Grupo de Electrónica e Instrumentação

Dep. de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

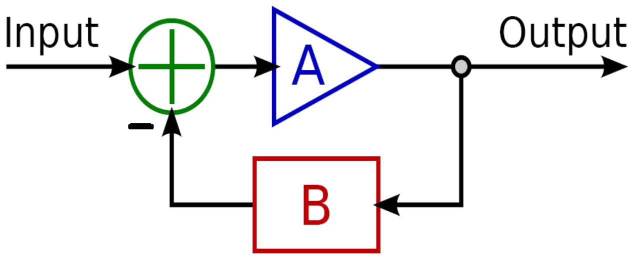
Aplicações do modelo do sistema realimentado

O modelo do sistema realimentado ("feedback model") apresenta uma série de vantagens (dessensibilização a variações no ganho directo *A*, redução do efeito das não linearidades em *A*, redução do ruído,...) quando comparado com o modelo sem realimentação ("feedforward model") e estabelece uma base teórica simples para a explicação do funcionamento e para o estudo dos osciladores sinusoidais. Nesta aula vai ser visada essa categoria de osciladores. Adicionalmente será construído um circuito electrónico que simula um sistema de controlo neuro-muscular discutido na aula.

Modelo do sistema realimentado

O diagrama de blocos do sistema realimentado clássico é mostrado na figura seguinte. A sua função de transferência, ou ***equação da realimentação***, é:

$$G(s)=\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{A}{1+AB}$$



onde *U(s)* e *Y(s)* são, respectivamente, a entrada e a saída do sistema. Eventualmente, *A* e *B* também serão dependentes da frequência. Nos osciladores, pelo menos um deles tem de o ser – e na maioria dos casos isso acontece com *B=B(s)*.

A condição de oscilação, também denominada de **critério de Barkhausen**, já discutida nas aulas, consiste no anulamento do denominador *1+AB* da equação da realimentação. Definindo o ***ganho de retorno*** como *T=AB*, a condição de oscilação resume-se a duas condições no espaço real: $|T|=1$ e $ang(T)=+180$ (ou -180).

Quando os osciladores sinusoidais são implementados com ampops e se pretende fazer a sua análise, é comum "partir" o anel de realimentação na saída do ampop, uma vez que a baixa impedância de saída deste componente permite fazê-lo sem alterar significativamente as condições de carga. (**Atenção**: na prática não é possível medir directamente T=AB quando há ampops em malha aberta, pois o elevado ganho satura-os, por muito pequenas que sejam as tensões de teste utilizadas. Isso não acontece se o ampop estiver embebido em ampilificadores inversores ou não inversores, como acontece nos osciladores estudados.)

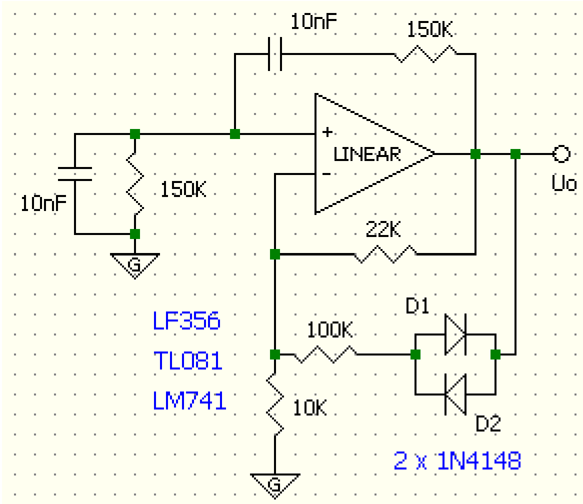
Recorde que a condição de oscilação requer habitualmente que, na frequência de oscilação, o ganho do bloco amplificador *(A)* seja superior a um determinado valor. Esta condição é verificada com os valores de resistência indicados nas figuras e presumindo os ampops ideias. No entanto, as tolerâncias dos componentes poderão impedir o início da oscilação no laboratório. Se isto acontecer altere o valor das resistências para aumentar ligeiramente o ganho.

