George Gigilas Junior – 216741

Trabalho 2- EE400

Um dos circuitos mais conhecidos é o circuito RC, composto por um resistor e um capacitor em série. Este circuito possui um comportamento interessante devido ao capacitor, responsável por armazenar parte da energia em campo elétrico. Podemos ver na Figura 1 um esquema mostrando um circuito RC, que possui uma entrada V_{in} e uma saída de tensão V_C, em cima do capacitor.

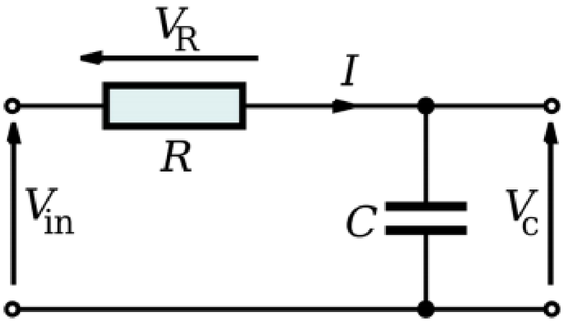

Figura 1 – Circuito RC

A partir da Lei de Kirchhoff das correntes, podemos equacionar o circuito igualando as correntes que passam pelo capacitor e pelo resistor. Para isso, é preciso saber como elas são calculadas. A corrente que passa pelo resistor [1] é calculada como segue na Equação 1. Já para o capacitor [2], podemos utilizar a Equação 2 para chegar na expressão da corrente como segue na Equação 3.

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_{in} - V_C}{R} \quad \text{Equação 1}$$

$$q(t) = C * V_C(t) \quad \text{Equação 2}$$

$$I_C = \frac{dq(t)}{dt} = C * \frac{dV_C(t)}{dt} \quad \text{Equação 3}$$

Agora, podemos igualar as expressões das correntes, visto que o resistor e o capacitor estão em série, ficando como segue na Equação 4.

$$I_C = C * \frac{dV_C(t)}{dt} = \frac{V_{in} - V_C}{R} = I_R \quad \text{Equação 4}$$

Podemos reescrever a Equação 4 como segue na Equação 5.

$$\frac{dV_C(t)}{dt} + \frac{V_C(t)}{RC} = \frac{V_{in}(t)}{RC} \quad \text{Equação 5}$$

Essa equação diferencial pode ser resolvida utilizando o conceito de fator integrante [3]. A teoria do cálculo diz que, dada uma equação diferencial escrita da forma $y' + a(x)y = b(x)$, podemos multiplicar seus termos por um fator integrante $\mu(x)$ de tal forma que ficamos com $\mu(x)\mathrm{y}' + \mu(x)a(x)y = \mu(x)b(x)$. Com isso, olhando apenas para os termos do lado esquerdo da equação, se $\mu(x)a(x) = \mu'(x)$, podemos simplificar $\mu(x)\mathrm{y}' + \mu(x)a(x)y = (\mu(x)\mathrm{y(x)})'$, pela regra da derivação do produto de duas funções. Com isso, temos uma equação resultante como segue na Equação 6, que pode ser resolvida por uma integração.

$$\left(\mu(x)\mathrm{y(x)}\right)' = \mu(x)b(x) \quad \text{Equação 6}$$

Para utilizar essa técnica, precisamos assumir que $\mu(x)a(x) = \mu'(x)$, e isso acontece se $\mu(x) = e^{\int a(x)dx}$.

Portanto, podemos resolver a Equação 5 utilizando esse conceito de fator integrante, pois a equação é da forma $y' + a(x)y = b(x)$. Podemos notar que y(x) = $V_C(t)$, que $a(x) = \frac{1}{RC}$ e que $b(x) = \frac{V_{in}(t)}{RC}$.

Para resolver a equação diferencial, primeiro calculei o fator integrante, como segue na Equação 7. Note que descartei a constante de integração, pois ela não interfere o resultado, já que ela multiplica todos os termos da equação.

$$\mu(t) = e^{\int a(t)dt} = e^{\int \frac{1}{RC}dt} = e^{\frac{t}{RC}} \quad \text{Equação 7}$$

Em seguida, a partir da Equação 6, ficamos com o que segue na Equação 8.

$$\frac{d(e^{\frac{t}{RC}} * V_C(t))}{dt} = e^{\frac{t}{RC}} * \frac{V_{in}(t)}{RC} \quad \text{Equação 8}$$

