

FUNCIONS I SISTEMES ELECTRÒNICS

Pràctica 5

**Simulació i muntatge d'un filtre
actiu realimentat i un oscil·lador**

Novembre 2023

Juan A. Chávez, Antoni Turó

Objectiu de la pràctica

En aquesta pràctica observarem com la realimentació pot convertir un filtre passabanda RC passiu amb pols reals en un filtre més selectiu amb pols complexes conjugats. A continuació, amb el grau de realimentació adequada, el mateix circuit realimentat pot convertir-se en un oscil·lador quan els pols complexes conjugats es situen sobre l'eix imaginari.

El circuit realimentat que estudiarem és el de la Figura 1. El filtre passabanda RC passiu, format per la xarxa amb les resistències R_1 i R_2 i els condensadors C_1 i C_2 , s'inclou en un llaç de realimentació de l'amplificador operacional, convertint el circuit en un filtre passabanda actiu, però més selectiu.

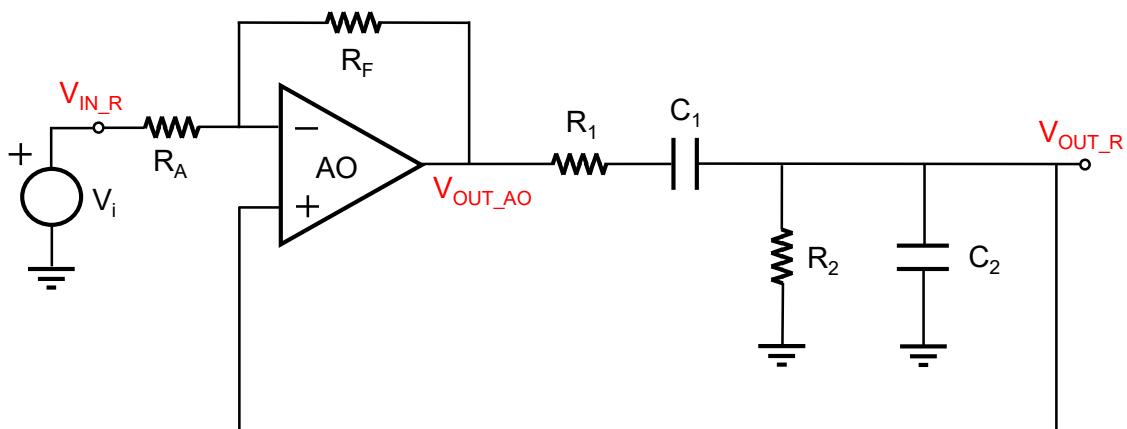


Figura 1. Circuit realimentat estudiat en la pràctica.

Organització de la pràctica

La pràctica es desenvoluparà amb un **treball previ que heu de fer a casa** i una part experimental d'una durada de dues sessions al laboratori. Abans del començament de la primera sessió de laboratori haureu d'entregar una còpia amb les respostes referides a l'estudi previ.

La **primera sessió** de laboratori es dedicarà a la **simulació amb PSPICE** del circuit. Primer, fent-lo funcionar com a filtre passabanda i, després, canviant la quantitat de realimentació per fer-lo inestable, i que funcioni com a oscil·lador. En la **segona sessió** es realitzarà el **muntatge** d'aquest circuit per comprovar experimentalment el comportament vist, tant en la seva anàlisi teòrica, com en les simulacions.

Per realitzar el muntatge del circuit d'aquesta pràctica es necessiten tots els components electrònics que disposeu fins aquest moment, a més dels components de la llista següent que també us subministrarem:

QUANTITAT	COMPONENT
1	AMPLIFICADOR OPERACIONAL TL071IP
2	DIODES 1N4148
2	CONDENSADORS POLIÉSTER MKT 63V 10nF
1	POTENCIÓMETRE PT-15V 25kΩ
1	POTENCIÓMETRE PT-15V 50kΩ
2	RESISTÈNCIES 5% 1/4W de 16kΩ

ESTUDI PREVI

L'estudi previ consisteix en l'anàlisi, primer del filtre passiu RC i, després, del filtre actiu realimentat. L'anàlisi d'aquest darrer circuit realimentat ha de conduir a trobar les condicions que faran que es comporte com a filtre passabanda, o bé, com a oscil·lador.

