

Funcions i Sistemes Electrònics

Pràctica 6

Mesurador de distàncies per ultrasons

Setembre 2023

Juan A. Chávez, Antoni Turó

Continguts

| | |
|---|-----------|
| 0. INTRODUCCIÓ | 3 |
| 1. SESSIÓ 1: PRINCIPI DE MESURA I CIRCUIT RECEPTOR..... | 5 |
| 1.0. PRINCIPI DE MESURA | 5 |
| 1.1. CIRCUIT ELECTRÒNIC RECEPTOR..... | 6 |
| 1.1.1. <i>Amplificador</i> | 6 |
| 1.1.2. <i>Detector d'envolupant</i> | 6 |
| 1.1.3. <i>Detector de nivell</i> | 6 |
| <i>Placa de circuit imprès i soldadura de components</i> | 7 |
| 1.2. PART EXPERIMENTAL AL LABORATORI | 8 |
| 1.2.1. <i>Comprovació experimental del principi de mesura</i> | 8 |
| 1.2.2. <i>Connexió de l'amplificador</i> | 8 |
| 1.2.3. <i>Muntatge i caracterització del detector d'envolupant</i> | 9 |
| 1.2.4. <i>Muntatge i caracterització del detector de nivell</i> | 9 |
| 2. SESSIÓ 2: CIRCUIT TRANSMISSOR | 10 |
| 2.0. SENYAL D'EXCITACIÓ DE LA CÀPSULA D'ULTRASONS | 10 |
| 2.1. CIRCUIT ELECTRÒNIC TRANSMISSOR..... | 10 |
| 2.1.1. <i>Generador de senyal de 40 kHz</i> | 10 |
| 2.1.2. <i>Generador del patró de repetició de polsos</i> | 11 |
| 2.1.3. <i>Condicionament del senyal d'excitació</i> | 12 |
| 2.2. PART EXPERIMENTAL AL LABORATORI | 13 |
| 2.2.1. <i>Muntatge i caracterització del generador de 40 kHz</i> | 13 |
| 2.2.2. <i>Muntatge i caracterització del circuit patró de repetició de polsos</i> | 13 |
| 2.2.3. <i>Verificació del senyal d'excitació de la càpsula transmissora</i> | 14 |
| 3. SESSIÓ 3: MESURA DE TEMPS I INTEGRACIÓ DEL SISTEMA. VALIDACIÓ I AJUSTAMENT DEL MESURADOR. | 15 |
| 3.0. MESURA DE TEMPS | 15 |
| 3.1. CIRCUIT ELECTRÒNIC DE MESURA DEL TEMPS DE VOL TOF | 16 |
| 3.1.1. <i>Referència de temps amb un oscil·lador d'ona quadrada CMOS</i> | 16 |
| 3.1.2. <i>Circuit comptador i de presentació de la mesura</i> | 19 |
| 3.1.3. <i>Condensadors de desacoblament a massa de les tensions d'alimentació</i> | 19 |
| 3.2. PART EXPERIMENTAL AL LABORATORI | 21 |
| 3.2.1. <i>Muntatge i caracterització del generador de referència de temps</i> | 21 |
| 3.2.2. <i>Integració de tot el sistema</i> | 21 |

0. INTRODUCCIÓ

Objectiu de la pràctica

L'objectiu d'aquesta pràctica és dissenyar, muntar i caracteritzar un mesurador de distàncies per mitjà d'ultrasons. Aquest sistema ha de ser capaç de mesurar la distància fins a un determinat obstacle. El seu principi de funcionament és ben senzill, tal com es representa en la Figura 1. En la Pràctica 1 d'aquest curs ja vàreu fer uns primers experiments per veure aquest principi de mesura.

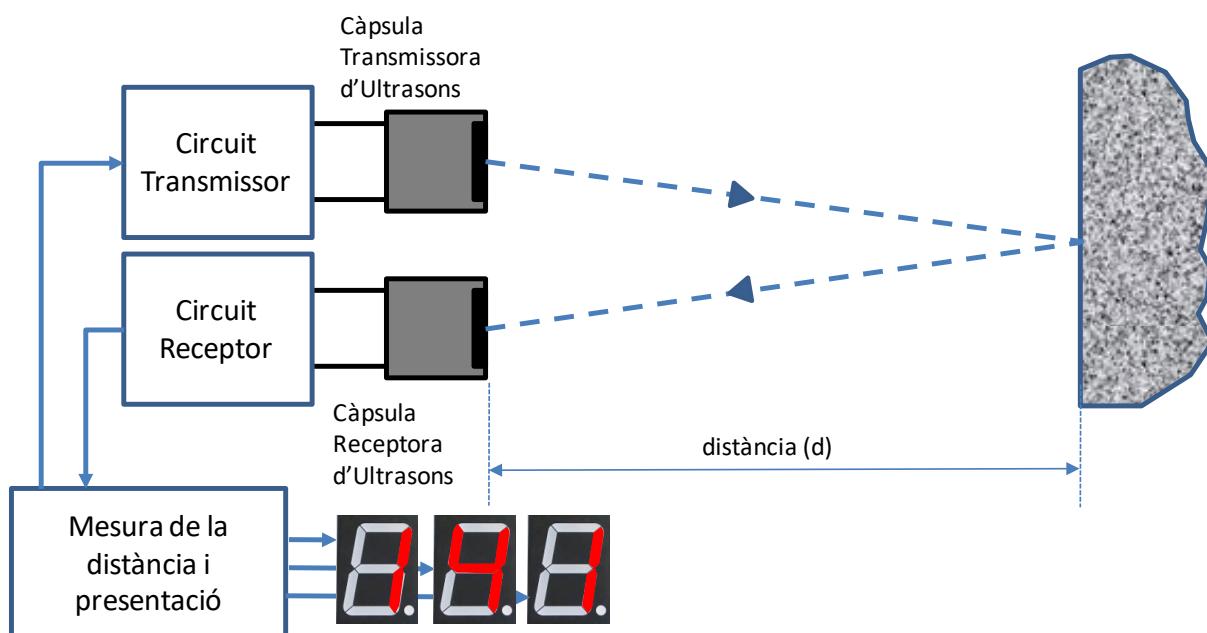


Figura 1. Esquema de funcionament del mesurador.

El mesurador de distància es realitza mitjançant diferents blocs que implementaran algunes funcions electròniques analògiques típiques. Un circuit electrònic s'encarrega de generar un senyal elèctric que la càpsula ultrasònica transmissora converteix en una ona d'ultrasons que es propaga per l'aire. Quan aquesta ona d'ultrasons es troba amb un obstacle, es reflectida i retorna cap a la càpsula receptora, que converteix aquest eco en una tensió elèctrica. Finalment, com que coneixem la velocitat amb la qual els ultrasons es propaguen en l'aire, la mesura amb un circuit electrònic del temps transcorregut entre l'instant en que s'emet l'ona i el que es rep l'eco, permet calcular la distància. Aquest resultat es presenta en un display de tres díigits directament en centímetres.

El diagrama de blocs detallat amb les seves connexions el podeu trobar al Campus Digital ATENEA en el fitxer “Diagrama de blocs i connexions.pdf”.

Organització de la pràctica

La pràctica es desenvoluparà en **3 sessions** amb un **treball previ que heu de fer a casa** i una part experimental d'una durada de 2 hores cadascuna que realitzareu al laboratori. A l'inici de cada sessió al laboratori, haureu d'haver penjat una còpia amb les respostes a les qüestions de l'estudi previ a la tasca d'ATENEA.

Les tres sessions són les següents:

1. **Sessió 1:** Principi de mesura i circuit receptor.
2. **Sessió 2:** Circuit transmissor.
3. **Sessió 3:** Mesura de temps i integració de les diferents parts del sistema. Validació i ajustament del mesurador.

Per realitzar el muntatge dels circuits d'aquesta pràctica es necessiten tots els components electrònics i la PCB que us han estat subministrats fins aquest moment. Consulteu la informació que es troba penjada a ATENEA amb les fotos (fitxer "Fotos PCB.pdf") i l'esquema elèctric (fitxer "Esquema mesurador distància per ultrasons.pdf") d'aquesta PCB.

Les característiques de tots els circuits integrats i components específics que s'utilitzaran durant la pràctica estan accessibles a ATENEA.

1. SESSIÓ 1: PRINCIPI DE MESURA I CIRCUIT RECEPTOR

En aquesta sessió estudiarem el principi de mesura del sistema, com utilitzar un amplificador de senyal amb amplificadors operacionals, com fer una detecció d'envolupant i com utilitzar un comparador amb histèresi per detectar un nivell.