A partir da Equação 8, integrei dos dois lados da equação e obtive a Equação 9. Para simplificar os cálculos, assumi que $V_C(0) = 0$. Dessa forma, a constante de integração da integral do lado esquerdo é nula. Para não confundir a variável t que está sendo integrada com a variável t do limite de integração, chamei a variável de dentro da integral de x, integrando em dx.

$$\int d\left(e^{\frac{t}{RC}} * V_C(t)\right) = \int_0^t e^{\frac{x}{RC}} * \frac{V_{in}(x)}{RC} dx$$

$$e^{\frac{t}{RC}} * V_C(t) + C = \frac{1}{RC}\int_0^t e^{\frac{x}{RC}} * V_{in}(x)dx$$

$$e^{\frac{t}{RC}} * V_C(t) = \frac{1}{RC}\int_0^t e^{\frac{x}{RC}} * V_{in}(x)dx \quad \text{Equação 9}$$

Por fim, podemos isolar $e^{\frac{t}{RC}}$ obtendo uma expressão de $V_C(t)$ em função de $V_{in}(t)$, como segue na Equação 10.

$$V_C(t) = \frac{e^{\frac{-t}{RC}}}{RC}\int_0^t e^{\frac{x}{RC}} * V_{in}(x)dx \quad \text{Equação 10}$$

Vamos assumir, então, que $V_{in}(t) = e^{j\omega t}$, ou seja, que a onda de entrada é uma exponencial complexa de frequência de oscilação arbitrária ω. A partir da integral da Equação 10, podemos obter uma expressão fechada para $V_C(t)$, como segue na Equação 11.

$$V_C(t) = \frac{e^{\frac{-t}{RC}}}{RC} \int_0^t e^{\frac{x}{RC}} * e^{j\omega x} dx$$

$$V_C(t) = \frac{e^{\frac{-t}{RC}}}{RC} \int_0^t e^{x\left(j\omega + \frac{1}{RC}\right)} dx$$

$$V_C(t) = \frac{e^{\frac{-t}{RC}}}{RC} * \frac{1}{\left(j\omega + \frac{1}{RC}\right)} * \left(e^{t\left(j\omega + \frac{1}{RC}\right)} - 1\right)$$

$$V_C(t) = \frac{e^{\frac{-t}{RC}}}{RCj\omega + 1} * \left(e^{j\omega t} * e^{\frac{t}{RC}} - 1\right)$$

$$V_C(t) = \frac{e^{j\omega t}}{RCj\omega + 1} - \frac{e^{\frac{-t}{RC}}}{RCj\omega + 1} \qquad \text{Equação 11}$$

Podemos notar que a Equação 11 é composta por dois termos: um que oscila com velocidade angular ω (de forma similar a $V_{in}(t)$), e outro que decai exponencialmente (seguindo a função $e^{\frac{-t}{RC}}$). O primeiro corresponde ao que se chama resposta forçada do circuito, que é a resposta do circuito com a fonte de tensão ligada. Já o segundo corresponde à resposta homogênea do circuito, que é a resposta a partir das condições iniciais, sem fontes ligadas.

O modelo físico que descreve o comportamento do circuito diz que a resposta do circuito é a soma das respostas homogênea e forçada. Porém, para fim de estudos propostos neste trabalho, vamos analisar somente a resposta forçada, que fisicamente corresponde à resposta do circuito depois do decaimento da resposta homogênea. A partir desse raciocínio, escrevi uma nova expressão para $V_C(t)$, que corresponde à Equação 12.

$$V_C(t) = \frac{e^{j\omega t}}{RCj\omega + 1} \qquad \text{Equação 12}$$

A partir das expressões de $V_C(t)$ e de $V_{in}(t)$, podemos calcular o ganho do circuito, definido pela razão entre os módulos de $V_C(t)$ e de $V_{in}(t)$. Fixando valores para R e C, podemos calcular uma expressão para o ganho em função de ω. Fazendo isso, obtive o resultado expresso na Equação 13.

$$g(\omega) = \frac{\left|\frac{e^{j\omega t}}{RCj\omega + 1}\right|}{|e^{j\omega t}|} = \left|\frac{1}{RCj\omega + 1}\right| \qquad \text{Equação 13}$$

A partir do resultado da Equação 13, utilizei um programa em Python para plotar o ganho para diferentes valores de R e de C. Podemos ver o resultado na Figura 2.

