

EXPERIÊNCIA 5

Constante de Tempo RC

1. Objetivo

Compreender o comportamento do Circuito RC, verificar a validade de seu equacionamento e aplicá-lo na construção de um circuito oscilador.

2. Motivações

- O que caracteriza o bipolo capacitor?
- Quais parâmetros (e como) influenciam no armazenamento de Energia no capacitor?
- Quais as características (e equacionamento) de um circuito RC (resistor + capacitor)?
- Como projetar um oscilador a partir do circuito RC e porta lógica inversora?

3. Referências para Consulta

O seguinte *datasheet* pode ser consultado para detalhes:

- <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MM74HC14-D.PDF>

4. Bipolo Capacitor

Embora também seja um bipolo como resistor, o capacitor possui características bastante diferentes. É caracterizado por sua Capacitância, normalmente representada pela letra C e expressa em Faraday [F].

A capacitância C é definida principalmente pelos aspectos construtivos (geometria e dielétrico) do capacitor, mas pode sofrer a influência, por exemplo, da temperatura (que normalmente afeta tais aspectos).

Utilizando do Quadro representado na figura 1, o professor de laboratório fará uma explanação sobre os principais pontos do capacitor função característica – relação entre a tensão e a corrente no bipolo.

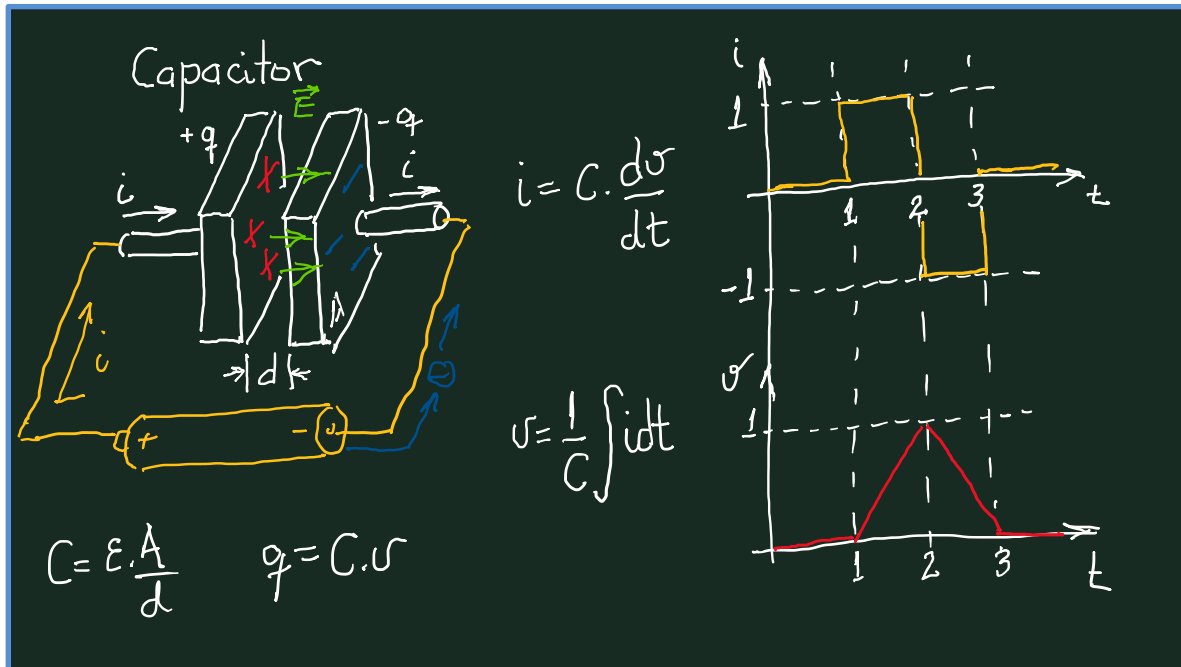


Figura 1 – Bipolo Capacitor

Observa-se que diferentemente da Lei de Ohm, que estabelecia a característica do bipolo resistor, tem-se agora uma equação diferencial (ou integral) caracterizando o bipolo capacitor:

$$i(t) = C \frac{d}{dt} v(t)$$

$$v(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$$

Como padrão utilizamos letras minúsculas quando nos referimos aos sinais – no caso corrente $i(t)$ e tensão $v(t)$ – que variam com o tempo.