ESTUDI PREVI

1.0. Principi de mesura

Els ultrasons són ones acústiques de freqüències majors que les audibles pels essers humans. Habitualment es considera com a límit dels sons audibles els 20 kHz i, per tant, més enllà d'aquesta freqüència podem considerar-los com a ultrasons. La seva velocitat de propagació en l'aire és la mateixa que la dels sons audibles, és a dir, aproximadament uns 340 m/s.

Els ultrasons poden generar-se a partir d'un senyal elèctric mitjançant uns dispositius anomenats transductors. La conversió en sentit contrari, d'ultrasò a senyal elèctric, també la fan aquesta mena de dispositius. En aquesta pràctica utilitzarem com a transductors les càpsules utilitzades en la Pràctica 1 que funcionen a 40 kHz.

El principi de mesura del sistema es basa en la mesura del temps de vol TOF (de l'anglès, "time of flight") d'una ona d'ultrasons. El TOF és el temps transcorregut entre l'instant en que s'emet l'ona d'ultrasons i l'instant en el qual es rep l'eco produït per la reflexió d'aquest pols en l'obstacle situat a la distància que es vol conèixer. Fixeu-vos que per poder mesurar el temps transcorregut la durada de l'ona ha de ser curta per evitar solapaments. En lloc d'utilitzar un senyal d'ona contínua de 40 kHz, es fa servir un pols o salva (en anglès, "burst") amb només uns quants cicles de la mateixa freqüència.

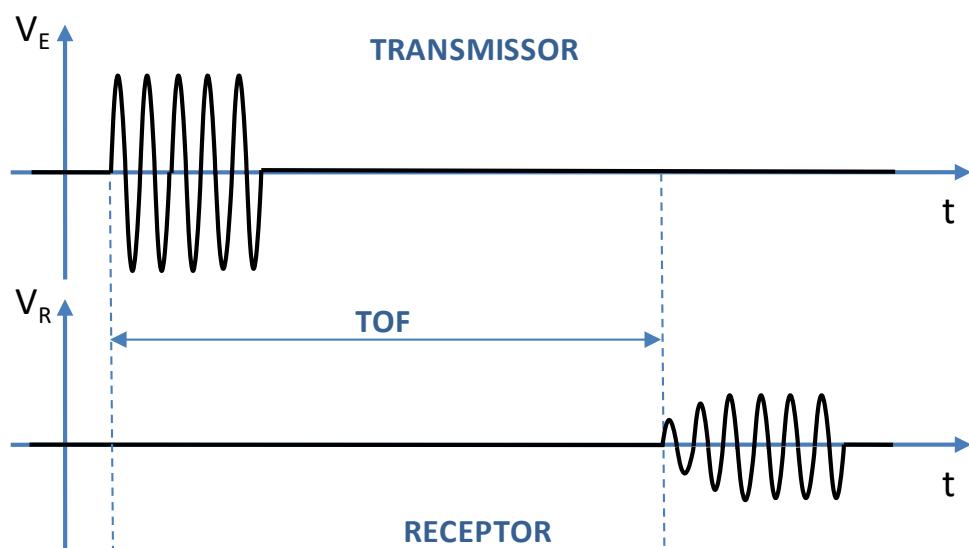


Figura 2. Temps de vol TOF d'un pols o salva d'ultrasons. V_E és la tensió d'excitació del transductor transmissor i V_R és la tensió mesurada en els terminals del transductor receptor.

Qüestió EP1.1. Quin és el TOF corresponent a un obstacle situat a 50 cm de les càpsules? I el d'un obstacle situat a 1 m i 2 m? S'ha de tenir en compte que el pols d'ultrasons ha de recórrer dos cops la distància (anada i tornada) que separa l'obstacle de les càpsules.

1.1. Circuit elèctric receptor

Per fer aquesta funció el circuit receptor es compon de tres blocs connectats en cascada: un amplificador, un detector d'envolupant i un detector de nivell. L'amplificador augmenta l'amplitud del senyal detectat per la càpsula receptora, el detector d'envolupant permet obtenir l'envolupant de la salva de 40 kHz ja amplificada i, finalment, el detector de nivell ens permet decidir l'instant en que considerem que arriba l'eco.

1.1.1. Amplificador

El senyal elèctric detectat a la càpsula receptora és molt dèbil, amb menys amplitud quan més gran és la distància a la qual està situat l'obstacle, per la qual cosa el primer pas en el tractament d'aquest senyal és amplificar-lo. Atès que volem que el sistema pugui mesurar fins a uns dos metres de distància, s'ha determinat que el guany necessari per a l'amplificador és d'aproximadament 400 a la freqüència de treball que són 40 kHz.

L'amplificador de tensió que utilitzarem és el dissenyat i muntat en la Pràctica 4 d'aquest curs.

1.1.2. Detector d'envolupant

El senyal rebut corresponent a l'eco d'ultrasons és una salva amb uns quants cicles a la freqüència de treball de les càpsules (40 kHz) tal com apareix en la figura 2. Per poder decidir en quin instant considerem que es produeix l'arribada d'aquest eco, s'ha d'estreure l'envolupant del senyal. En la Figura 3 es presenta un circuit que fa aproximadament aquesta funció.

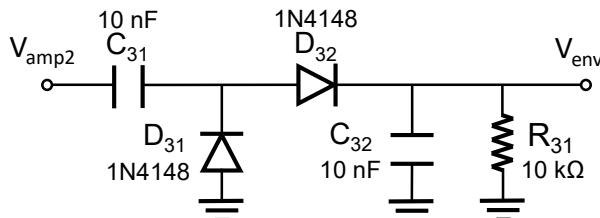


Figura 3. Detector d'envolupant.

Qüestió EP1.2. Simuleu amb PSPICE aquest circuit i captureu el senyal de sortida quan a la seva entrada es connecta un senyal que conté una salva de 10 cicles a la freqüència de 40 kHz i una amplitud de 2 V. L'esquema elèctric del circuit generador d'aquesta salva que heu d'utilitzar en les simulacions amb PSPICE el trobareu en el fitxer "PSPICE_generador_salva.pdf" penjat a ATENEA. Trobareu el símbol del diode D1N4148 en la llibreria "eval.olb". Recordeu que també haureu d'afegir la llibreria "eval.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'instal·lació>\tools\pspice\library\").

1.1.3. Detector de nivell

El detector de nivell és el circuit que decideix quan s'ha rebut un eco. Aquesta decisió es pot fer comparant l'envolupant del senyal amb una tensió de referència. El valor d'aquesta tensió de referència s'ha de triar tenint en compte el compromís que hi ha entre una tensió massa petita amb la possibilitat que qualsevol fluctuació de la tensió de sortida del detector d'envolupant produueix falses deteccions i, per tant, errors en la mesura, i una tensió massa alta que impossibiliti la detecció d'ecos dèbils que vinguin de lluny.

D'altra banda, per evitar múltiples commutacions a la sortida del comparador de tensió degudes a fluctuacions indesitjades del senyal d'entrada, s'utilitza un comparador amb histèresi tal com es mostra en la Figura 4. La tensió d'alimentació dels circuits d'aquesta sessió és de $V_{cc} = 12$ V. L'AO utilitzat és el TLC082, que és el mateix que ha estat utilitzat en l'amplificador de tensió.

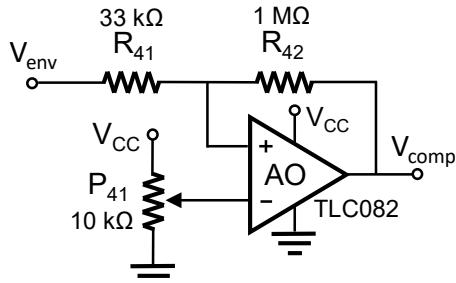


Figura 4. Detector de nivell utilitzant un comparador amb histèresi.

Qüestió EP1.3. Analitzeu aquest circuit i dibuixeu la seva característica entrada – sortida quan el cursor del potenciómetre està ajustat al mig del seu recorregut. Quina és l'amplada del cicle d'histèresi?

Placa de circuit imprès i soldadura de components

Tal i com ja vareu fer amb l'amplificador de la Pràctica 4, la resta de circuits del mesurador de distàncies mitjançant ultrasons es soldaran en la placa de circuit imprès (PCB) que es va subministrar en aquell moment. A hores d'ara, ja teniu l'amplificador soldat a la PCB així com tots els connectors i punts de test de la placa.