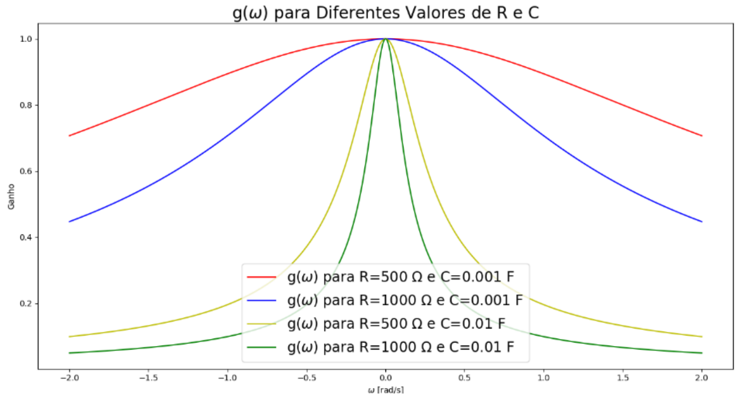

Figura 2 – g(ω) para diferentes valores de R e C.

Da Figura 2, podemos notar que, independentemente dos valores de R e de C, quanto maior o módulo de ω, menor é o ganho. Isso pode ser facilmente observado na Equação 13, em que R e C aparecem no denominador. Outro ponto importante é que, fixando um valor de C, quanto maior for R, menor é o ganho, como observado ao comparar as curvas azul e vermelha. Analogamente, fixando um valor de R, quanto maior for C, menor é o ganho, como pode ser observado pelas curvas vermelha e amarela.

De modo geral, para cada valor de ω, o que importa para o ganho é o valor do produto de R por C. Esse produto é inversamente proporcional ao ganho, pois RC aparece no denominador da expressão que o caracteriza (Equação 13).

Uma outra forma de analisar esse resultado é a partir de um Diagrama de Bode [4], que expressa a magnitude do ganho em um gráfico de escala logarítmica. Esse resultado pode ser visualizado na Figura 3.

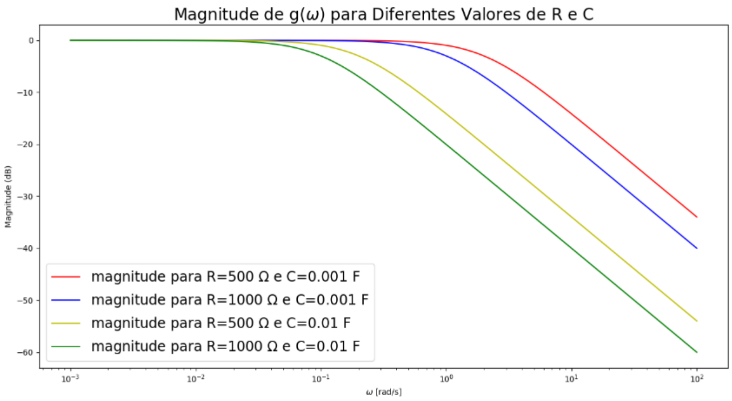

Figura 3 – Diagrama de Bode do circuito RC

Como podemos observar na Figura 3, para todos os valores do produto RC, existe um intervalo para o qual a magnitude do ganho é constante e próxima de 0. Como a magnitude é dada por $M = 20 * \log_{10}\frac{V_C}{V_{in}}$, esse valor 0 se dá porque $20 * \log_{10}\frac{V_C}{V_{in}} = 0$, o que só é possível se $\frac{V_C}{V_{in}} = 1$. Portanto, para baixas frequências, o ganho é unitário, ou seja, $V_C = V_{in}$.

Ainda da Figura 3, podemos notar que, quanto menor for o produto RC, maior é esse intervalo, como é o caso da curva vermelha. Esse diagrama nos mostra que, após um certo valor de frequência, a magnitude do ganho do circuito RC decai. Portanto, podemos concluir que o circuito RC funciona como um filtro passa-baixa, que permite a passagem de baixas frequências e atenua a passagem de altas frequências.

Vamos, agora, fazer uma análise de $V_C(t)$ para $V_{in}(t)$ sendo uma onda quadrada. Para tanto, para um período T qualquer, deduzi os coeficientes de Fourier para representar essa onda pela Série de Fourier. Escolhi a série de Fourier pois ela expressa muito bem funções periódicas e é válida para funções com descontinuidades, como é o caso.

