saída tenha a forma de onda quadrada, cujo período T , em [*s*], é diretamente proporcional à constante de tempo RC , sendo a frequência f , em [*Hz*], dada por: $f = 1/T$.



Aplicação II – Circuito de Inicialização do Computador

Todo computador, ao ser ligado, passa por um processo de inicialização que consiste em: testar a memória, preparar os periféricos da *CPU* e carregar o sistema operacional (*DOS* ou *WINDOWS*). Esse processo denomina-se *boot*.

Para isso, o computador precisa receber um nível lógico determinado no instante em que é ligado, para posicionar a memória *ROM* no endereço em que se encontra o comando de inicialização.

Esse nível lógico pode ser "0" ou "1", dependendo do tipo de microprocessador da *CPU*, e deve ser dado automaticamente por um circuito de inicialização (*reset*).

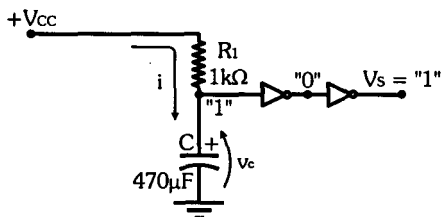
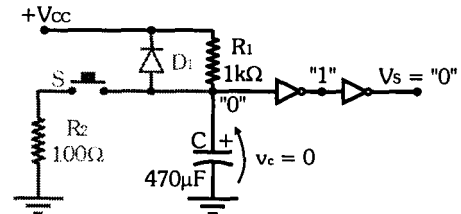
Além disso, todo computador possui um botão de *reset* em seu painel frontal, permitindo que a inicialização possa ser executada manualmente.

Inicialização Automática

O circuito de inicialização (*reset*) ao lado pode ser utilizado em diversos sistemas microprocessados, como o computador.

No instante em que a alimentação do computador é ligada, todos os circuitos que o compõem são alimentados (*CPU*, memórias e dispositivos de entrada e saída).

Porém, como o capacitor *C* encontra-se descarregado, a saída *V_s* do circuito envia um nível lógico "0" para a *CPU*, posicionando a memória no endereço em que se encontra o comando de inicialização.



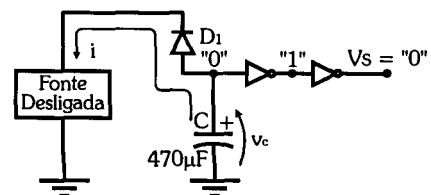
A *CPU* aguarda, então, o capacitor se carregar por meio de *R₁* até um nível de tensão suficiente para complementar as portas inversoras.

Quando isso ocorre, o nível lógico "1" na saída *V_s* libera a *CPU* para que a inicialização seja processada, terminando com o sistema operacional já disponível para o usuário.

Portanto, a função do capacitor é atrasar o comando de inicialização, dando tempo para que a memória se posicione no endereço correto, em que esse comando se encontra.

Como o capacitor não tem por onde se descarregar, ele assim permanece até que a alimentação do computador seja desligada.

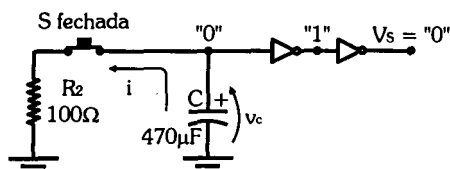
Nesse caso, como o diodo encontra-se diretamente polarizado, o capacitor descarrega-se rapidamente por ele e pela fonte de alimentação.



Inicialização Manual

Outra forma de inicializar o computador, quando ele se encontra em operação, é por meio da chave *S* que fica no seu painel frontal.

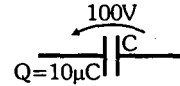
O acionamento manual dessa chave provoca a descarga rápida do capacitor por meio de *R₂*, de forma que a saída *V_s* envia novamente o nível lógico "0" para a *CPU*, reiniciando o computador.



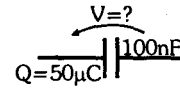
Exercícios Propostos

Capacitor e Conceito de Capacitância

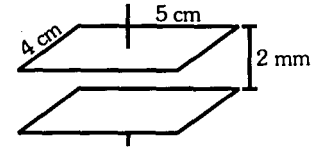
10.1) Qual é o valor do capacitor que, submetido a uma tensão de $100V$, armazena $10\mu C$ de carga?