Recordeu que teniu penjada a ATENEA la informació amb les fotos (fitxer “Fotos PCB.pdf”) i l'esquema elèctric (fitxer “Esquema mesurador distància per ultrasons.pdf”) d'aquesta PCB. Repasseu també el document del fitxer “FISE Instruccions Soldadura.pdf” de la Pràctica 4 que conté unes nocions bàsiques sobre soldadura de components electrònics.

TREBALL DE LABORATORI

1.2. Part experimental al laboratori

La part experimental d'aquesta sessió consistirà en la verificació del principi de mesura i el muntatge i caracterització del circuit receptor de l'eco d'ultrasons. El muntatge i la validació experimental dels circuits es realitzarà soldant-los directament a la PCB. Aquest muntatge es farà de forma seqüencial bloc a bloc, assegurant el correcte funcionament en cada pas.

1.2.1. Comprovació experimental del principi de mesura

El primer pas és muntar les càpsules ultrasòniques a la PCB. La càpsula receptora s'ha d'introduir en el **connector J1** i la càpsula transmissora en el **connector J3**. **Vigileu d'introduir les càpsules en els connectors amb la polaritat correcta**. Identifica tots aquests connectors a l'esquema elèctric i a la pròpia PCB a partir de la documentació d'ATENEA. De moment, no és necessari connectar la PCB a l'alimentació.

La comprovació experimental del principi de funcionament del mesurador es pot fer excitant la càpsula transmissora directament amb el generador de funcions (GF) i mesurant l'eco rebut a la sortida de la càpsula receptora amb l'oscil·oscopi.

- 1) Connecteu el GF a la càpsula transmissora (mitjançant el **connector J4**). També heu de visualitzar el senyal aplicat a la càpsula en el canal I de l'oscil·oscopi.
- 2) Connecteu la càpsula receptora al canal II de l'oscil·oscopi (useu el **connector J2**).
- 3) Ajusteu el senyal de sortida del GF en forma d'una salva (que consisteix en un paquet d'un nombre determinat de cicles com es mostra en la Figura 2) de 10 cicles de 40 kHz i 12 V de pic a pic. La freqüència de repetició de les salves l'heu d'ajustar a 10 Hz. Sincronitzeu el *trigger* de l'oscil·oscopi amb aquest senyal (canal I).
- 4) Apunteu les càpsules a diferents obstacles (parets properes, caixa de l'ordinador, ...) i mesureu a la pantalla de l'oscil·oscopi el TOF i l'amplitud del senyal rebut.

Qüestió L1.1. Presenteu la captura amb l'oscil·oscopi de la forma d'ona del senyal rebut quan apuntem a la caixa de l'ordinador del vostre lloc de treball, o un obstacle similar, i heu situat les càpsules a 0,5 m de distància.

Qüestió L1.2. Quina és l'amplitud del senyal rebut en aquestes condicions? Quin és el TOF i la distància calculada a partir d'ell?

1.2.2. Connexió de l'amplificador

L'amplificador de tensió que s'utilitza per amplificar el senyal rebut per la càpsula receptora és el dissenyat en la Pràctica 4. Recordeu que el connector **JP10** permet connectar o disconnectar la segona etapa de l'amplificador mitjançant un *jumper*. I els punts de test **J10** i **J20** permeten connectar l'oscil·oscopi a les sortides dels AO mentre que el punt de test **J11** correspon a massa (GND). L'entrada de l'amplificador ja està connectada al connector de la càpsula receptora.

El primer pas és comprovar el correcte funcionament de l'amplificació del senyal rebut per la càpsula ultrasònica receptora. Connecteu el GF a la càpsula transmissora de la mateixa forma que en l'apartat anterior. Alimenteu la PCB amb una tensió d'alimentació de $V_{cc} = 12\text{ V}$ (terminals tipus banana femella negre i vermell).

Qüestió L1.3. Presenteu la captura amb l'oscil·oscopi del senyal d'excitació de la càpsula transmissora i del senyal de sortida de l'amplificador. Quina és l'amplitud del senyal de sortida de l'amplificador? La distància de les càpsules a l'obstacle ha de ser de 0,5 m.

1.2.3. Muntatge i caracterització del detector d'envolupant

Soldeu el circuit detector d'envolupant de la Figura 3 a la PCB. Els connectors **JP20** i **JP30** serveixen per fer les connexions i desconnexions entre els diferents circuits mitjançant *jumpers*. La sortida del detector pot mesurar-se en el punt de test **J30**.

Amb la sortida de l'amplificador connectada a l'entrada del detector mitjançant un *jumper* inserit a **JP20**, mesureu i compareu els senyals d'entrada i sortida del detector. La distància de les càpsules a l'obstacle ha de ser de 0,5 m.

Qüestió L1.4. Captureu els senyals a la sortida del detector d'envolupant i a la seva entrada.

Apunteu ara les càpsules cap al sostre i presenteu la captura del senyal d'excitació de la càpsula transmissora i del senyal de sortida d'aquest circuit. Reajusteu els comandaments de l'oscil·loscopi per poder veure correctament el senyal de sortida del detector.

Qüestió L1.5. Presenteu la captura del senyal d'excitació de la càpsula transmissora i del senyal de sortida d'aquest circuit. Quin és el TOF? A quina distància està el sostre?

1.2.4. Muntatge i caracterització del detector de nivell

Soldeu a la PCB el circuit detector de nivell de la Figura 4 així com els condensadors de desacoblament de l'alimentació C₃₅ i C₃₆ que podeu veure en l'esquema de la placa. El punt de test **J40** correspon a la sortida d'aquest bloc.

Amb el circuit sense connectar a la sortida del detector d'envolupant (sense jumper al connector JP30), mesureu la seva característica entrada–sortida quan el potenciómetre està ajustat a la meitat del recorregut del cursor. Per a això:

- 1) Connecteu el GF amb un senyal sinusoïdal d'uns 5 V d'amplitud, d'uns 5 V d'offset de tensió contínua i 1 kHz de freqüència tant a l'entrada del circuit (punt de test **J30**) com al canal I de l'oscil·loscopi.
- 2) Connecteu la sortida del detector de nivell (punt de test **J40**) al canal II.
- 3) Per representar la característica directament a la pantalla de l'oscil·loscopi, heu d'activar el seu mode XY.

Qüestió L1.6. Presenteu la captura amb l'oscil·loscopi de la característica entrada–sortida d'aquest circuit. Compara el resultat amb l'anàlisi i la simulació del circuit.

Qüestió L1.7. Què succeeix quan es modifica l'ajustament del potenciómetre?

Disconnecteu el GF i connecteu l'entrada del circuit detector de nivell a la sortida del detector d'envolupant mitjançant un *jumper* al connector **JP30**. Torneu a connectar la càpsula transmissora al GF de la mateixa forma que en l'apartat 1.2.1 i proveu tota la cadena del circuit receptor amb la càpsula receptora, l'amplificador, el detector d'envolupant i el detector de nivell connectats. Apunteu amb les càpsules algun obstacle que es trobi a 1 m de distància.

Qüestió L1.8. Captureu amb l'oscil·loscopi els senyals a l'entrada i la sortida del detector de nivell.

Qüestió L1.9. Presenteu la captura del senyal d'excitació de la càpsula transmissora i del senyal de sortida del detector de nivell.

Qüestió L1.10. Quin és el TOF mesurat a partir de la sortida del detector de nivell? Quina és la distància calculada a partir d'ell?

2. SESSIÓ 2: CIRCUIT TRANSMISSOR

En aquesta sessió estudiarem els circuits electrònics que permeten generar el senyal d'excitació de la càpsula transmissora i que substituiran el generador de funcions que varem utilitzar en la sessió anterior i en la Pràctica 1.

ESTUDI PREVI

2.0. Senyal d'excitació de la càpsula d'ultrasons

Tal com es va mostrar en la Figura 2 de la sessió anterior, el senyal d'excitació consisteix en una salva d'uns quants cicles d'una freqüència de 40 kHz. Cada cop que es genera una salva, el circuit receptor detecta l'eco provinent de l'obstacle més proper apuntat per les càpsules. Com que es vol que la mesura sigui contínua, aquesta salva d'emissió es repeteix cada cert temps com es mostra en la Figura 5.