Primeiramente, é importante ressaltar que a análise foi feita com base na forma de onda. Por esse motivo, utilizei uma onda quadrada com valores de tensão arbitrários. Sendo assim, escolhi uma onda que oscila entre 1V e 0V. Os coeficientes a_n foram obtidos a partir da Equação 14, o coeficiente a_0 (nível DC) foi obtido como segue na Equação 15 (valor médio de V_{in}) e a onda quadrada V_{in} é expressa como segue na Equação 16.

$$a_n = \frac{1}{\frac{T}{2}} * \oint V_{in}(t) * e^{-j\omega nt} dt \qquad \text{Equação 14}$$

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_0^T V_{in}(t)dt = \frac{1}{T}[\int_0^{\frac{T}{2}} 1dt + \int_{\frac{T}{2}}^{T} 0dt] = \frac{1}{T} * t|_0^{\frac{T}{2}}$$

$$= \frac{\frac{T}{2}}{T} = \frac{1}{2} \quad \text{Equação 15}$$

$$V_{in}(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n * e^{j\omega nt} \qquad \text{Equação 16}$$

A partir da Equação 14, calculei os coeficientes a_n e obtive uma expressão fechada para eles, como segue na Equação 17.

$$a_n = \frac{1}{\frac{T}{2}} * \oint V_{in}(t) * e^{-j\omega nt} dt$$

$$= \frac{2}{T} * [\int_0^{\frac{T}{2}} 1 * e^{-j\omega nt} dt + \int_{\frac{T}{2}}^{T} 0 * e^{-j\omega nt} dt]$$

$$= \frac{2}{T} * \int_0^{\frac{T}{2}} e^{-j\omega nt} dt = \frac{2}{T} * (\frac{-1}{j\omega n} * e^{-jn\omega t})|_0^{\frac{T}{2}}$$

$$= \frac{2}{T} * (\frac{1}{j\omega n} - \frac{1}{j\omega n} * e^{\frac{-jn\omega T}{2}})$$

$$a_n = \frac{2}{j\omega nT} * \left[1 - e^{\frac{-jn\omega T}{2}}\right] \qquad \text{Equação 17}$$

Por definição, sabemos que $\omega = \frac{2\pi}{T}$, portanto, $\omega * T = 2\pi$. A partir disso, podemos reescrever a Equação 17 como segue na Equação 18.

$$a_n = \frac{2}{jn2\pi} * \left[1 - e^{\frac{-jn2\pi}{2}}\right]$$

$$a_n = \frac{1}{jn\pi} * [1 - e^{-jn\pi}] \qquad \text{Equação 18}$$

Além disso, sabemos que é possível representar j por $e^{j\frac{\pi}{2}}$, já que $e^{j\frac{\pi}{2}} = \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) + jsen\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0 + j$ pela Relação de Euler. Utilizando essa representação, reescrevi a Equação 18 como segue na Equação 19.

$$a_n = \frac{e^{-j\frac{\pi}{2}}}{n\pi} * [1 - e^{-jn\pi}] \qquad \text{Equação 19}$$

A partir da Equação 19, da Equação 15 e da Equação 16, podemos escrever $V_{in}(t)$ contendo a expressão dos seus coeficientes. Essa representação fica como na Equação 20 e expressa a série de Fourier para uma onda quadrada que vai de 0V a 1V, com um período T qualquer.

$$V_{in}(t) = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-j\frac{\pi}{2}}}{n\pi} * [1 - e^{-jn\pi}] * e^{j\omega nt}$$

Equação 20

Agora que temos a onda quadrada, que é a entrada do circuito, nos resta obter a expressão para a saída do circuito a partir da Equação 10. Para facilitar os cálculos, calculei a resposta $V_C(t)$ do circuito para $n = 0$ (nível DC, cálculos detalhados na Equação 21) e calculei a reposta para um $n > 0$ genérico (cálculos detalhados na Equação 22), para juntar esses termos depois, na forma final de $V_C(t)$. Isso é possível por conta do princípio da linearidade, que diz que a resposta a uma entrada A+B é equivalente à soma da resposta da entrada A com a resposta da entrada B.

$$\text{Para n} = 0,\ V_C(t) = \frac{e^{\frac{-t}{RC}}}{RC}\int_0^t e^{\frac{x}{RC}} * V_{in}(x)dx$$

$$= \frac{e^{\frac{-t}{RC}}}{RC}\int_0^t e^{\frac{x}{RC}} * \frac{1}{2}dx$$

$$= \frac{1}{2} * \frac{e^{\frac{-t}{RC}}}{RC} * \frac{1}{\frac{1}{RC}}\left(e^{\frac{t}{RC}} - 1\right)$$

$$V_C(t) = \frac{1}{2} * \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}}\right) \qquad \text{Equação 21}$$