1. Anàlisi del filtre passabanda passiu RC

El primer pas és analitzar, en el domini de Laplace, el filtre passabanda RC de la Figura 2 per trobar la funció de transferència $H(s) = V_{OUT}(s)/V_{IN}(s)$.

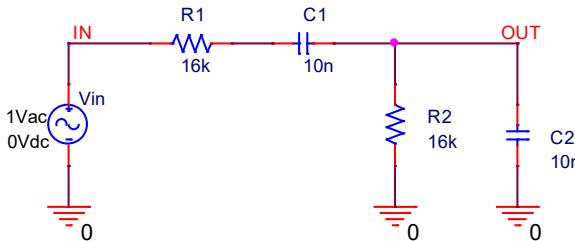


Figura 2. Filtre RC passabanda.

Qüestió EP1: Quina és la funció de transferència del circuit definida com $H(s) = V_{OUT} / V_{IN}$ considerant $R_1 = R_2 = R$ i $C_1 = C_2 = C$?

La funció de transferència del filtre té un zero en l'origen i dos pols i pot identificar-se amb l'expressió canònica següent:

$$H(s) = \frac{A \cdot \omega_o \cdot s}{s^2 + \frac{\omega_o}{Q}s + \omega_o^2} \quad (\text{Equació 1})$$

On A és una constant, Q és el factor de qualitat i ω_o és la freqüència angular central del filtre.

Qüestió EP2: Expresseu els valors A, ω_o , i Q de la funció de transferència en funció dels components del circuit.

Qüestió EP3: Trobeu els dos pols d'aquest circuit i calculeu el valor del mòdul de la resposta freqüencial a la freqüència angular central ω_o .

Qüestió EP4: Quins són els valors d'A, Q i la freqüència central f_o quan les dues resistències tenen un valor de $R = 16 \text{ k}\Omega$ i els condensadors de $C = 10 \text{ nF}$?

2. Anàlisi del filtre actiu realimentat

El filtre passabanda passiu anterior es converteix en un filtre passabanda actiu mitjançant la realimentació d'un amplificador operacional (AO) tal com es mostra en la Figura 3.

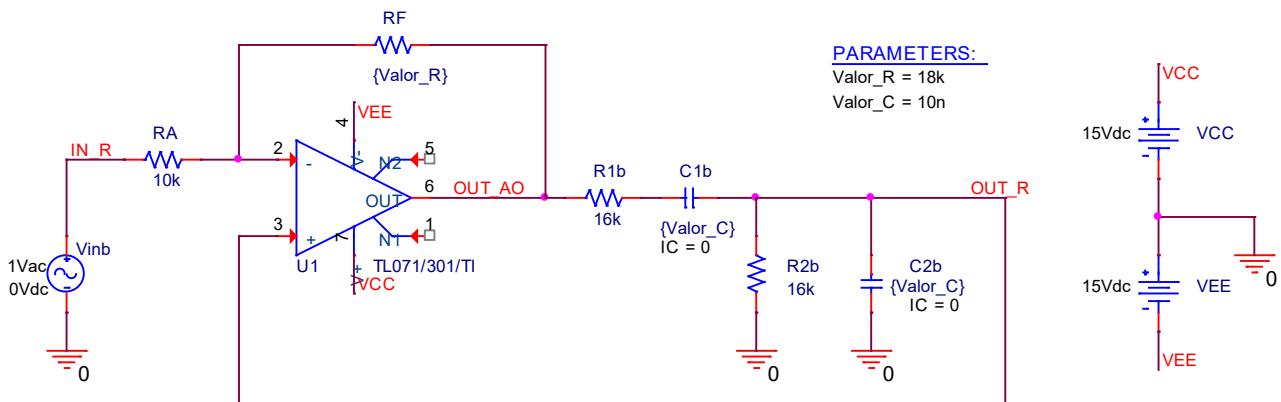


Figura 3. Filtre passabanda actiu basat en un amplificador realimentat.