A carga elétrica armazenada (q) tem por unidade o Coulomb [C]¹² e é proporcional à capacitância C e a tensão v .

Nota-se também na expressão da capacitância C – capacitor de placas paralelas – a influência dos aspectos construtivos: área (A), distância (d) e material dielétrico (ϵ).

¹ A unidade Coulomb [C] é uma homenagem ao físico francês Charles Augustin de Coulomb

² Um Coulomb corresponde a carga equivalente de $6,25 \times 10^{18}$ elétrons

5. Parte Experimental

Para que se possa verificar os conceitos expostos, faça o *login* em sua conta particular do **Tinkercad®** (www.tinkercad.com) e importe o circuito **ETE102-Energia** da galeria pública de circuitos. Este circuito está ilustrado na figura 2.

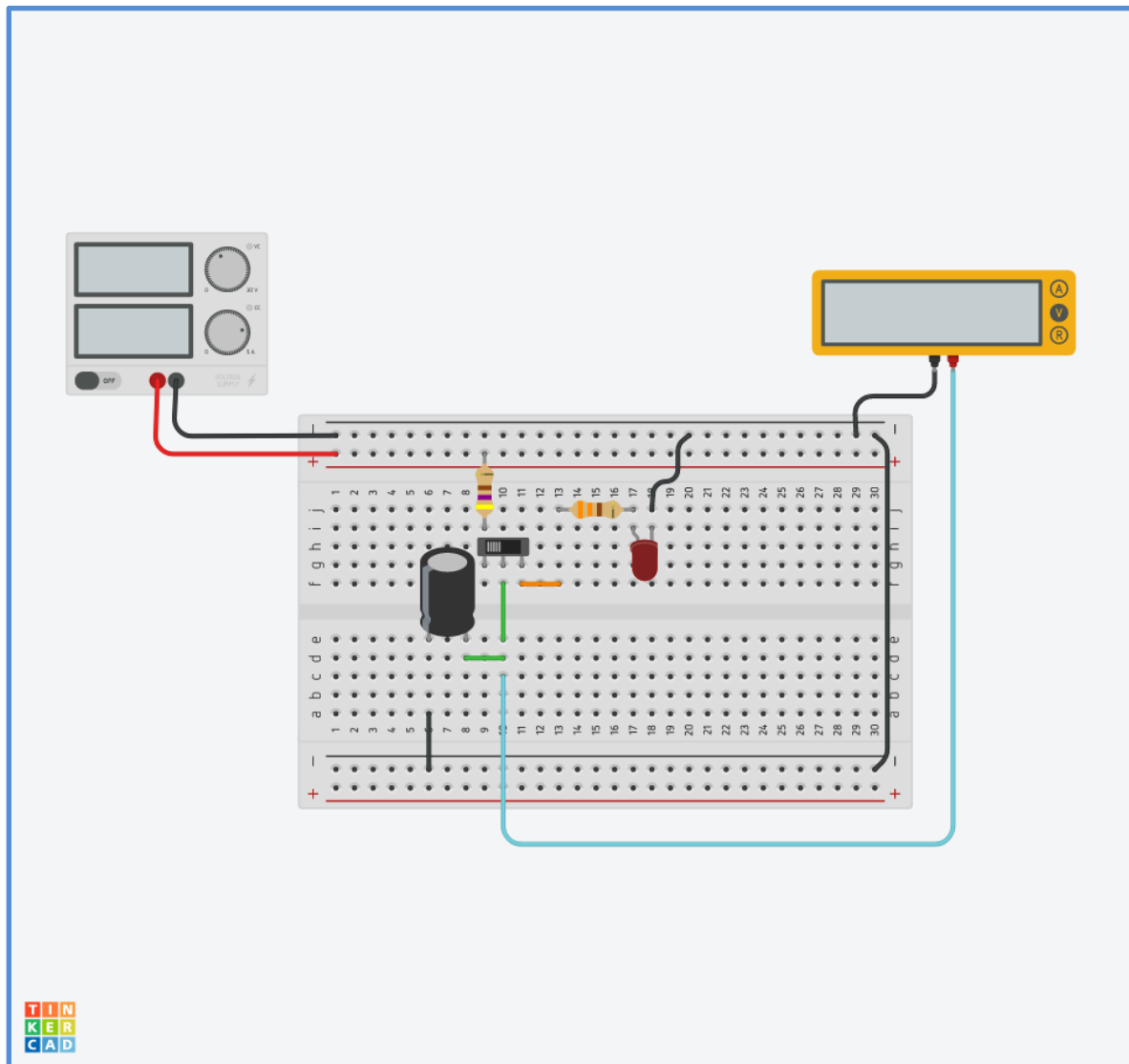


Figura 2 – Circuito ETE102-Energia

5.1 Observando a Energia

Neste circuito a fonte de alimentação está ajustada para 12V e o capacitor é de 1000µF. Ao ligar a simulação, estando a chave deslizante para o lado esquerdo, o capacitor irá carregar por meio do resistor de 470Ω até atingir 12V – a tensão sobre o capacitor pode ser monitorada pelo voltímetro – e após atingir os

12V, altere a posição da chave deslizante para a direita. Neste ponto o capacitor passa a operar como única fonte que fornece energia ao circuito composto pela ligação série do resistor de 330Ω e o led. Observe que o led acende e com o passar do tempo sua luminosidade decai até ficar apagado por completo.

Para percebermos melhor a questão da energia armazenada, repita o experimento para diferentes valores de Capacitância³ (metade e dobro, p.ex.) e note a alteração no comportamento do led. Qual sua conclusão?

Retorne o valor da capacitância para $1000\mu\text{F}$ e repita o processo anterior agora alterando a tensão da fonte de alimentação (metade e dobro, p.ex.). Qual a sua conclusão?

5.2 Equacionamento

O Quadro ilustrado na figura 3, apresenta os principais pontos do equacionamento de um circuito RC.