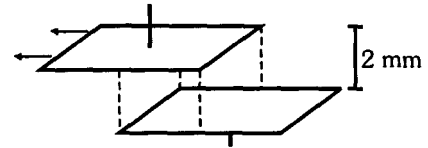
10.2) Um capacitor de $100nF$ está carregado com $50\mu C$. Qual é a tensão entre os seus terminais?



10.3) Um capacitor de placas paralelas tem as dimensões indicadas na figura ao lado. Determine a sua capacitância se



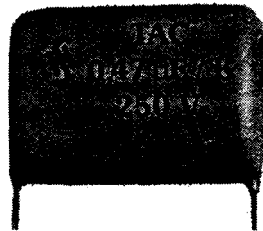
- o dielétrico for de ar;
- o dielétrico for de mica;
- o dielétrico for de ar e a distância d diminuir para a metade;
- o dielétrico for de ar e uma das placas se deslocar, de modo que a área útil seja a metade, conforme a figura ao lado.



Capacitores Fixos e Variáveis

10.4) Especifique os capacitores ao lado conforme os dados dos seus encapsulamentos:

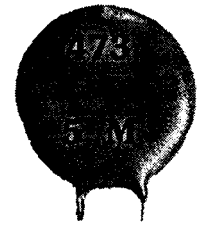
a)



b)



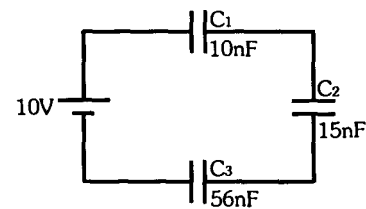
c)



Associação de Capacitores

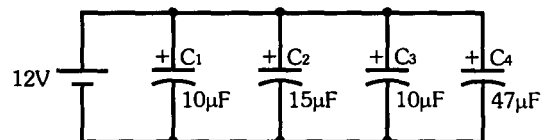
10.5) Considerando o circuito ao lado, formado por três capacitores ligados em série, determine:

- a capacitância equivalente do circuito série;
- a carga Q fornecida pela fonte E ao circuito;
- a tensão em cada capacitor.



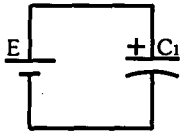
10.6) Considerando o circuito ao lado, formado por quatro capacitores ligados em paralelo, determine:

- a capacitância equivalente do circuito paralelo;
- a carga Q fornecida pela fonte E ao circuito;
- a carga armazenada em cada capacitor.

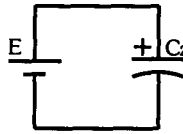


10.7) Dois capacitores, $C_1 = 10 \mu F / 25V$ e $C_2 = 10 \mu F / 12V$, são ligados de quatro formas diferentes a uma mesma fonte $E = 9V$, conforme as figuras abaixo:

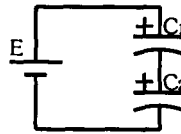
a)



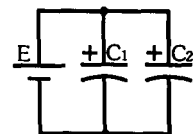
b)



c)

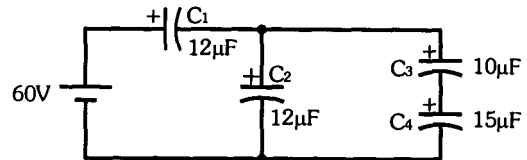


d)



Em qual ou em quais circuitos a fonte de alimentação fornece mais carga elétrica?

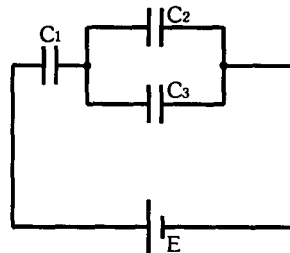
10.8) Considerando o circuito ao lado, formado por diversos capacitores ligados em série e em paralelo, determine:



- a) a capacitância $C_A = C_3$ série C_4 ;
- b) a capacitância $C_B = C_2 // C_A$;
- c) a capacitância $C_{eq} = C_1$ série C_B ;
- d) a carga Q que a fonte de alimentação fornece ao circuito;
- e) a carga Q_1 e a tensão V_1 no capacitor C_1 ;
- f) a carga Q_2 e a tensão V_2 no capacitor C_2 .

10.9) Considere o circuito ao lado e determine:

- a) a capacitância equivalente;
- b) a carga total fornecida pela fonte ao circuito;
- c) a carga armazenada em cada capacitor.