Nos osciladores aqui estudados A é real e independente da frequência enquanto que B(jω) depende da frequência complexa, $s=j\omega$. Assim, o amplificador A apenas compensa a atenuação sofrida na malha *B(s)*, malha esta que provoca a desfasagem.

Nos circuitos aqui apresentados poderá alterar o valor das resistências e dos condensadores que definem a frequência de oscilação, desde que esta não exceda alguns (poucos...) Khz, principalmente se usar o ampop LM741. Nos osciladores que vai construir tente usar um bom ampop (TL081 ou LF356). Caso não seja possível, use um LM741. Alimente-os com +15 Volt e com -15 Volt, como é habitual.

Oscilador de Wien

O oscilador sinusoidal mais popular é o **oscilador de Wien**, assim denominado devido à sua semelhança com a ponte de Wien (uma ponte de quatro braços usada na medida de condensadores). Este oscilador é mostrado na figura seguinte, numa configuração prática.



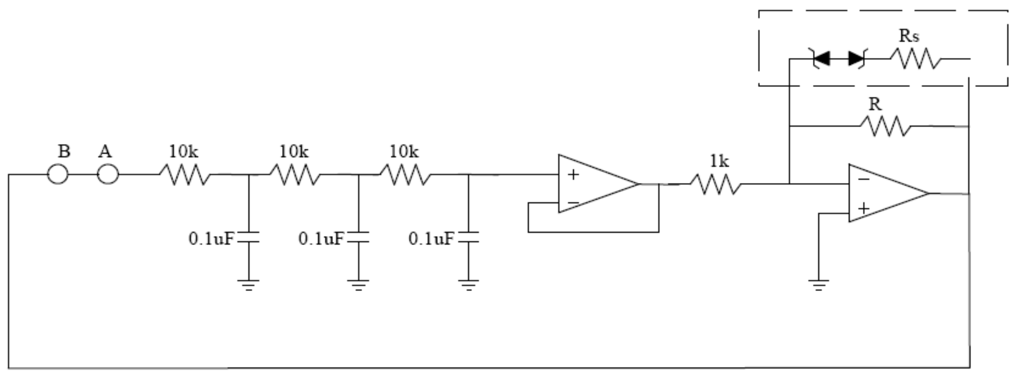
A resistência de 100K com os díodos em anti-paralelo, arranjo que corresponde globalmente a uma resistência não linear, servem para estabilizar a amplitude de oscilação. A frequência de oscilação é $f_{osc} = 1/(2\pi RC)$ onde R e C valem 150 KOhm e 10 nF respectivamente (observe a figura). Para que exista oscilação o ganho do amplificador tem de ser superior a 3 (se desprezar a malha não linear esse ganho é 3.2 no presente circuito). O seu professor discutirá qualitativamente o mecanismo de controlo da amplitude da oscilação.

Construa o oscilador e compare a saída *Uo* com e sem a malha não linear de estabilização, atrás referida, colocada no circuito. Use a operação FFT do osciloscópio para avaliar a distorção em cada um destes casos (veja a nota sobre distorção no final do texto).

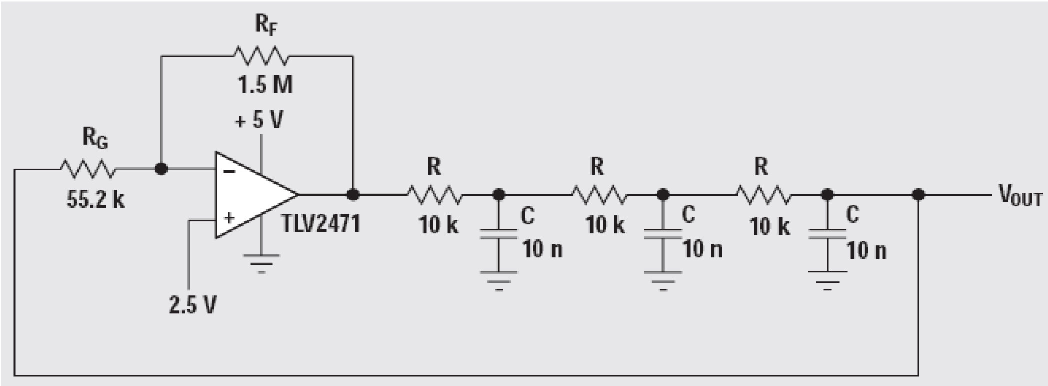
Oscilador por desvio de fase ("phase shift oscilator")