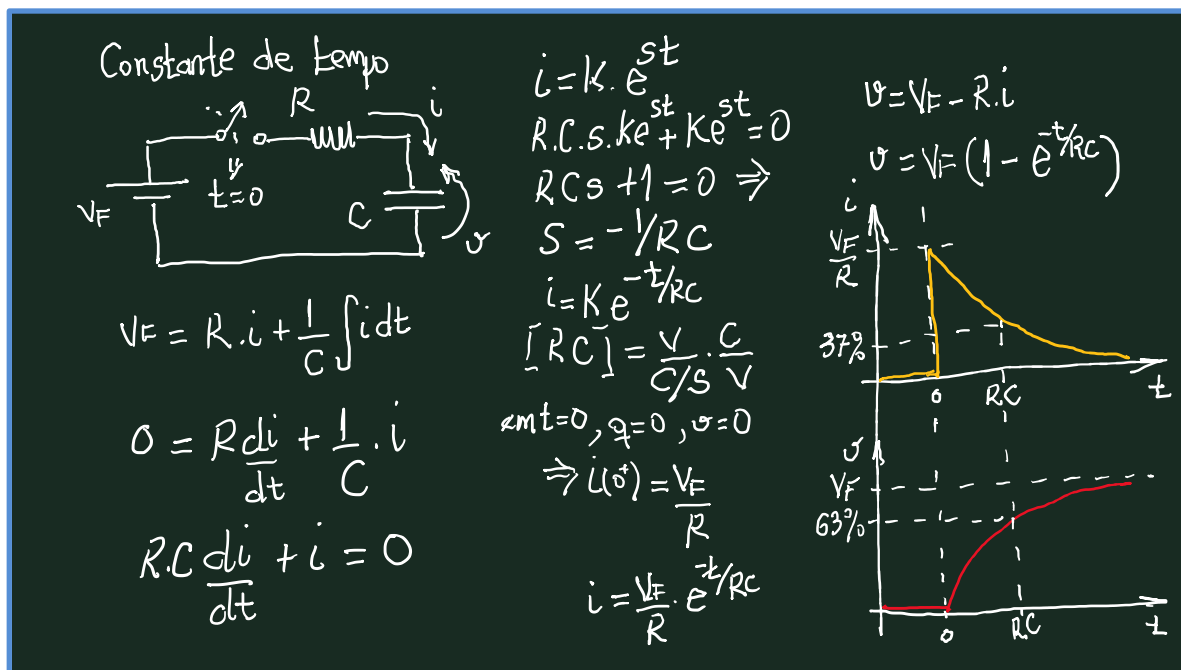


Figura 3 – Equacionamento Circuito RC

No circuito da figura 3 uma fonte de tensão (V_F) é conectada no instante $t=0$, por meio de uma chave, a um circuito RC (resistor + capacitor). O valor da tensão do capacitor no instante $t=0$ s é nula, isto é, $v_c(0)=0\text{V}$. A curva em amarelo ilustra a corrente de carga do capacitor, observa-se que no instante $t=0$ s, por ter-se $v_c(0)=0\text{V}$, toda tensão da fonte recai sobre o resistor e gera um pico de V_F/R [A].

³ Ao alterar o valor do capacitor você observará que também existe uma tensão de isolamento que caracteriza o componente, no circuito está ajustada para 50V, e corresponde à tensão máxima entre os terminais. Não há necessidade de alterar este valor caso você não trabalhe com mais de 50V.

Conforme o capacitor vai carregando, aumentando a tensão sobre ele, indicada pela curva em vermelho, tem-se uma diminuição da tensão sobre o resistor e consequentemente uma diminuição da corrente.

Equacionada a malha, fazendo-se uso da função característica do capacitor, e derivando-se a equação, tem-se uma EDO (Equação Diferencial Ordinária) que ao ser resolvida fornece o equacionamento para a corrente $i_c(t)$ e voltando a equação de malha tem-se a expressão da tensão $v_c(t)$.

$$i_c(t) = \frac{V_F}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$v_c(t) = V_F(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

Observa-se que o expoente $(-t/RC)$ tem necessariamente de ser adimensional, portanto RC tem por unidade segundo [s]. Dai chamar-se constante de tempo.

Pode-se comprovar pela análise dimensional:

$$[\Omega][F] = \frac{[V][C]}{[A][V]} = \frac{[V][C]}{\frac{[C]}{[s]}[V]} = [s]$$

Obtenha no **Tinkercad®** o circuito **ETE102-ConstantedeTempo** (figura 4).