$$\text{Para n} > 0, \qquad V_C(t) = \frac{e^{\frac{-t}{RC}}}{RC}\int_0^t e^{\frac{x}{RC}} * V_{in}(x)dx$$

$$= \frac{e^{\frac{-t}{RC}}}{RC} \int_0^t e^{\frac{x}{RC}} * \frac{e^{-j\frac{\pi}{2}}}{n\pi} * [1 - e^{-jn\pi}] * e^{j\omega nx} dx$$

$$= \frac{e^{\frac{-t}{RC}}}{RC} * \frac{e^{-j\frac{\pi}{2}}}{n\pi} * [1 - e^{-jn\pi}] * \int_0^t e^{\frac{x}{RC}} * e^{j\omega nx} dx$$

$$= \frac{e^{-j\frac{\pi}{2}}}{n\pi} * [1 - e^{-jn\pi}] * \frac{e^{\frac{-t}{RC}}}{RC} \int_0^t e^{x(j\omega n + \frac{1}{RC})} dx$$

$$= \frac{e^{-j\frac{\pi}{2}}}{n\pi} [1 - e^{-jn\pi}] * \frac{e^{\frac{-t}{RC}}}{RC} \frac{1}{j\omega n + \frac{1}{RC}} (e^{t\left(j\omega n + \frac{1}{RC}\right)} - 1)$$

$$= \frac{e^{-j\frac{\pi}{2}}}{n\pi} [1 - e^{-jn\pi}] * \frac{e^{\frac{-t}{RC}}}{RCj\omega n + 1} (e^{t\left(j\omega n + \frac{1}{RC}\right)} - 1)$$

$$= \frac{e^{-j\frac{\pi}{2}}}{n\pi} [1 - e^{-jn\pi}] * \frac{\left(e^{j\omega nt} - e^{\frac{-t}{RC}}\right)}{RCj\omega n + 1} \quad \text{Equação 22}$$

Quanto à Equação 21, percebi que a saída $V_C(t)$ corresponde ao nível DC de entrada somado com um termo que decai com o tempo, proporcional a $e^{\frac{-t}{RC}}$. Assim como na Equação 11, o primeiro termo corresponde à resposta forçada do circuito, e o segundo corresponde à resposta homogênea do circuito. Assim como foi feito anteriormente, ignorei este termo que decai com o tempo, para analisar apenas a resposta forçada. Analogamente, a Equação 22 também apresenta um termo proporcional a $e^{\frac{-t}{RC}}$, que também foi desconsiderado. Com base nesse raciocínio, reescrevi a Equação 21 como segue na Equação 23, e a Equação 22 como na Equação 24.

$$\text{Para n } = 0,\ V_C(t) = \frac{1}{2} \quad \text{Equação 23}$$

$$\text{Para n } > 0,\ V_C(t) = \frac{e^{-j\frac{\pi}{2}}}{n\pi} [1 - e^{-jn\pi}] * \frac{e^{j\omega nt}}{RCj\omega n + 1}$$

Equação 24

Assim, após calculadas as respostas $V_C(t)$ do circuito para os diferentes valores de n, obtive uma resposta final $V_C(t)$ somando todas as n-ésimas respostas. Esse resultado está expresso na Equação 25.

$$V_C(t) = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-j\frac{\pi}{2}}}{n\pi} [1 - e^{-jn\pi}] * \frac{e^{j\omega nt}}{RCj\omega n + 1}$$

Equação 25

A partir da Equação 25, podemos analisar um resultado interessante. Quanto ao nível DC da onda de entrada, a saída possui o mesmo nível DC, sem alteração. Já para a componente AC da onda de entrada, a saída produzida é igual a $V_{in}(t) *$ ganho, o que está completamente dentro do esperado. Na verdade, até o nível DC de $V_C(t)$ corresponde ao nível DC de $V_{in}(t)$ multiplicado pelo ganho, pois, como a frequência de oscilação é nula (por ser corrente contínua), o ganho é $\frac{1}{|RCjn*0+1|} = 1$.

A série de Fourier, por definição, expressa uma onda periódica pela soma infinita de senos e cossenos, que oscilam proporcionalmente à frequência de oscilação fundamental ou às suas n-ésimas harmônicas. Para cada valor de n, a série de Fourier calcula seus coeficientes para um múltiplo da sua frequência de oscilação fundamental. Sendo assim, para cada valor de n, o ganho terá um valor diferente, porque este é calculado com base na frequência de oscilação de cada onda. Isso foi verificado matematicamente a partir da Equação 25, em que a frequência de oscilação ω aparece multiplicada por n.