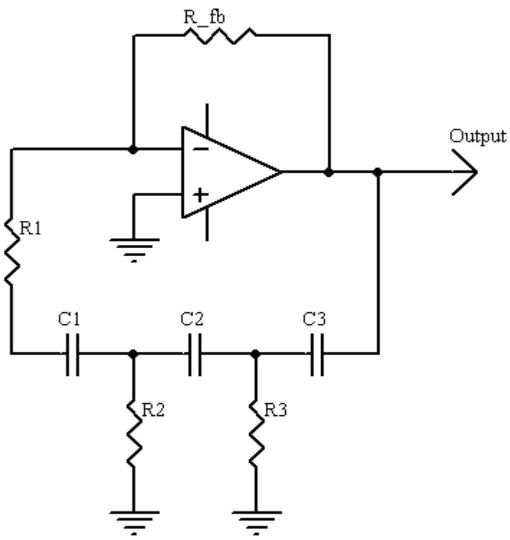
Neste oscilador é utilizada uma cascata de três circuitos RC, passa-baixo ou passa-alto, para criar a desfasagem de +180º ou -180º. Algumas variantes do oscilador por desvio de fase são mostradas nas figuras. As duas primeiras são passa-baixo, a última é do tipo passa-alto.

O primeiro circuito usa um elemento não linear de controlo da amplitude das oscilações consistindo em dois díodos de Zener, em ligação anti-série, em série com uma resistência *Rs*.



No oscilador por desvio de fase são também definidas condições de oscilação. O módulo do ganho do amplificador tem de ser superior a 29. A frequência de oscilação, *fosc,* é dada pela expressão *fosc = sqrt(6)/(2π RC)* quando a malha é passa-baixo. No caso passa-alto, a expressão é *fosc =1/(sqrt(6) 2π RC).* Os cálculos das condições de oscilação são um pouco mais morosos do que os do oscilador de Wien, mas não são impossíveis...





Construa um dos osciladores deste tipo à sua escolha e registe a frequência de oscilação. Manipulando o ganho do bloco de amplificação tente confirmar as condições de oscilação. Note que, quando a distorção harmónica é elevada a frequência de oscilação real afasta-se do valor teórico previsto.