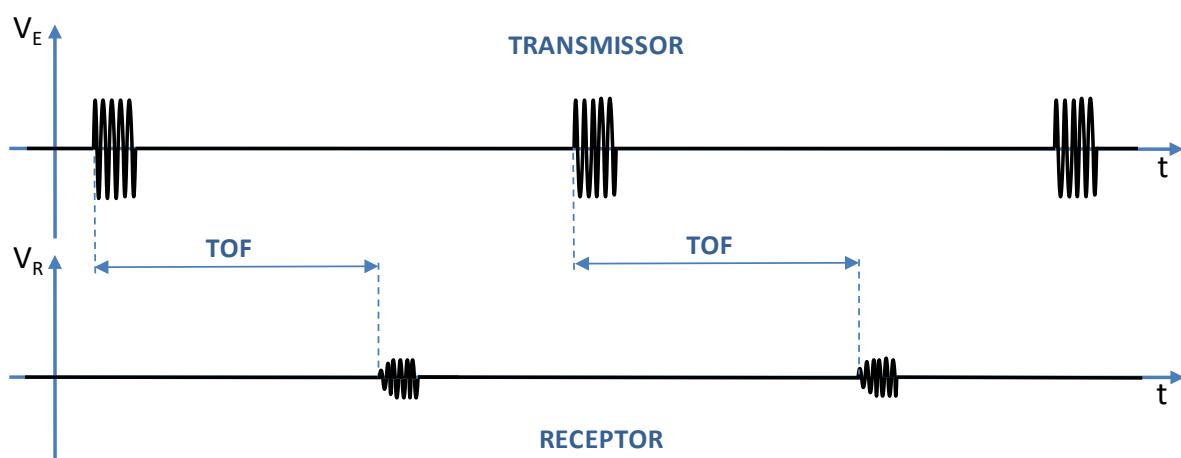


Figura 5. Repetició de salvades d'emissió per fer una mesura contínua de la distància.

Per tant, hem de dissenyar, d'una banda, un generador a la freqüència de 40 kHz, i d'una altra banda, un generador de polsos que activa o apaga el generador anterior. Com que la resposta freqüencial de la càpsula d'ultrasons té una resposta freqüencial passabanda molt selectiva al voltant dels 40 kHz, els seu funcionament és el mateix que quan s'ha excitat amb un senyal sinusoïdal de la mateixa freqüència en la sessió anterior. La durada dels polsos fixa el número de cicles del senyal de 40 kHz que conté cada salva, i la seva freqüència de repetició de polsos fixa cada quan es tornen a emetre. Finalment, s'ha d'afegir un circuit per adaptar el senyal generat a les millors condicions per atacar la càpsula transmissora.

2.1. Circuit electrònic transmissor

2.1.1. Generador de senyal de 40 kHz

La forma òptima de la tensió d'excitació de la càpsula transmissora és un senyal sinusoïdal de 40 kHz. No obstant, per facilitat de disseny del sistema, la sortida del nostre generador serà un senyal quadrat que es subministrarà de forma pulsada, com s'ha explicat abans. Com que la resposta freqüencial de la càpsula d'ultrasons té una resposta passabanda molt selectiva al voltant dels 40 kHz, només converteix la component corresponent a la freqüència fonamental del senyal quadrat i, per tant, el seu funcionament és el mateix que quan es va excitar amb un senyal sinusoïdal de la mateixa freqüència en la sessió anterior.

La generació d'aquest senyal quadrat es fa amb un circuit anomenat astable basat en el circuit integrat temporitzador 555 que es mostra en la Figura 6. La tensió d'alimentació dels circuits d'aquesta sessió és també de $V_{DD} = 12$ V.

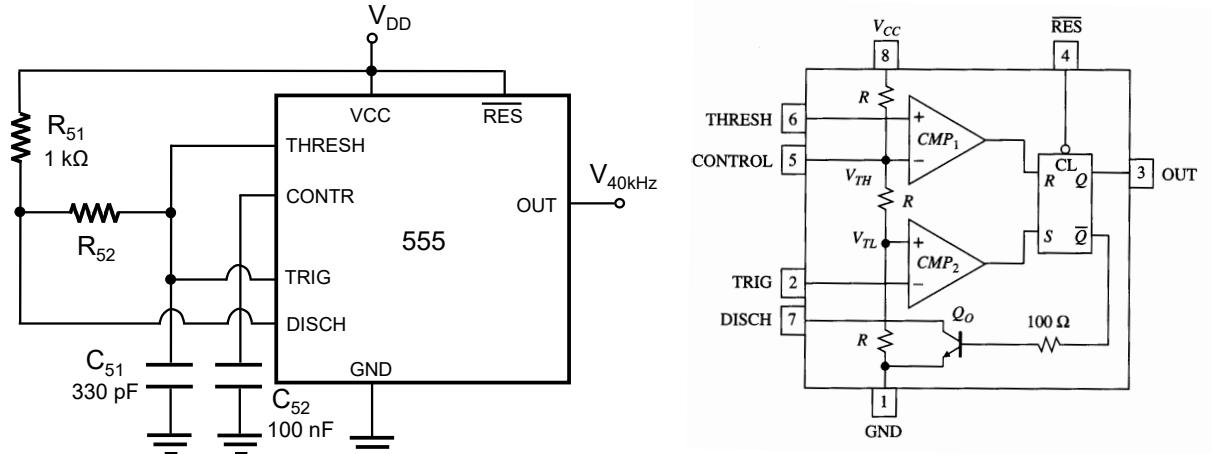


Figura 6. Circuit astable per generar el senyal de 40 kHz (esquerra) i esquema intern del 555 (dreta).

Qüestió EP2.1. Analitzeu el circuit i calculeu el valor de R_{52} per aconseguir una freqüència d'oscil·lació de 40 kHz. Quin és el cicle de treball de l'astable?

Qüestió EP2.2. Quina finalitat creus que pot tenir el condensador C_{52} ?

2.1.2. Generador del patró de repetició de polsos

Per generar la salva amb un número concret de cicles de 40 kHz i que aquesta es vagi repetint cada cert temps, es necessita un senyal de control de forma rectangular. L'amplada del pols (durada en la qual el nivell de la tensió de sortida és alt) determina el número de cicles que conté la salva. La freqüència del senyal, que s'anomena freqüència de repetició de polsos (PRF, de l'anglès “pulse repetition frequency”), fixa cada quant temps es repeteix la salva. Noteu que la freqüència de repetició de la salva fixa la distància màxima que es pot mesurar sense que hi hagi una indeterminació. La indeterminació es produiria si s'emetés una nova salva abans que hagi arribat l'eco de l'obstacle produït per la salva anterior.

Qüestió EP2.3. Quina hauria de ser la freqüència de repetició de polsos PRF màxima permesa si volguéssim un abast de 6 m?

Qüestió EP2.4. Quina és la durada que ha de tenir un pols per a que la salva sigui de 10 cicles?

El circuit que genera aquest senyal es presenta en la Figura 7 i està basat també en un astable realitzat amb un circuit integrat 555.

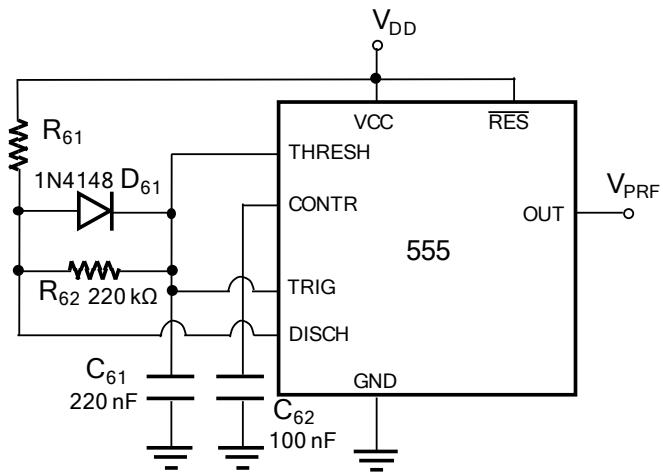


Figura 7. Circuit astable per generar el senyal de control.

Qüestió EP2.5. Analizeu el circuit i calculeu el valor de R_{61} per aconseguir una salva de 10 cicles.

Qüestió EP2.6. Quina és la freqüència de repetició de polsos PRF?