Agora, com a expressão de $V_C(t)$ para $V_{in}(t)$ sendo uma onda quadrada qualquer, podemos estudar sua forma de onda. Inicialmente, precisamos definir seu período T, o qual eu defini como $\frac{1}{40\pi}$, arbitrariamente, de forma que a frequência seja de 40π Hz. Dessa forma, como $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $\omega = \frac{2\pi}{40\pi} = \frac{1}{20}$ rad/s. A partir disso, reescrevi a Equação 25 como segue na Equação 26.

$$V_C(t) = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-j\frac{\pi}{2}}}{n\pi} [1 - e^{-jn\pi}] * \frac{e^{\frac{jnt}{20}}}{\frac{RCjn}{20} + 1}$$

Equação 26

Com base na Equação 26, fiz um código em Python para analisar o gráfico de $V_C(t)$, para diferentes valores de R e C, que são os únicos parâmetros livres agora. Variando esses valores, obtive 4 formas diferentes de onda: quadrada, dente-de-serra, triangular e constante. Essas ondas correspondem às Figuras 4, 5, 6 e 7, respectivamente.

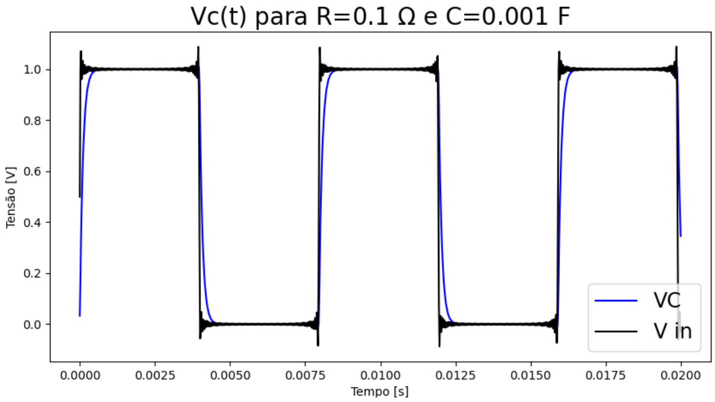

Figura 4 - $V_C(t)$ para R=0.1Ω e C=0.001F

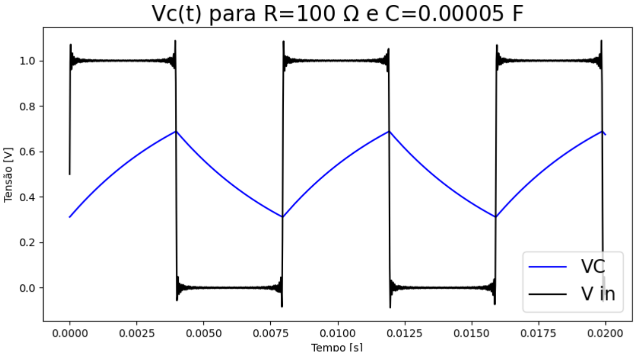

Figura 5 - $V_C(t)$ para R=100Ω e C=0.00005F

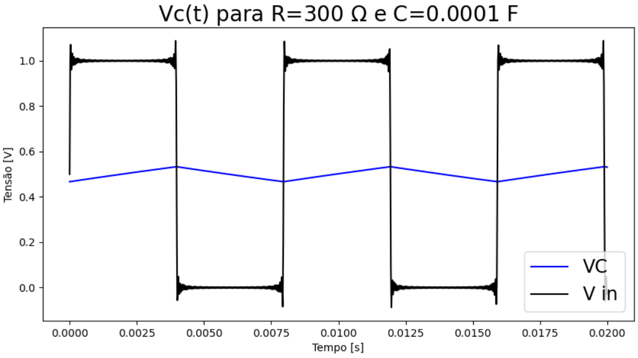

Figura 6 - $V_C(t)$ para R=300Ω e C=0.0001F

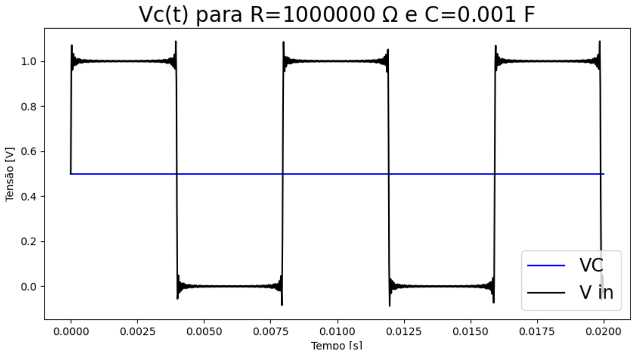

Figura 7 - $V_C(t)$ para R=1000000Ω e C=0.001F

A partir da Figura 4, podemos analisar que, para um valor pequeno do produto R*C, o ganho é praticamente unitário, já que o denominador de $\frac{1}{|RCj\omega n+1|}$ tende a 1. Para a resposta $V_C(t)$, nesse caso, acontece similar ao caso do nível DC, mas é o RC que é pequeno, e não a frequência de oscilação. Por esse motivo, $V_C(t)$ se assemelha à onda quadrada de entrada.