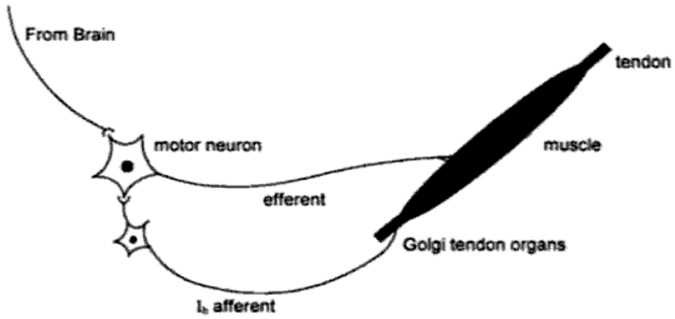
Simulação do controlo neuro-muscular

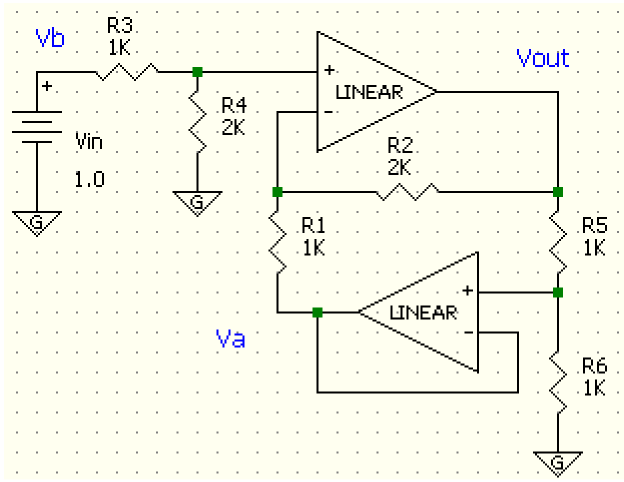
Na aula foi discutido um modelo de realimentação biomédico que representa o controlo de um músculo através do sistema nervoso. O diagrama fisiológico, o respectivo modelo com realimentação e o circuito com dois ampops que o implementa são mostrados nas figuras.

Verifique que *Va=Vout/2* e que *Vout=2(Vb-Va)* naquele circuito, implementando assim o diagrama de blocos do sistema de controlo muscular com *Gc=2* e *H=0.5*. Com estes valores, o ganho em malha fechada é igual a 1, i.e., *Go=1*, como pode verificar também fazendo as medições no circuito após tê-lo construído.

Embora as resistências mostradas sejam de 1K e de 2K, pode construir um circuito exactamente equivalente se garantir que, com quaisquer valores de resistência, sejam verificadas as igualdades R5=R6, R3=R1 e R4=R2=2*R1.

Diminua o ganho directo *Gc* em cerca de 10% (o que pode fazer pondo simultaneamente em paralelo com R4 e R2 resistências que valham 9 vezes o seu valor, 18K neste caso.) Verifique que o ganho total do sistema variou menos do que 10% devido à dessensibilização a variações no ganho directo *Gc* que o sistema com realimentação proporciona.





Figuras relacionadas com a modelação do controlo muscular.

Distorção harmónica nos geradores (THD)

Uma das qualidades pretendidas nos geradores sinusoidais é a “pureza” das sinusóides. Pode ser feita uma avaliação quantitativa deste parâmetro realizando a FFT dos sinais, o que é possível com os osciloscópios do laboratório. Desta forma, pode ser lida a relação, em dBs, entre as amplitudes da frequência fundamental e de algumas das suas harmónicas, o que permite calcular a ***THD*** (sigla de “Total Harmonic Distortion”) do sinal. Os blocos não lineares utilizados para limitar a amplitude das oscilações têm, também, a função adicional de promover a diminuição da THD do sinal relativamente ao caso em que é a saturação dos ampops que limita “à bruta” essa amplitude.

Um sinal periódico “bem comportado” (todos os sinais práticos o são), com período *T,* pode ser expresso como uma ***Série de Fourier***

$$v(t) = Vo + \sum_{k=1}^{oo} Vk \cos(k\, wo\, t + pk)$$

onde *wo=2π/T* é a frequência fundamental e *pk* é a desfasagem (ou fase) associada à harmónica de índice *k* (as harmónicas são as frequências múltiplas da fundamental). Esta série pode ser calculada teoricamente para muitos sinais (onda triangular, onda quadrada, etc...) e no laboratório as amplitudes das harmónicas podem ser medidas com instrumentos adequados.

A partir da descrição do sinal pela sua Série de Fourier, define-se a distorção harmónica *THD* como (esta relação baseia-se na potência das harmónicas, mas alguns autores definem a THD como a raiz quadrada da que é aqui especificada):