2.1.3. Condicionament del senyal d'excitació

El senyal de control V_{PRF} de l'apartat anterior (Figura 7) ha d'activar i desactivar el senyal $V_{40\text{kHz}}$ de 40 kHz (Figura 6) de l'apartat 2.1.1 per obtenir una salva que es repeteixi cada cert temps. Una manera senzilla d'aconseguir-ho és utilitzant el pin d'entrada de *reset* del circuit temporitzador 555 (pin 4). Quan a aquesta entrada s'hi connecta una tensió de 0 V, la sortida del circuit integrat (pin 3) queda també fixada a 0 V. En canvi, quan el pin 4 es connecta directament a la tensió d'alimentació, el circuit funciona normalment. Per tant, disconnectant el pin 4 (*reset*) de l'alimentació V_{DD} del circuit de la Figura 6, i connectant aquest pin 4 al senyal de control V_{PRF} obtingut a la sortida del circuit de la Figura 7, s'aconsegueix un senyal polsat repetitiu en el temps.

Finalment, com que el senyal $V_{40\text{kHz}}$ és un paquet de salves quadrades de 0 a 12 V, abans de connectar-lo a la càpsula transmissora, s'elimina la component contínua mitjançant un condensador de pas C_{54} de 100 nF connectat a la sortida $V_{40\text{kHz}}$, tal com es mostra en el diagrama de blocs del document “Practica 6 diagrama blocs i connexions.pdf”. La mateixa càpsula transmissora que té una resposta freqüencial passabanda amb una amplada de banda estreta centrada als 40 kHz filtra el senyal quadrat per convertint-lo en una ona ultrasònica en forma d'un paquet de salves sinusoïdals a la seva sortida. D'aquesta forma solament la freqüència fonamental de 40 kHz es transforma en ultrasons i no ho fan la resta d'harmònics continguts del senyal quadrat.

TREBALL DE LABORATORI

2.2. Part experimental al laboratori

La part experimental d'aquesta sessió consistirà en el muntatge dels circuits astables i la verificació del senyal d'excitació generat. El muntatge i la validació experimental dels circuits es realitzarà soldant-los directament a la PCB.

2.2.1. Muntatge i caracterització del generador de 40 kHz

Soldeu el circuit astable dissenyat de la Figura 6, però utilitzant, en lloc de la resistència R_{52} de la figura, una resistència de $33\text{ k}\Omega$ (R_{52}) en sèrie amb una resistència ajustable feta amb un potenciómetre de $50\text{ k}\Omega$ (P_{51}) com es mostra en l'esquema de la PCB. D'aquesta forma, ajustant el cursor del potenciómetre podrem fixar la freqüència de l'astable al valor desitjat. Heu de soldar també el condensador C_{53} de desacoblament de l'alimentació.

Col·loqueu un *jumper* en la posició del connector **JP60** que faci que el *reset* del 555 estigui desactivat (pin 4 del circuit integrat 555 connectat a l'alimentació V_{DD}).

La sortida del generador podrà mesurar-se en el punt de test **J50**. Mesureu quin és el marge de la freqüència del senyal de sortida de l'astable quan es modifica la posició del cursor del potenciómetre.

Qüestió L2.1. Quina és la freqüència màxima que es pot aconseguir? I la freqüència mínima?

Ajusteu el cursor del potenciómetre P_{51} per aconseguir una freqüència de 40 kHz.

Qüestió L2.2. Presenteu la captura amb l'oscil·loscopi del senyal de sortida obtingut especificant els valors de les tensions i temps.

Qüestió L2.3. Quin és el cicle de treball d'aquest senyal?

2.2.2. Muntatge i caracterització del circuit patró de repetició de polsos

Soldeu a la PCB el circuit astable dissenyat de la Figura 7 que utilitza un altre integrat 555. En aquest cas, heu d'utilitzar en la posició R_{61} una resistència de $1\text{ k}\Omega$ (R_{61}) en sèrie amb una resistència ajustable feta amb un potenciómetre de $10\text{ k}\Omega$ (P_{61}) de la mateixa forma que ho heu fet en el circuit de l'apartat anterior. Heu de soldar també el condensador C_{63} de desacoblament de l'alimentació.

La sortida del generador podrà mesurar-se en un dels pins del connector **JP60** que heu d'identificar. Mesureu el senyal de sortida de l'astable quan es modifica la posició del cursor.

Qüestió L2.4. Presenteu la captura del senyal de sortida d'aquest circuit quan el cursor del potenciómetre està ajustat aproximadament a la meitat del seu recorregut. Especifiqueu els valors de les tensions i les durades en temps.

Ajusteu el cursor del potenciómetre fins obtenir una durada del pols del sortida igual al temps equivalent de 10 cicles del senyal de 40 kHz.

Qüestió L2.5. Quina és la durada del pols? Quina és la freqüència de repetició de polsos PRF?

2.2.3. Verificació del senyal d'excitació de la càpsula transmissora

Ara cal connectar el dos circuits anteriors per obtenir el senyal d'excitació que s'aplicarà a la càpsula transmissora. Com s'ha explicat en l'estudi previ d'aquesta sessió, una manera senzilla d'obtenir aquest senyal d'excitació és activant i desactivant l'astable que genera el senyal de 40 kHz de la Figura 6 amb el senyal de control generat pel circuit de la Figura 7.

Fiqueu el **jumper** en la posició del **connector JP60** que asseguri que es desconecta de la tensió d'alimentació el pin 4 de *reset* del circuit integrat 555 que genera els 40 kHz (circuit de la Figura 6) i que connecti aquest pin a la sortida del circuit que genera el senyal de control (circuit de la Figura 7).

Qüestió L2.6. Presenteu la captura del senyal de sortida de l'astable dels 40 kHz. Quina és la freqüència de repetició de les salves? Quants cicles hi ha a cada salva? Quina és la freqüència del senyal de la salva?

És possible que, al connectar els dos circuits astables, la freqüència s'hagi desajustat. Si és així, cal tornar a fer l'ajustament per a que la freqüència de la salva sigui exactament 40 kHz.

Per connectar el senyal d'excitació $V_{40\text{kHz}}$ a la càpsula transmissora, cal soldar el condensador **C₅₄** de 100 nF connectat en sèrie com es mostra en l'esquema del document "Esquema mesurador distància per ultrasons.pdf". Aquest condensador juntament amb la pròpia resposta freqüencial de la càpsula eliminan la component contínua i filtren el senyal quadrat per deixar passar solament la freqüència fonamental de 40 kHz i eliminan la resta d'harmònics. Mesureu el senyal detectat a la càpsula receptora quan s'apunta a un obstacle situat a 0,5 m de distància.

Qüestió L2.7. Presenteu la captura del senyal d'excitació de la càpsula emissora i del senyal detectat als terminals de la càpsula receptora quan s'apunta un obstacle situat a una distància de 0,5 m. Quina és l'amplitud i la freqüència de la salva?

3. SESSIÓ 3: MESURA DE TEMPS I INTEGRACIÓ DEL SISTEMA. VALIDACIÓ I AJUSTAMENT DEL MESURADOR.

En aquesta sessió estudiarem com es pot fer la mesura automàtica del temps de vol TOF i la seva presentació directament en forma de distància. Per tant, en la part experimental haureu d'integrar tots els circuits realitzats fins ara per fer funcionar el sistema de forma conjunta.

ESTUDI PREVI

3.0. Mesura de temps

La mesura de la distància es basa en comptar el temps TOF transcorregut entre l'emissió d'una salva d'ultrasons i la recepció del seu eco reflectit per l'obstacle del qual volem conèixer la distància a que es troba. Per tant, aquest temps s'inicia quan comença la salva d'excitació de la càpsula transmissora (sortida V_{PRF} del circuit de la Figura 7 de la sessió 2) i s'acaba quan en el detector de nivell (circuit de la Figura 4 de la sessió 1) comença un pols de sortida V_{comp} corresponent a la recepció d'un eco.

La mesura automàtica del temps TOF es pot fer comparant-lo amb un temps de referència ben coneugut. Aquesta referència s'anomena temps de rellotge ("clock" en anglès). Simplement cal comptar els cicles del *clock* que transcorren des de l'inici de la salva d'emissió fins l'arribada de l'eco. Per exemple, es poden comptar els flancs ascendents del senyal de rellotge com es mostra en la Figura 8.