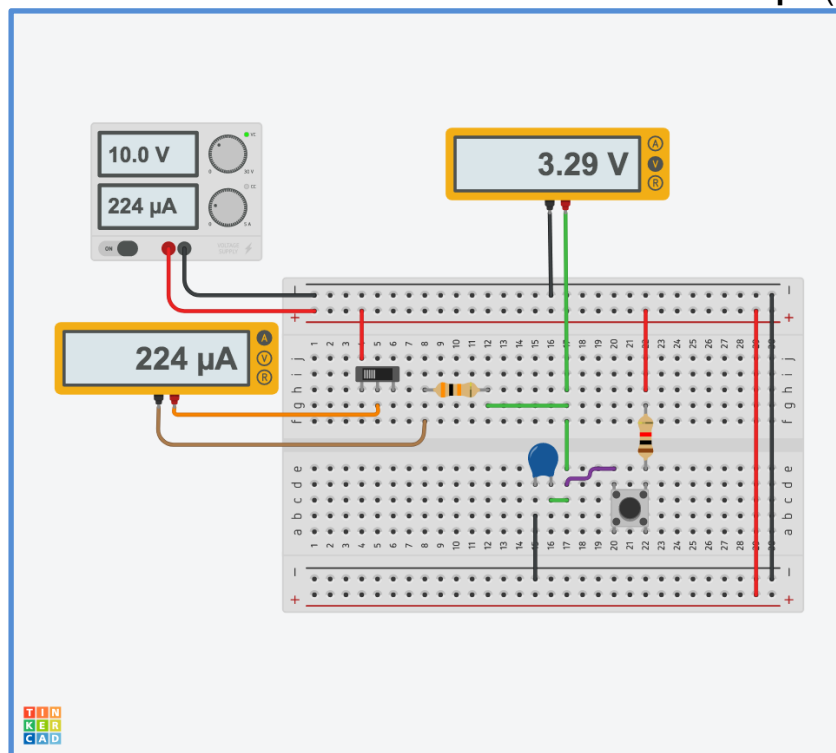


Figura 4 – Circuito ETE102-ConstantedeTempo

No circuito a fonte de alimentação está ajustada para 10V e ativando-se a simulação pode-se observar a carga (voltímetro) do capacitor pelo resistor de $30k\Omega$. Sendo o valor do capacitor de $1000\mu F$, a constante de tempo (RC) é de 30 segundos. A corrente também pode ser observada pelo amperímetro em série com o resistor de $30k\Omega$.

Observe o relógio que marca o tempo de simulação, parte superior (1), figura 5, e no instante que este marcar 30s (valor de uma constante de tempo - RC) mude a chave deslizante para a direita. Isto irá interromper a carga do capacitor e sua tensão permanecerá constante.

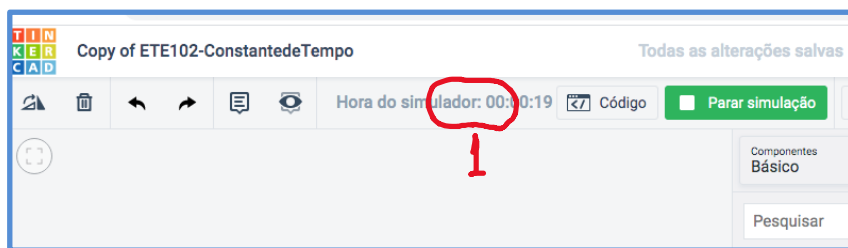


Figura 5 – Relógio de simulação

Como foi analisado no equacionamento (figura 3), em $t=RC$ teremos o capacitor com 63% da tensão da fonte. Qual o valor de tensão obtido por você? Para diminuir a incerteza da medida tire a média dos valores medidos pelos colegas da mesma bancada.

Concluída esta fase, desligue a simulação, elimine o fio vermelho que está conectando o terminal esquerdo da chave deslizante (terminal 1) ao positivo da fonte e coloque um fio preto conectando o terminal direito da chave deslizante (terminal 2) ao negativo da fonte. Ao religar a simulação, a chave deslizante terá voltado automaticamente para a posição esquerda. Mantenha pressionado o *push-button* – Botão identificado como Carga Rápida – para que por meio do resistor de $1k\Omega$ o capacitor seja rapidamente carregado. Quando a tensão atingir 10V solte o botão, aguarde o relógio de simulação iniciar um novo minuto e neste instante mude para a direita a posição da chave deslizante.

Agora o capacitor inicia sua descarga pelo resistor de $30k\Omega$, você poderá observar a queda gradativa da tensão e a inversão do sentido da corrente no amperímetro. No exato momento que o relógio indicar transcorridos 30s do início da descarga, mude a posição da chave deslizante para a esquerda, isto irá cessar o processo de descarga e você deverá, pelo equacionamento visto, ter a tensão do capacitor em 37% da tensão inicial (10V da fonte). Como no caso anterior, diminua a incerteza fazendo a média dos resultados obtidos pelos integrantes da bancada.