Já para a Figura 5, podemos interpretar fisicamente a onda dente-de-serra como uma análise do processo de carregamento e descarregamento do capacitor. Basicamente, quando há o pulso da onda quadrada, o capacitor carrega e acumula energia, sendo que seu carregamento é exponencial. Porém, o pulso é relativamente curto, não sendo suficiente para toda sua carga. Quando o pulso acaba, o capacitor passa a descarregar, também exponencialmente.

Quanto à Figura 6, podemos interpretá-la como um subcaso do fenômeno da Figura 5. Ainda podemos ver o processo de carga e descarga do capacitor. Porém, como a capacitância é maior, o capacitor demora mais para carregar. Por esse motivo, a onda demora mais para se estabilizar. Como ela é cortada rapidamente, a função exponencial foi truncada no começo, em que ela pode ser aproximada por uma reta. Por esse motivo, a onda parece triangular.

Por fim, para a Figura 7, podemos interpretá-la fisicamente como um circuito que dissipa a maior parte da tensão no resistor. Pelo alto valor de resistência, isso fica fácil de confirmar. Dessa forma, a componente AC da onda de entrada é dissipada e resta apenas a componente DC que, como calculada anteriormente, independe de R e de C.

Depois todas essas interpretações físicas, podemos interpretar esses resultados sob uma ótica da área de filtros. Como visto anteriormente, o circuito RC funciona como um filtro passa-baixa. Logo, ondas com altas frequências são atenuadas. Apesar de a frequência ser a mesma para as 4 figuras geradas, o valor do produto RC desloca a frequência de corte, que é definida como a frequência em que o filtro atenua a potência do sinal pela metade. A frequência de corte [5] é dada por $\omega_C = \frac{1}{RC}$, que é inversamente proporcional ao produto RC. Isso explica o fato de a onda da Figura 7 permitir a passagem apenas do nível DC, enquanto a onda da Figura 4 permite a passagem de grande parte das componentes AC (a ponto de ainda ser uma onda quadrada).

Para confirmar esses resultados, utilizei um site online que realiza simulações de circuitos elétricos [6]. Nas simulações, utilizei os mesmos valores dos componentes elétricos e a mesma onda quadrada que utilizei para a geração das ondas das Figuras 4, 5, 6 e 7. Os resultados estão nas Figura 8, 9, 10 e 11, na ordem correspondente das formas das ondas das figuras anteriores.

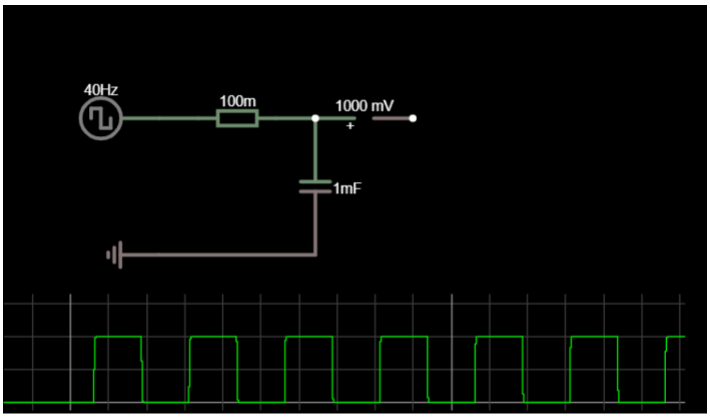

Figura 8 – Simulação do circuito RC com onda de saída quadrada.