$$THD = \frac{V_2^2 + V_3^2 + \ldots + V_N^2}{V_1^2}$$

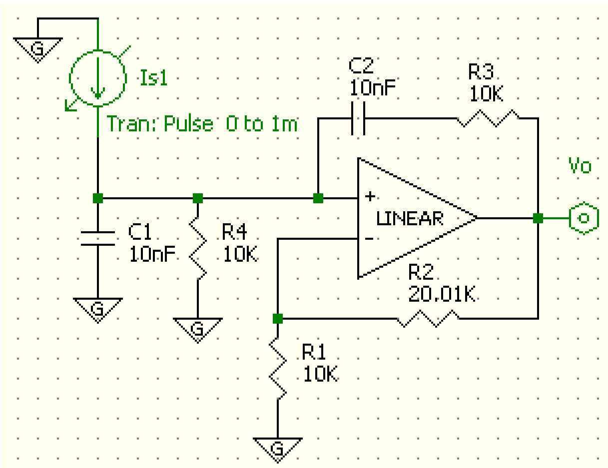
onde *N* é o índice mais elevado das harmónicas medidas e as amplitudes das harmónicas, *Vk*, são escritas numa escala linear e não em dB. A *THD* é habitualmente especificada como uma percentagem. Uma sinusóide pura não tem harmónicas, pelo que a sua THD é 0%.

Note que o valor médio do sinal, *Vo*, não é levado em conta na THD visto que pode na prática ser removido por um filtro passa-baixo.

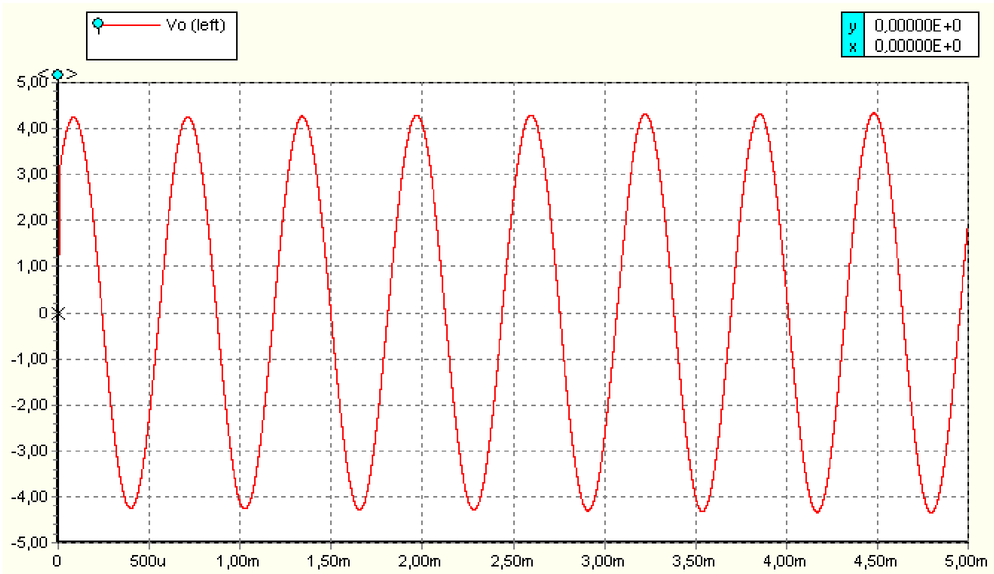
Simulação de osciladores no Spice

Como pode inferir das anteriores figuras, nos osciladores não existe um sinal de entrada. Sendo assim, como é possível simulá-los?

O truque está em introduzir no circuito um gerador independente de tensão ou de corrente que emite um impulso muito breve, da ordem de 1/10 do período de oscilação previsto ou inferior, por exemplo, e que assim simula o “ruído” que na prática faz arrancar a oscilação. As características concretas deste gerador não são muito determinantes no resultado.