L'estudi del filtre passabanda actiu basat en aquest amplificador realimentat pot fer-se utilitzant el següent diagrama de flux, on $H(s)$ és la funció de transferència del filtre passiu RC de la secció anterior.

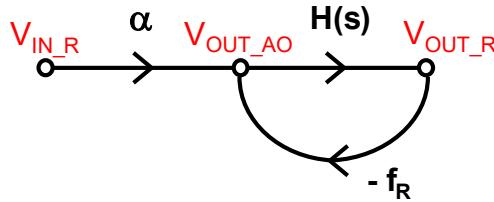


Figura 4. Diagrama de flux de l'amplificador realimentat.

Qüestió EP5: A partir de l'anàlisi del circuit, trobeu les expressions de $\alpha = V_{OUT_AO} / V_{IN_R}$ (quan $V_{OUT_R} = 0$) i $-f_R = V_{OUT_AO} / V_{OUT_R}$ (quan $V_{IN_R} = 0$) en funció de les resistències R_A i R_F . Considereu l'AO ideal.

Qüestió EP6: Determineu el guany de llaç $T(s)$ del filtre realimentat. De quin tipus de realimentació es tracta?

Qüestió EP7: Determineu la funció de transferència en llaç tancat del filtre realimentat definida com $H_R(s) = V_{OUT_R} / V_{IN_R}$.

La funció de transferència del filtre actiu realimentat té la mateixa forma que el filtre passiu, amb un zero en l'origen i un parell de pols. Per tant, també pot identificar-se amb la mateixa expressió canònica (equació 1) que hem utilitzat abans per al filtre passiu.

Qüestió EP8: Expresseu els nous valors d' A , ω_0 , i Q de la funció de transferència del filtre actiu en funció dels components del circuit.

Atenent aquesta funció de transferència, ajustant la realimentació adequada mitjançant el factor de realimentació $-f_R$, s'aconsegueix millorar la selectivitat del filtre convertint els pols reals en pols complexes conjugats.

Qüestió EP9: Calculeu els valors necessaris de la realimentació f_R per tal d'aconseguir uns factors de qualitat $Q=5$ i $Q=10$. Dona el valor de la resistència R_F per a cadascun d'aquests dos factors de qualitat si $R_A = 10 \text{ k}\Omega$.

Qüestió EP10: Trobeu els dos pols complexes conjugats i calculeu el valor del mòdul de la resposta freqüencial a la freqüència angular central ω_0 per als valors del factor de qualitat $Q=5$ i $Q=10$.

3. Estabilitat de l'amplificador realimentat. Condició d'oscil·lació.

L'estabilitat de l'amplificador realimentat de la Figura 3 depèn del factor de realimentació f_R que fixa la quantitat de realimentació. En l'apartat anterior s'ha vist que aquest factor fa que el filtre sigui més o menys selectiu, però d'igual forma pot fer que el circuit oscil·li. En aquest cas, pot utilitzar-se el mateix esquema per implementar un oscil·lador sinusoidal.

Qüestió EP11: Dibuixeu el Lloc Geomètric d'Arrels (LGA) atenent a la variació de f_R i situeu sobre ell la posició dels pols per als casos del filtre passiu i el filtre actiu amb els factors de qualitat $Q=5$ i $Q=10$.

Qüestió EP12: Trobeu la condició del valor de la realimentació f_R que fa que el circuit sigui estable. Quina condició ha de complir R_F per a que el circuit oscil·li si $R_A = 10 \text{ k}\Omega$?

TREBALL AL LABORATORI: Sessió 1

En aquesta primera sessió de laboratori es simularà amb PSPICE tant el filtre RC passabanda passiu de la Figura 2, com el filtre passabanda actiu basat en un amplificador realimentat de la Figura 3. Els resultats de les simulacions s'han de comparar amb els obtinguts en l'anàlisi realitzada en l'estudi previ.