5.3 Circuito Oscilador com RC e porta lógica inversora ST

O Quadro da figura 6 apresenta o princípio de funcionamento do oscilador RC com porta inversora *Schmitt Trigger*.

O esquemático manuscrito na parte superior direita corresponde exatamente ao oscilador visto no último experimento, utilizando a primeira porta (terminais 1 e 2) do 74HC14.

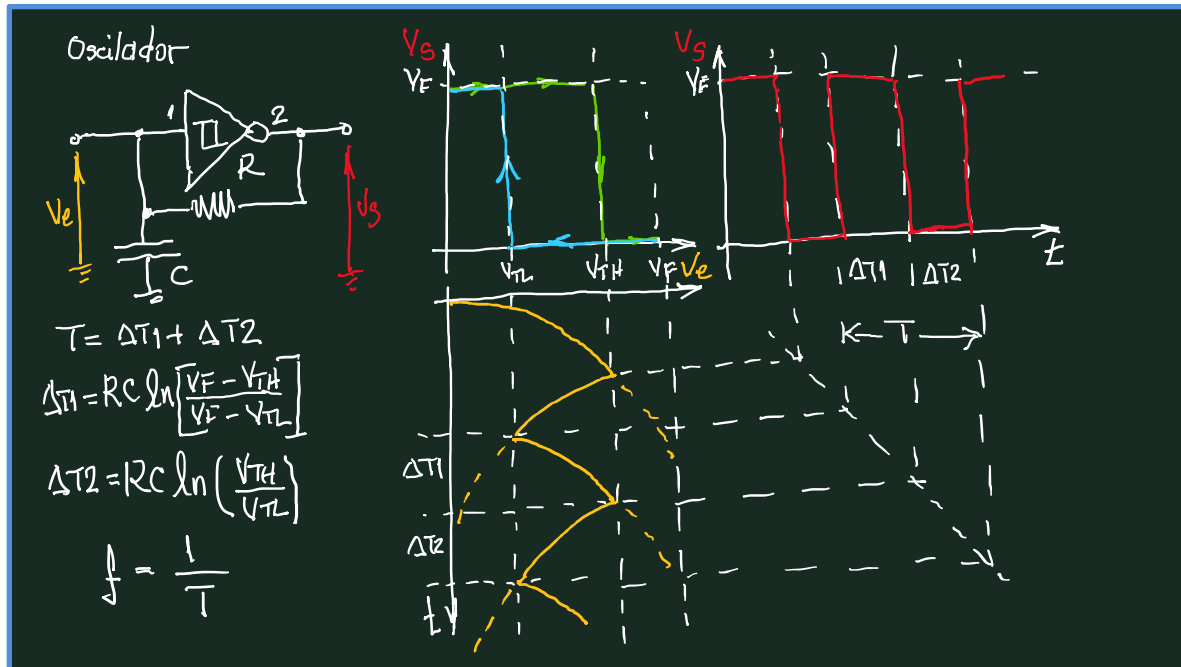


Figura 6 – Funcionamento do Oscilador RC

Uma vez que o circuito entra em operação, a carga e descarga do capacitor permanece, graças à **histerese** da entrada *Schmitt Trigger* da porta lógica inversora, entre o limite superior V_{TH} e o inferior V_{TL} (gráfico amarelo).

O tempo de carga ΔT_1 , ($V_{TL} \rightarrow V_{TH}$), e descarga ΔT_2 , ($V_{TH} \rightarrow V_{TL}$), do capacitor correspondem respectivamente aos tempos em HIGH e LOW da tensão (estado) de saída. Dependem da constante de tempo RC, que, portanto, irá determinar a frequência de oscilação.

$$f_{osc} = \frac{1}{\Delta T_1 + \Delta T_2} [Hz]$$

Para verificar o exposto, utilize do circuito **ETE102-CircuitoOsciladorRC**.