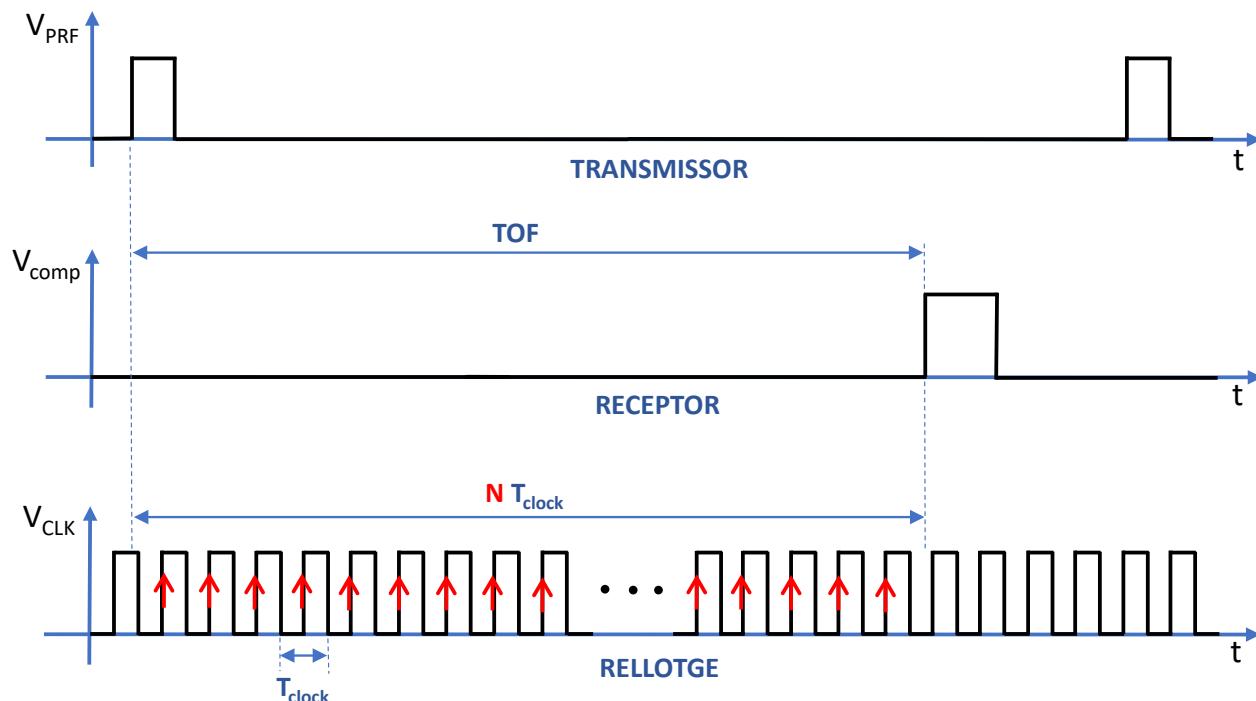


Figura 8. Mesura automàtica del temps de vol TOF.

D'aquesta figura pot obtenir-se que $TOF = N \cdot T_{clock}$ on N és el nombre de comptes o cicles de rellotge i T_{clock} és el període del senyal de rellotge. Noteu que es produeix un petit error en aquesta mesura de temps ja que ni l'inici ni el final d'aquest comptatge coincideixen exactament amb l'inici d'un cicle de *clock*. L'error màxim que cometem en la mesura del TOF pot quantificar-se com d'un T_{clock} tant en sentit positiu com negatiu. Per tant, quant major sigui la freqüència de *clock*, menor serà l'error en la mesura de temps.

El període del senyal de rellotge fixa el temps que val cada compte i, fent la conversió a partir de la velocitat dels ultrasons a l'aire, ens dona la distància a la que equival cada compte. Això significa que l'equivalent a un compte és la quantitat mínima de distància que podrem mesurar. La conversió del temps a distància es fa a partir de la velocitat de propagació dels ultrasons en l'aire (340 m/s).

Qüestió EP3.1. Calculeu quina ha de ser la freqüència del senyal de rellotge per a que cada compte equivalgui a 1 cm de distància a l'obstacle. Tingueu en compte que el camí recorregut per la salva d'ultrasons és dos cops la distància a l'obstacle.

3.1. Circuit electrònic de mesura del temps de vol TOF

3.1.1. Referència de temps amb un oscil·lador d'ona quadrada CMOS

Per generar el senyal de rellotge podríem utilitzar el mateix circuit astable de la Figura 6 de la sessió anterior basat en un circuit integrat temporitzador 555. No obstant, en aquesta sessió utilitzarem un altre circuit generador d'ona quadrada també molt freqüentment utilitzat, i que està basat en circuits integrats lògics inversors en tecnologia CMOS. En la Figura 9 es mostra aquest oscil·lador d'ona quadrada CMOS.

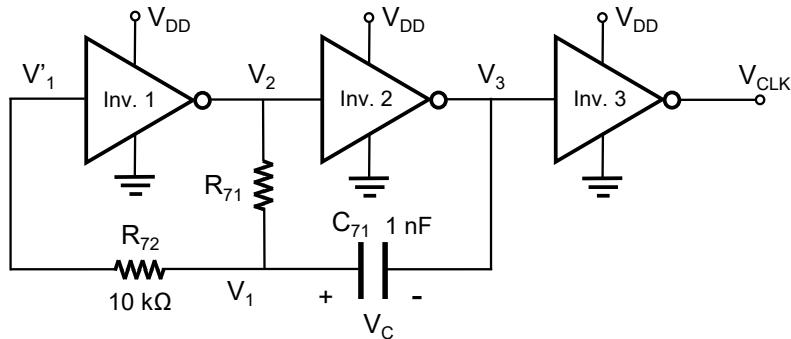


Figura 9. Oscil·lador d'ona quadrada basat en inversors CMOS.

Els circuits lògics que utilitzem en la construcció de l'oscil·lador són simples portes inversores (NOT) en tecnologia CMOS. El seu funcionament ve descrit per la relació entre l'entrada i la sortida de la Figura 10. Quan a l'entrada hi ha un "0" (tensió d'entrada menor a la meitat de la tensió d'alimentació V_{DD}), la sortida és un "1" (tensió de sortida igual a V_{DD}). Pel contrari, si a l'entrada hi ha un "1" (tensió d'entrada major a la meitat de la tensió d'alimentació V_{DD}) la sortida és un "0" (tensió de sortida de 0 V).

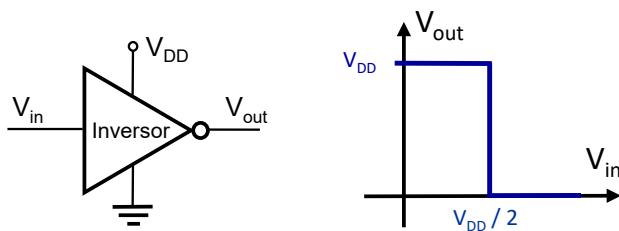


Figura 10. Funcionament de l'inversor CMOS.

Per entendre el funcionament de l'oscil·lador de la Figura 9, hem de fixar-nos en els inversors 1 i 2. L'inversor 3 serveix per evitar que el circuit que es connecti a la sortida no carregui l'oscil·lador i faci modificar la seva freqüència. La sortida de l'inversor 3, V_{CLK} , és

simplement el senyal de sortida de l'inversor 2 però invertit. El circuit té dos estats de funcionament entre els quals va commutant contínuament:

- 1) sortida V_2 de l'inversor 1 a "1" ($V_2 = V_{DD}$) que obliga la sortida V_3 de l'inversor 2 a "0" ($V_3 = 0 \text{ V}$) i,
- 2) sortida V_2 de l'inversor 1 a "0" ($V_2 = 0 \text{ V}$) que obliga la sortida V_3 de l'inversor 2 a "1" ($V_3 = V_{DD}$).

El canvi entre els dos estats es produeix quan la tensió a l'entrada de l'inversor 1 V_1 assoleix la tensió llindar de commutació ($V_{DD}/2$). La tensió V_1 és aproximadament igual a V_1 ja que el consum de corrent de l'inversor és menyspreable i, per tant, no hi ha caiguda de tensió en R_{72} . La finalitat de R_{72} és per protegir l'entrada de l'inversor enfront de les sobretensions per sobre de V_{DD} que es produeixen a V_1 (Figura 12).