4. Simulacions dels filters passabanda

4.1. Resposta freqüencial del filtre passiu

Creeu un nou projecte en OrCAD i introduceix l'esquemàtic del filtre passiu RC de la Figura 2. Realitzeu un anàlisis AC (AC Sweep Type *Logarithmic*, Start Frequency: 10, End Frequency: 10meg, Points/Decade: 1000) i comproveu la correcta resposta freqüencial. No oblideu definir un valor inicial nul per a la càrrega emmagatzemada en els condensadors declarant la seva variable IC (*Initial Conditions*), IC=0.

Qüestió L4.1: Representeu el mòdul de la resposta freqüencial del filtre. Quina és la seva freqüència central f_0 i el guany G a aquesta freqüència? Quina és la seva amplada de banda BW i el seu factor de qualitat Q? Compareu els resultats amb els obtinguts a l'estudi previ.

4.2. Comparació de les respostes freqüencials del filtre passiu amb el filtre actiu realimentat

Seguidament, heu de comparar la resposta freqüencial del filtre passiu RC anterior amb el filtre actiu realimentat de la Figura 3. Per tal de fer simulacions comparatives del filtre amb i sense realimentació, introduïu l'esquemàtic del filtre realimentat **en la mateixa pàgina** on teniu el filtre passiu (fixeu-vos que heu d'evitar repetir noms d'elements de circuits i de nodes). L'amplificador operacional que utilitzarem en aquesta pràctica és el TL071 i el símbol d'aquest AO el trobareu en la llibreria “tex_inst.olb”. Recordeu que també haureu d'afegir la llibreria “tex_inst.lib” en la categoria “Library” de la pestanya “Configuration Files” del perfil de simulació quan programeu el tipus de simulació (trobareu la llibreria a “carpeta d'instalació\tools\pspice\library\”). Doneu el valor a la resistència R_F per a que el factor de qualitat sigui de Q=5.

Torneu a fer un anàlisis AC, com el realitzat abans, simultani dels dos circuits passabanda (amb i sense realimentació, Figures 2 i 3). Visualitzeu el diagrama de Bode de les funcions de transferència de tots dos filters.

Qüestió L4.2: Representeu el mòdul de les respostes freqüencials dels dos filters. Quina és la seva freqüència central i el guany a aquesta freqüència? Compareu les seves amplades de banda i els seus factors de qualitat. Compareu els resultats amb els obtinguts a l'estudi previ.

4.3. Resposta freqüencial del filtre actiu realimentat

Les següents **simulacions ja només seran del filtre actiu realimentat** i, per tant, ja podeu eliminar l'esquemàtic del primer filtre passiu RC. Repetiu la mateixa anàlisi AC del filtre realimentat per a 3 freqüències centrals diferents, aproximadament a 1, 10 i 100 kHz, fent servir una anàlisi paramètrica variant el valor dels condensadors (*Parametric Sweep, Global Parameter, Parameter name: Valor_C, Value list: 0.1n 1n 10n*).

Qüestió L4.3: Representeu el diagrama de Bode (mòdul en dB i fase) per als tres casos. Comproveu la seva freqüència central i el guany a aquesta freqüència.

Qüestió L4.4: A partir de la comparació dels filters a les tres freqüències centrals diferents, raoneu si pot fer-se servir el filtre realimentat centrat a 100 kHz.

Torneu a fer la mateixa anàlisi AC del filtre actiu només amb la freqüència central d'1 kHz per als dos valors del factor de qualitat de Q=5 i Q=10 (feu servir de nou l'anàlisi paramètrica, aquesta vegada variant la resistència RF amb el paràmetre Valor_R).

Qüestió L4.5: Representeu el diagrama de Bode (mòdul en dB i fase) del filtre per als dos valors de RF. Comproveu la freqüència central i els seus factors de qualitat. Quins són els guanys a la freqüència central? Compareu els resultats amb els obtinguts a l'estudi previ.