Dados:

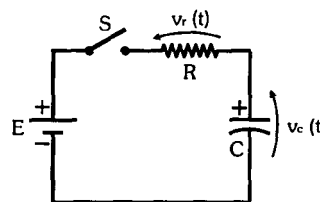
$$E = 6V$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = 2 \mu F$$

Circuito RC de Temporização

10.10) Considere o circuito RC ao lado, no qual o capacitor encontra-se totalmente descarregado.

- a) Determine a constante de tempo τ do circuito;
- b) A partir do fechamento da chave S , determine $v_c [V]$, $v_r [V]$ e $i [\mu A]$ para os seguintes instantes t : $0s$; $0,4s$; $0,6s$; $1,0s$; $1,5s$; $2,0s$; $3,0s$; $4,0s$; $5,0s$; $6,0s$ e $8,0s$;



Dados:

$$R = 100k\Omega$$

$$C = 10\mu F$$

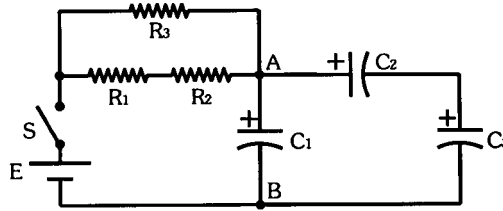
$$E = 10V$$

- c) Desenhe em folha milimetrada os gráficos de $v_c(t)$, $v_r(t)$ e $i(t)$;
- d) Analise os gráficos e tire suas conclusões sobre o comportamento do circuito nos instantes: $t = 0$; $t = \tau$ e $t = 5\tau$;
- e) Determine matematicamente o instante em que a tensão no capacitor atinge $5V$;
- f) Determine graficamente o instante t do item anterior e compare os resultados obtidos.

10.11) Considere o circuito ao lado.

Fechando a chave S no instante $t = 0$ com os capacitores totalmente descarregados, determine:

- a constante de tempo do circuito;
- o tempo mínimo necessário para que a tensão entre os pontos A e B seja igual à tensão da fonte de alimentação;
- a tensão entre os pontos A e B para um instante igual à metade do tempo encontrado no item anterior;
- o instante em que a tensão entre os pontos A e B atinge a metade da tensão da fonte de alimentação.

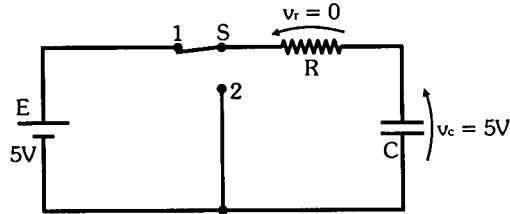


Dados:

$$\begin{aligned} E &= 12 \text{ V} \\ R_1 &= R_2 = 10 \text{ k}\Omega \\ R_3 &= 20 \text{ k}\Omega \\ C_1 &= 10 \mu\text{F} \\ C_2 &= C_3 = 20 \mu\text{F} \end{aligned}$$

10.12) Considere o circuito RC ao lado, no qual o capacitor encontra-se totalmente carregado com a tensão $E = 5V$.

- Determine a constante de tempo τ do circuito;
- A partir da mudança da chave S para 2, determine $v_c [V]$, $v_r [V]$ e $i [\mu A]$ para os seguintes instantes t : $0s$; $0,2s$; $0,3s$; $0,5s$; $0,8s$; $1,0s$; $1,4s$; $1,8s$; $2,0s$; $2,5s$ e $3,0s$;
- Desenhe em folha milimetrada os gráficos de $v_c(t)$, $v_r(t)$ e $i(t)$;
- Análise os gráficos e tire suas conclusões sobre o comportamento do circuito nos instantes: $t = 0$; $t = \tau$ e $t = 5\tau$;
- Determine matematicamente o instante em que a tensão no capacitor atinge $2,5V$;
- Determine graficamente o instante t do item anterior e compare os resultados obtidos.



Dados:

$$\begin{aligned} R &= 10 \text{ k}\Omega \\ C &= 47 \text{ nF} \end{aligned}$$

10.13) Nos três circuitos abaixo, os capacitores encontram-se totalmente descarregados. Esboce as formas de onda das tensões de saída v_s , considerando que as chaves S mudam de posição no instante $t = 0$.