Quan el circuit es troba en l'estat 1), el condensador es va carregant a través de la resistència R_{71} des de la sortida $V_2 = V_{DD}$ amb una constant de temps $\tau = R_{71}C_{71}$ tal com es mostra en la Figura 11a. L'evolució temporal de la tensió del condensador durant la càrrega ve donada per l'expressió:

$$V_C(t) = V_{DD} + [V_C(t_i) - V_{DD}] \cdot \exp\left(-\frac{t-t_i}{R_{71}C_{71}}\right) \quad (1)$$

Com que en aquest cas V_1 (fixeu-vos que $V_1 = V_C + V_3$) és directament igual a V_C ja que V_3 és zero, quan la tensió del condensador superi a $V_{DD}/2$, el circuit canviarà a l'altre estat. En canvi, quan el circuit es troba en l'estat 2), el condensador es descarrega cap a $-V_{DD}$ amb la mateixa constant de temps tal com es mostra en la Figura 11b. L'evolució temporal de la tensió del condensador durant la descàrrega ve donada per l'expressió:

$$V_C(t) = -V_{DD} + [V_C(t_i) + V_{DD}] \cdot \exp\left(-\frac{t-t_i}{R_{71}C_{71}}\right) \quad (2)$$

Al baixar de $V_{DD}/2$ la tensió V_1 , que ara és igual a la tensió V_C del condensador sumada a la tensió V_3 , el circuit també canvia d'estat.

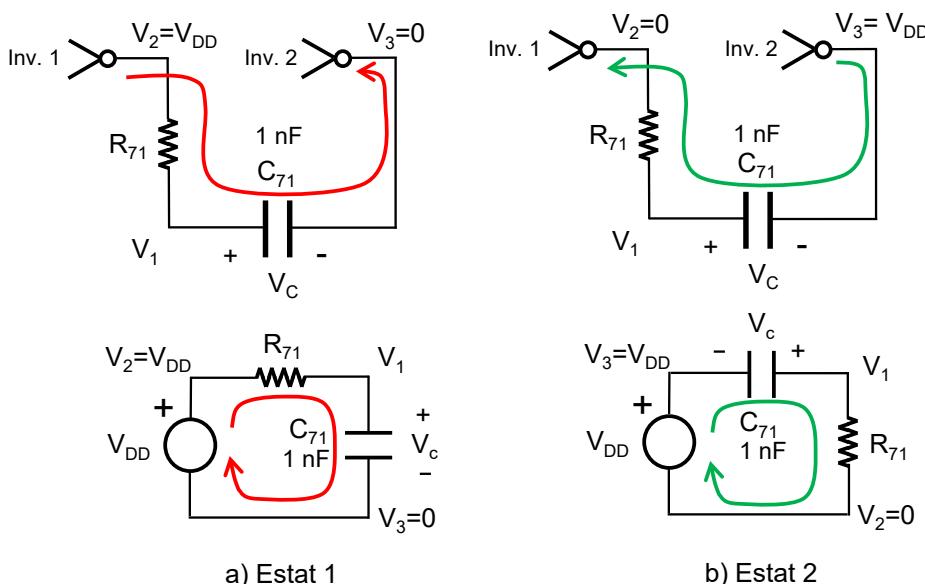


Figura 11. Estats de funcionament de l'oscil·lador CMOS.

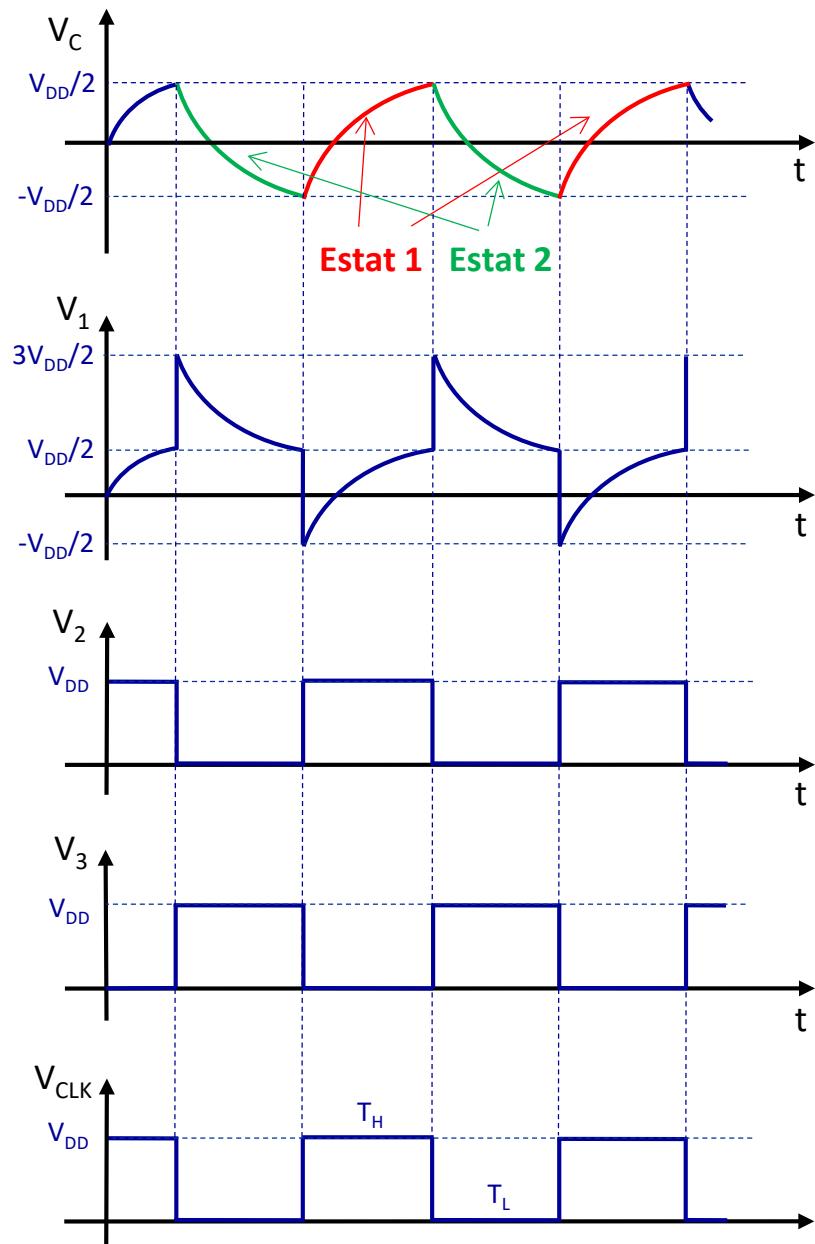


Figura 12. Evolució temporal dels senyals en l'oscil·lador d'ona quadrada CMOS.

L'evolució temporal de les tensions en els diferents punts del circuit es mostra en la Figura 12. En aquesta figura, s'observa que el valor inicial de la tensió $V_c(t_i)$ és $-V_{DD}/2$ a l'inici de l'estat 1) i aquesta tensió és $V_{DD}/2$ a l'inici de l'estat 2). Les tensions finals en cadascun d'aquests estats són $V_{DD}/2$ i $-V_{DD}/2$, respectivament.

Particularitzant qualsevol de les expressions (1) o (2) en el semiperíode corresponent pot obtenir-se l'expressió del període del senyal de sortida i, a partir d'ell, la freqüència d'oscil·lació.

Qüestió EP3.2. Doneu l'expressió del període i la freqüència del senyal de sortida.

Qüestió EP3.3. Tenint en compte que C_{71} és de 1 nF , calculeu quin és el marge de valors de R_{71} per poder ajustar la freqüència de l'oscil·lador entre 15 i 20 kHz.

3.1.2. Circuit comptador i de presentació de la mesura

La presentació del resultat de la mesura de la distància consisteix bàsicament en un circuit digital que compta el número de cicles del senyal de referència de temps i un display que presenta aquest número de comptes. L'inici del comptatge s'activa quan comença la salva d'excitació de la càpsula transmissora (activació de la sortida V_{PRF} del circuit de la Figura 7 de la sessió 2) i s'acaba quan es detecta l'eco pel detector de nivell (activació de la sortida V_{comp} del circuit de la Figura 4 de la sessió 1). La quantitat presentada en el display és directament la distància mesurada en centímetres ja que la freqüència del senyal de referència de temps s'ha calculat per a que cada cicle equivalgui a un centímetre de distància a l'obstacle.

Com que aquests circuits s'escapen dels continguts i objectius d'aquesta assignatura, en la part experimental utilitzareu el sistema ja muntat en una placa de circuit imprès que us deixaran al laboratori. Aquesta placa també ha d'alimentar-se a $V_{CC} = 12\text{ V}$.