5. Simulacions de l'oscil·lador

5.1. Circuit actiu realimentat inestable

Ara, les simulacions del circuit de la Figura 3 seran temporals, és a dir, del tipus TRANSIENT o TRAN. Per tant, cal canviar la font d'entrada a una font sinusoïdal del tipus VSIN amb un valor de 100 mV d'amplitud i 10 kHz de freqüència. I per a que el circuit sigui teòricament inestable segons allò calculat en l'estudi previ, s'ha de triar un valor del factor f_R prou gran, per exemple, $R_F = 21 \text{ k}\Omega$. S'ha d'executar una simulació del tipus TRANSIENT d'uns 30 ms.

Qüestió L5.1: Representeu tant els senyals d'entrada i de sortida del circuit. Justifiqueu per què la freqüència dels dos senyals no coincideix.

Torneu a simular el circuit sense cap senyal d'entrada, és a dir, substituint la font d'entrada per un curtcircuit a massa. Cal augmentar el temps total de simulació fins a uns 100 ms per tal que es pugui veure que els senyals han arribat al seu règim permanent.

Qüestió L5.2: Representeu tant el senyal de sortida del circuit com el senyal de sortida de l'AO. Quina freqüència d'oscil·lació s'obté? Què és el que produeix l'estabilització de l'amplitud de la tensió de sortida?

Canvieu la presentació dels senyals per mostrar la seva FFT. És millor utilitzar escala logarítmica per a l'eix vertical. Heu de visualitzar els primers harmònics del senyal limitant el marge de l'eix horitzontal a uns 10 kHz.

Qüestió L5.3: Representeu la FFT del senyal de sortida de l'AO. Quina és la freqüència de l'harmònic fonamental? Quina és la relació d'amplitud entre el fonamental i el tercer harmònic?

5.2. Oscil·lador amb circuit d'arrencada i estabilització d'amplitud

Com s'ha vist en la simulació anterior, el circuit de la Figura 3 oscil·la per a determinats valors de f_R . Llavors s'anomena oscil·lador en pont de Wien. L'estabilització d'amplitud que es produeix en aquest circuit realimentat fa que el senyal de sortida estigui força distorsionat i la seva amplitud sigui fixa. Per tenir un bon oscil·lador, cal millorar la forma d'ona generada i cal poder-se escollir la seva amplitud. Aquests objectius s'aconsegueixen afegint un circuit específic d'estabilització d'amplitud. Consisteix en que el guany de circuit sigui variable en funció de l'amplitud del senyal d'entrada. En l'instant inicial, el valor del factor f_R és més gran que la condició d'oscil·lació, que permet l'arrencada de l'oscil·lació al situar els pols del circuit en el semiplà dret del pla complex s. A mesura que l'amplitud del senyal va creixent, el factor del circuit va disminuint. Així s'acaba obtenint el valor del factor f_R corresponent a la condició d'oscil·lació quan l'amplitud del senyal de sortida arriba a un valor determinat escollit per disseny.

El circuit que heu de simular és el de la Figura 5 que és bàsicament el mateix que heu simulat fins ara, al qual s'ha afegit en paral·lel amb la resistència de realimentació de l'AO una etapa amb diòdes que condirà més o menys atenent l'amplitud del senyal. Fixeu-vos que la disposició dels components en l'esquemàtic s'ha reorganitzat i aquesta figura

coincideix amb la representació típica de l'oscil·lador en pont de Wien explicada a classe de teoria.

Per introduir els dos diòdes, heu de seguir els mateixos passos utilitzats en l'apartat 4.2 per afegir l'AO. Primer heu d'utilitzar la llibreria "diode.olb" per dibuixar-los a l'esquemàtic i, després, afegir la llibreria "diode.lib" a la pestanya de "Configuration Files" del perfil de simulació.