O circuito em questão aparece na figura 7. A fonte de alimentação foi ajustada para 5V de forma a alimentar corretamente o 74HC14. Juntamente com a primeira porta inversora do 74HC14, o resistor de 10kΩ e o capacitor de 110nF formam o oscilador esquematizado no quadro da figura 6.

O osciloscópio superior (fio laranja) permite visualizar o processo de carga e descarga do capacitor.

Para tornar mais lúdico o circuito, a saída foi conectada a um Piezo (*buzzer*), permitindo que se escute a frequência gerada.

A conexão da saída da porta lógica utilizada no oscilador diretamente ao *buzzer* iria sobrecarregar a porta, impedindo que esta impusesse os 5V de saída (já observamos isto no experimento anterior quando alimentamos leds com as portas lógicas) alterando os resultados esperados. A opção foi conectar a saída da primeira porta lógica, utilizada no oscilador, nas entradas das portas 2 (terminal 3) e 3 (terminal 5) fazendo com que estas, em paralelo, acionem o *buzzer* pelos terminais 4 e 6 do 74HC14. No osciloscópio inferior podemos observar a saída conjunta destas portas que acionam o *buzzer*.

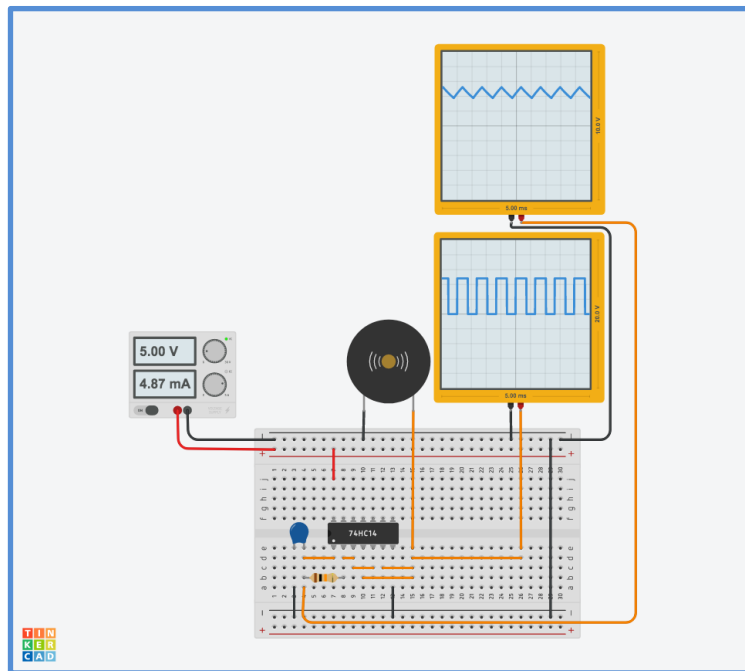


Figura 7 – Circuito ETE102-CircuitoOsciladorRC

Fazendo uso da escala horizontal do osciloscópio (0,5ms/divisão) estime a frequência de oscilação.

Altere o resistor de forma a verificar a alteração na frequência. Observe que frequência menores correspondem aos sons mais graves, enquanto frequências maiores geram sons mais agudos. Não altere demais o valor do resistor para que a oscilação permaneça na faixa de resposta do *buzzer*.

Para demonstrar como se obtém as expressões matemáticas teóricas de cálculo da frequência de oscilação, você pode consultar o Quadro da figura 8.

$$f_{osc} = \frac{1}{\Delta T_1 + \Delta T_2} = \frac{1}{RC \cdot \ln\left(\frac{V_F - V_{TL}}{V_F - V_{TH}}\right) + RC \cdot \ln\left(\frac{V_{TH}}{V_{TL}}\right)} = \frac{1}{RC \cdot \ln\left[\left(\frac{V_F - V_{TL}}{V_F - V_{TH}}\right) \cdot \left(\frac{V_{TH}}{V_{TL}}\right)\right]} [Hz]$$