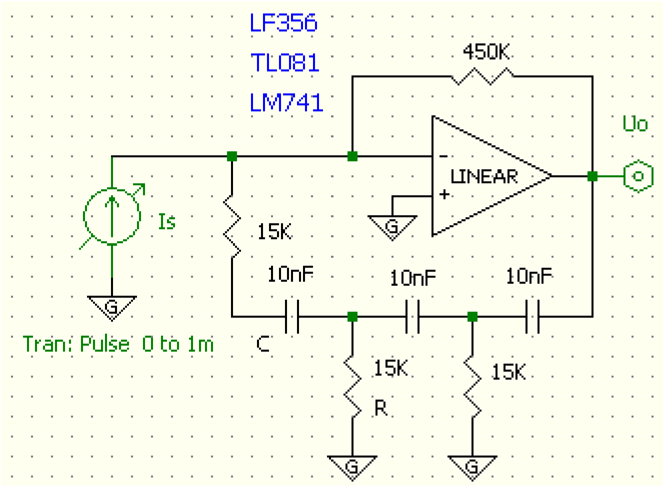


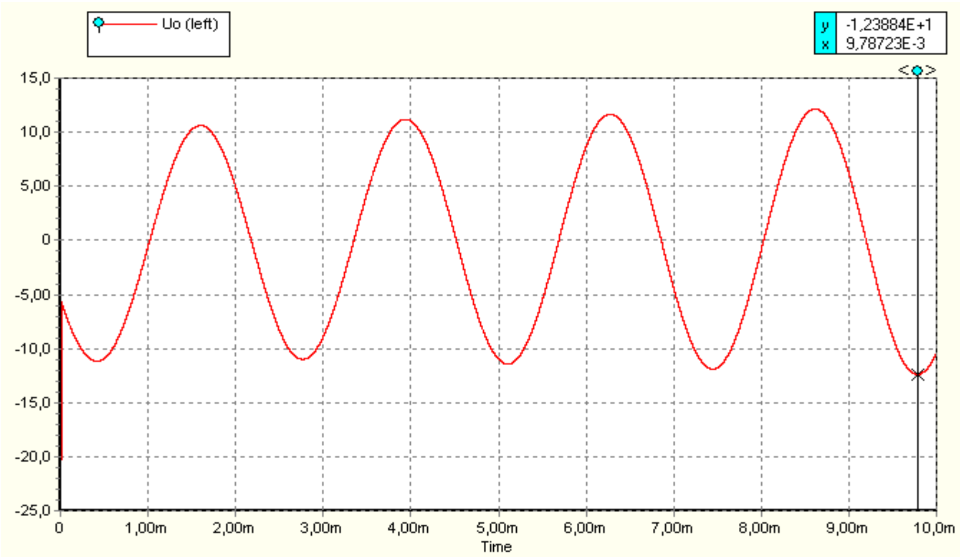
Nesta figura mostra-se o modelo de simulação do oscilador de Wien. Note que R2 é apenas ligeiramente maior do que 2*R1 para satisfazer a condição de oscilação. A fonte *Is1* arranca a simulação com um impulso de 1 mA com duração de 10 us. O resultado é aquele que se mostra abaixo. Quanto mais a relação entre R2 e R1 for superior a 2, mais rapidamente aumenta a amplitude do sinal; se a relação for inferior a 2, a amplitude vai decrescendo exponencialmente. Neste exemplo a relação entre as resistências está quase no limite.



É utilizado o modo de simulação TRAN (de transiente) em que o simulador resolve numericamente o sistema de equações diferenciais que rege o circuito. A simulação durou 5 ms. Pode observar, também por simulação, a variação da amplitude da oscilação com a relação entre R1 e R2 alterando o valor de uma delas e, assim, confirmar o que foi dito.

Abaixo é ilustrada a simulação do gerador por desvio de fase.





A partir do gráfico da simulação do oscilador por desvio de fase calcula-se *fosc=427 Hz*, enquanto que, com aqueles valores de componentes, pela fórmula teórica obtém-se *2π fosc =1/(sqrt(6)RC)=433 Hz.* O erro em que se incorre é pois cerca de 1%.

O mesmo pode ser dito sobre o erro associado à frequência de oscilação no oscilador de Wien anteriormente discutido. Confirme.

Finalmente, chama-se a atenção para que o gerador de arranque das oslilações pode ser de corrente ou de tensão. Em ambos os casos, a sua introdução não pode alterar a estrutura do circuito. Para isso têm que ser satisfeitas as seguintes regras:

- Se for um gerador de corrente, deverá *estar ligado entre a massa e um qualquer nó* do circuito;
- Se for um gerador de tensão deverá ser *colocado em série* com qualquer componente do circuito (de preferência com resistências ou condensadores)

Além do mais o gerador deverá impôr um impulso de curta duração, após o qual passará a valer zero, "saindo" definitivamente do circuito.