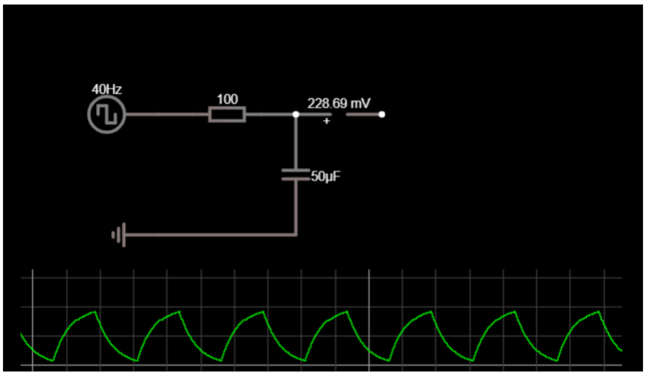

Figura 9 – Simulação do circuito RC com onda de saída dente-de-serra.

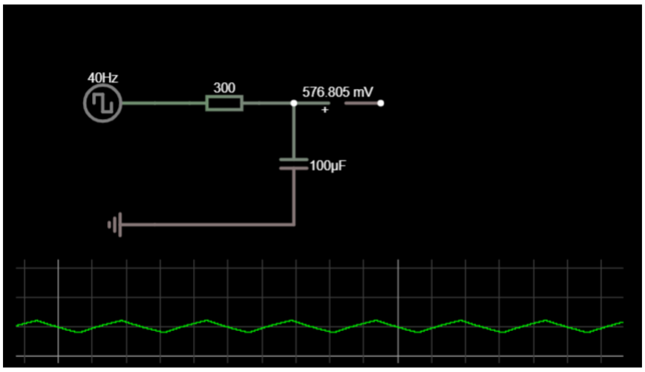

Figura 10 – Simulação do circuito RC com onda de saída triangular.

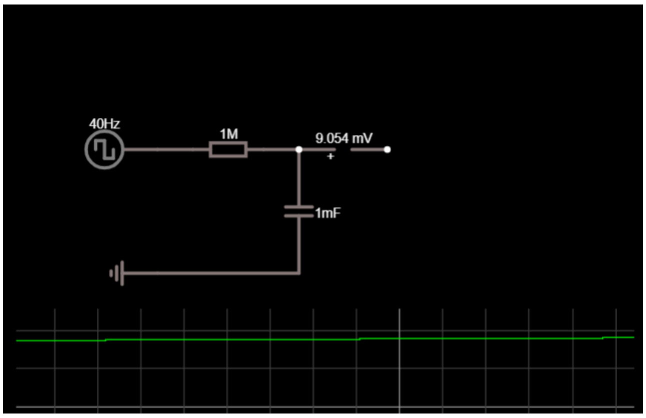

Figura 11 – Simulação do circuito RC com onda de saída constante.

Analisando as Figuras 8, 9, 10 e 11, podemos confirmar os resultados obtidos ilustrados nas Figuras 4, 5, 6 e 7. As formas de onda da simulação foram as mesmas dos gráficos gerados a partir da teoria, ambas produziram ondas de saída praticamente iguais. Sendo assim, podemos concluir que a simulação corrobora a teoria desenvolvida.

Com base no que foi discorrido até aqui, foi possível concluir que o circuito RC apresenta uma saída $V_C(t)$ que equivale a $V_{in}(t)$ multiplicado pelo ganho, que pode ser obtido pela fórmula $\frac{1}{|RCj\omega+1|}$. Com base nesse ganho, foi possível observarmos características importantes sobre esse circuito: o seu funcionamento como filtro passa-baixa, o ganho unitário para entradas DC e a atuação do ganho para entradas AC. Por fim, também observamos que a fórmula do ganho faz com que a onda de saída $V_C(t)$ possa assumir forma quadrada, dente-de-serra, triangular ou constante, dependendo do valor do ganho (que pode ser alterado a partir dos valores de R e de C), o que foi confirmado a partir das simulações.

Referências

[1] Disponível em Lei de Ohm - Tensão, corrente e resistência elétrica - Embarcados, acesso em 29/06/2021

[2] Disponível em Equação i-v do capacitor em ação (artigo) | Khan Academy, acesso em 29/06/2021

[3] Disponível em http://www.ime.unicamp.br/~valle/Teaching/MA311/Aula01.pdf, por Marcos Eduardo Valle e Roberto de Almeida Prado. Acesso em 29/06/2021

[4] Disponível em https://en.wikipedia.org/wiki/Bode_plot. Acesso em 29/06/2021

[5] Disponível em https://caxias.ufrj.br/images/Lab_Didatico/Fisica/FISEXP_3/Exp_7-Circuitos_RC_e_filtros_de_frequencia.pdf. Acesso em 29/06/2021

[6] Disponível em Circuit Simulator Applet (falstad.com), acesso em 29/06/2021

Link do circuito simulado: https://tinyurl.com/yervnm34