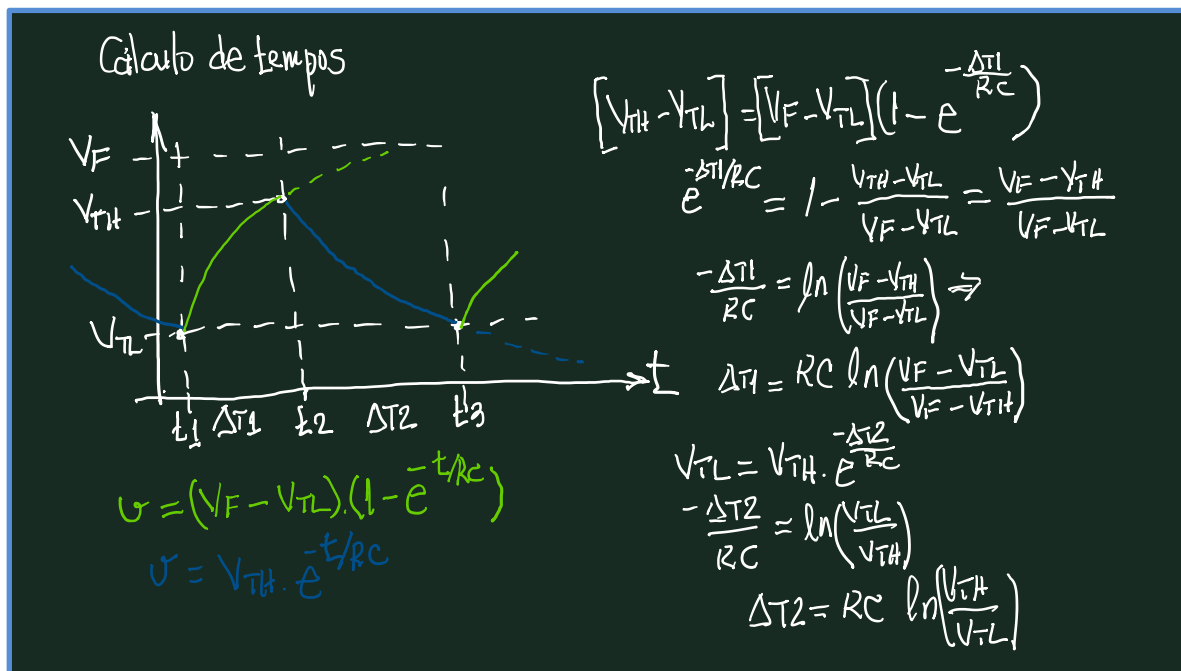


Figura 8 – Expressão matemática para cálculo da frequência

Para realizar a última passagem da equação matemática da página anterior basta lembrar que $\ln(A) + \ln(B) = \ln(A \cdot B)$.

Com os dados da aula anterior de V_{TH} e V_{TL} calcule a frequência de oscilação para o circuito da figura 7 ($R=10k\Omega$ e $C=110nF$). Qual frequência você obteve da conta?

$$f_{osc} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Hz}$$

6. Entrega: Postagem no Moodle

Todos os estudantes deverão postar no Moodle os pontos a seguir, mas os estudantes da mesma equipe postarão o mesmo material.

- Qual deve ser o valor do resistor no circuito do oscilador (figura 7) para que se escute a nota musical LA (440Hz)?;
- A forma de onda de saída do oscilador (figura 7) é simétrica? Isto é, o tempo em HIGH é igual ao tempo em LOW? Caso sua resposta seja não, dê sua justificativa.
- Faça um esboço (pode ser feito à mão) do esquema elétrico de uma proposta de circuito, tendo por base o circuito da figura 7, que faça uso de 7 botões (*push-button*) de modo que cada botão corresponda a uma das sete notas musicais⁴ (admita que somente um botão é pressionado por vez), poste a foto.

⁴ DO (262Hz), RE(294Hz), MI(330Hz), FA(349Hz), SOL(392Hz), LA(440Hz), SI(494Hz)