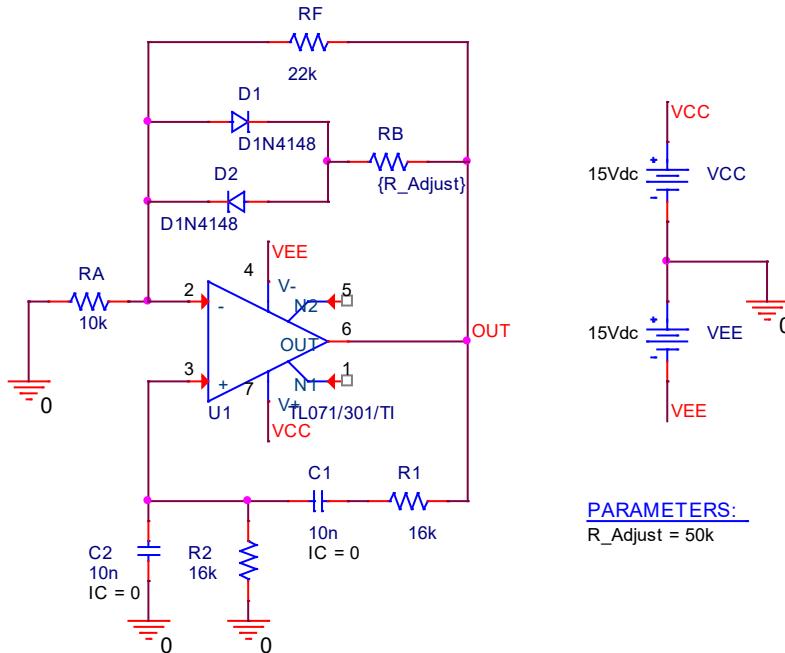


Figura 5. Circuit oscil·lador en pont de Wien amb estabilització d'amplitud per diòdes.

Qüestió L5.4: Feu els càlculs per trobar la relació R_F/R_A i la f_R del circuit quan tots dos diòdes estan en tall (instant inicial) i quan un dels diòdes condueix totalment (suposant la seva resistència de conducció menyspreable). Quina situació en quant a estabilitat tenim en cada cas?

Feu una simulació temporal TRANSIENT del circuit per a tres diferents valors de R_{Adjust} fent una anàlisi paramètrica (Parametric Sweep, Global Parameter: R_{Adjust} , Value List: 25k 50k 100k).

Qüestió L5.5: Representeu la tensió de sortida de l'oscil·lador (sortida de l'AO). Quina amplitud de sortida de l'oscil·lador s'aconsegueix per a cada valor de R_{Adjust} ?

Simuleu l'oscil·lador amb una $R_B = 50 \text{ k}\Omega$ i representeu la FFT de la tensió de sortida de l'oscil·lador. El temps de la simulació TRAN ha de tenir uns 100 períodes del senyal de sortida per a que la transformada tingui bona resolució.

Qüestió L5.6: Representeu la FFT del senyal de sortida de l'AO. Quina és la freqüència de l'harmònic fonamental? Quina és la relació entre el fonamental i el tercer harmònic?

Qüestió L5.7: Millora la distorsió del senyal respecte als resultats obtinguts a la qüestió L5.3?

TREBALL AL LABORATORI: Sessió 2

En aquesta sessió es realitzarà el muntatge experimental del circuits de la Figura 3 que ha estat simulat en la sessió anterior. Per tant, caldrà anar contrastant les mesures amb les simulacions de la sessió anterior i els càlculs realitzats en l'estudi previ.

Els càlculs i simulacions anteriors han mostrat que aquest circuit realimentat es pot fer treballar com a un filtre passabanda, o bé, com a un oscil·lador. El funcionament en l'un o l'altre mode depèn del valor del factor de realimentació f_R , o el que és el mateix, del quotient R_F/R_A . El muntatge del circuit i l'ajustament adient de la resistència R_F ha de permetre la validació experimental d'aquestes dos modes de funcionament.

6. Muntatge i mesura del filtre passabanda actiu realimentat.

Munteu el filtre passabanda actiu de la Figura 3 en la placa de connexions protoboard. Trieu la resistència R_F per al factor de qualitat $Q=5$. Heu d'alimentar l'AO amb la font d'alimentació del lloc de treball a una tensió de ± 15 V. Connecteu el generador de funcions a l'entrada del filtre i ajusteu-lo per fer les mesures amb un senyal sinusoïdal amb un valor de pic a pic de $400 \text{ mV}_{\text{pp}}$ per evitar saturar la sortida de l'AO. Repetiu les mesures a diferents freqüències entre 100 Hz i 10 kHz per poder dibuixar la seva resposta freqüencial (100 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 750 Hz, 900 Hz, 1 kHz, 1,2 kHz, 1,5 kHz, 2 kHz, 5 kHz, 10 kHz).

Qüestió L6.1: Feu una taula amb els valors dels guanys del filtre per a cada freqüència i dibuixe la resposta freqüencial a partir de les mesures.

Qüestió L6.2: Quina és la freqüència central f_0 del filtre i el guany G a aquesta freqüència? Quina és la seva amplada de banda BW i el seu factor de qualitat Q obtinguts a partir de les mesures? Compareu els resultats amb els obtinguts a les simulacions.

7. Muntatge i mesura de l'oscil·lador

7.1. Circuit actiu realimentat inestable

En aquest cas, cal substituir en el muntatge del filtre actiu realimentat la resistència R_F per un potenciómetre de $25 \text{ k}\Omega$ per a que es pugui ajustar el seu valor entre 0 i $25 \text{ k}\Omega$. Per tant, segons la posició del cursor, el circuit serà estable, podent funcionar com a filtre, o bé inestable, generant a la sortida una oscil·lació pròpia. Utilitzeu el generador de funcions per entregar al circuit un senyal sinusoïdal de $500 \text{ mV}_{\text{pp}}$ i 4 kHz. Ajusteu el cursor del potenciómetre a la meitat del seu recorregut.

Qüestió L7.1: Captureu el senyal de sortida del circuit amb l'oscil·loscopi. Quina és la freqüència i l'amplitud d'aquest senyal?

Moveu lentament el cursor del potenciómetre de forma que vagi augmentant el valor de la resistència R_F fins a que vegeu un canvi molt gran en el senyal de sortida. Trieu el potenciómetre del circuit per mesurar la seva resistència amb el multímetre digital.

Qüestió L7.2: Quin és el valor de R_F a partir del qual es veu aquest canvi? Justifiqueu aquest valor a partir de la condició d'oscil·lació del circuit.

Torneu a posar el potenciómetre en el circuit.

Qüestió L7.3: Captureu el senyal de sortida del circuit amb l'oscil·loscopi. Quina és la freqüència i l'amplitud del senyal de sortida? Justifiqueu les diferències respecte a la qüestió L7.1.

Desconnecteu l'entrada del circuit del generador de funcions i connecteu aquest node directament a massa (R_A ha d'anar connectada a massa).

Qüestió L7.4: Captureu el senyal de sortida del circuit amb l'oscil·loscopi. Hi ha algun canvi respecte a la qüestió anterior? Justifiqueu la resposta.

7.2. Oscil·lador en pont de Wien amb circuit d'arrencada i estabilització d'amplitud

Substituïu el potenciómetre per una resistència fixa de $R_F = 22\text{ k}\Omega$ i afegiu el circuit estabilitzador amb diòdes tal i com es mostra a la Figura 5. En la posició de la resistència R_B hi heu de connectar un potenciómetre de $50\text{ k}\Omega$ per poder tenir una resistència ajustable. Heu de comprovar amb l'oscil·loscopi el seu correcte funcionament per a diferents posicions del cursor del potenciómetre amb el que implementeu la resistència R_B . Compareu els resultats amb els obtinguts amb el circuit sense diòdes.

Qüestió L7.5: Captureu el senyal de sortida del circuit amb l'oscil·loscopi quan el cursor del potenciómetre estigui en l'extrem del seu recorregut que faci que la seva resistència sigui de $50\text{ k}\Omega$. Quina és la freqüència i l'amplitud d'aquest senyal?