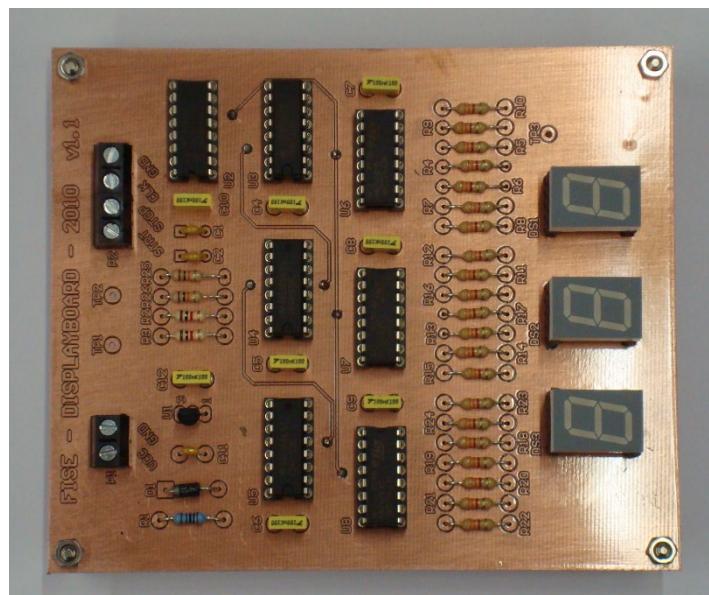


Figura 13. Fotografia de la placa de circuit imprès del comptador-display.

Podeu trobar l'esquema elèctric, diagrama de les connexions i informació addicional sobre aquest sistema a ATENEA en el fitxer "Circuit de mesura i presentació.pdf".

3.1.3. Condensadors de desacoblamet a massa de les tensions d'alimentació

Fins aquest moment de la pràctica heu analitzat i muntat diferents circuits que realitzen les diferents funcions necessàries per aconseguir mesurar la distància. Cadascun d'aquests circuits s'ha hagut d'alimentar mitjançant la font d'alimentació. En el nostre cas hem utilitzat la mateixa tensió d'alimentació per a tots els circuits ($V_{CC} = V_{DD} = 12\text{ V}$). I el que hem fet en cada punt d'alimentació dels circuits integrats és connectar-hi condensadors entre aquesta alimentació i massa.

El motiu és que el mateix funcionament intern dels circuits integrats fa que apareguin en els seus terminals d'alimentació senyals no desitjats, que encara que siguin petits, en alguns casos poden interferir en el funcionament d'altres circuits. S'anomenen interferències i els circuits que treballen amb senyals molt débils poden ser vulnerables a aquest problema. En canvi, els circuits que treballen amb senyals grans i canvis molt ràpids són font

d'interferències. En el nostre sistema, com que l'alimentació és comuna als diferents circuits, si en un circuit apareix una interferència, aquesta es propaga per l'alimentació cap a la resta. Els circuits de la part d'excitació (sessió 2) poden generar interferències i els circuits de la part de recepció (sessió 1) poden patir-ne els efectes.

Per aquest motiu és important netejar aquests senyals dels terminals d'alimentació del circuits integrats. La forma d'eliminar-los és derivant-los cap a massa mitjançant un condensador connectat des del terminal d'alimentació al terminal de massa d'aquell circuit. Aquest condensador s'anomena de desacoblament i és més efectiu quan més proper dels terminals d'alimentació del circuit integrat a protegir està connectat. L'ús de condensadors de desacoblament és molt habitual i per tant no és estrany veure'ls en la majoria de esquemes de circuits elèctrics connectats entre l'alimentació i massa. Des del punt de vista de la tensió contínua no fan res però en canvi, des del punt de vista de les tensions alternatives, les deriva totes cap a massa. La capacitat d'aquests condensadors acostuma a estar al voltant dels 100 nF en moltes aplicacions ja que desacobla correctament les interferències a les freqüències més habituals. No obstant, en alguns casos, com que el comportament d'un condensador pot canviar segons la freqüència de treball, inclús es connecten varis condensadors de diferents capacitats en paral·lel per desacoblar correctament marges de freqüències més grans.

TREBALL DE LABORATORI

3.2. Part experimental al laboratori

3.2.1. Muntatge i caracterització del generador de referència de temps

Munteu a la protoboard el circuit oscil·lador CMOS de la Figura 9 dissenyat. **Aquest circuit no està inclòs en la PCB.** Heu d'utilitzar el circuit integrat CD4049 que conté 6 portes lògiques inversores CMOS. L'alimentació d'aquest circuit també és de $V_{DD} = 12\text{ V}$. Tingueu en compte que en el cas dels circuits realitzats en tecnologia CMOS, la tensió d'alimentació positiva s'acostuma a anomenar V_{DD} i la massa s'ha de connectar al terminal anomenat V_{SS} . Els subíndex corresponen a les inicials de drenador i sortidor. Afegiu un condensador de desacoblament de 100 nF entre els pins d'alimentació i massa del circuit integrat.

En la posició R_{71} heu de connectar una resistència de $22\text{ k}\Omega$ en sèrie amb una resistència ajustable feta amb un potenciómetre de $10\text{ k}\Omega$ com es mostra en la Figura 14. D'aquesta forma ajustant el cursor del potenciómetre podrem fixar la freqüència de l'astable al valor desitjat.

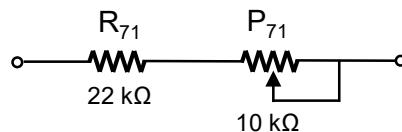


Figura 14. Resistència R_{71} i potenciómetre P_{71} per a l'ajustament de la freqüència de l'oscil·lador CMOS.

Mesureu quin és el marge de la freqüència del senyal de sortida de l'astable quan es modifica la posició del cursor.

Qüestió L3.1. Quina és la freqüència màxima que es pot aconseguir? I la freqüència mínima?

Ajusteu la freqüència de l'astable a 17 kHz.

Qüestió L3.2. Presenteu la captura amb l'oscil·oscopi del senyal de sortida obtingut especificant els valors de les tensions i les durades dels semiperíodes.

Qüestió L3.3. Quin és el cicle de treball d'aquest senyal?

3.2.2. Integració de tot el sistema

En aquest apartat, l'objectiu és fer funcionar tot el sistema conjuntament mostrant la distància mesurada en centímetres directament en el display del circuit comptador i de presentació de la mesura. En el Tal com s'ha explicat en l'apartat 3.1.3, totes les alimentacions dels circuits integrats han de tenir condensadors de desacoblament per evitar que apareguin interferències indesitjades que afectin el funcionament del sistema. Afegiu el condensador de desacoblament de 100 nF a l'alimentació del circuit generador de rellotge si encara no ho heu fet.

Assegureu que el funcionament de la PCB és correcte. Visualitzeu la sortida V_{PRF} (pols d'inici de la salva d'excitació) en un canal de l'oscil·oscopi i visualitzeu la sortida V_{comp} (pols d'arribada de l'eco) per comprovar que el temps de vol TOF correspon a la distància entre les càpsules i l'obstacle.

Per millorar el funcionament del mesurador, heu de ajustar la freqüència de la salva

d'excitació a exactament 40 kHz per maximitzar la potència emesa per la càpsula transmissora.

Per una altra banda, l'ajustament del llindar del detector de nivell al valor més baix possible sense que apareguin falsos ecos, augmentarà l'abast màxim del mesurador. Aquest ajustament pot fer-se apuntant un obstacle fixe i canviant la posició del cursor, fent que la durada del pols corresponent a l'eco augmenti però sense que apareguin falsos ecos al davant.

Comproveu que la freqüència del senyal de sortida **V_{CLK}** del circuit generador de rellotge està ajustada a 17 kHz.

Heu de connectar les sortides **V_{PRF}** (pols d'inici de la salva d'excitació) i **V_{comp}** (pols d'arribada de l'eco) de la PCB, i de la sortida **V_{CLK}** del circuit generador de rellotge, que heu muntat a la protoboard, a les entrades de la placa del comptador de cicles i presentació de la mesura:

- 1) Alimenteu la placa de circuit imprès de comptador-display a $V_{cc} = 12\text{ V}$.
- 2) Connecteu la sortida del generador de referència de temps **V_{CLK}** a l'entrada de rellotge **CLK** de la regleta de connexions P2 de la placa de circuit imprès (entrada del senyal del qual es comptaran els cicles).
- 3) Connecteu la sortida del generador del patró de repetició de polsos **V_{PRF}** a l'entrada **START** de la regleta de connexions P2 de la placa de circuit imprès (ordre d'inici del comptatge).
- 4) Connecteu la sortida del detector de llindar **V_{comp}** a l'entrada **STOP** de la regleta de connexions P2 de la placa de circuit imprès (ordre de final de comptatge).

Apunteu amb les càpsules a diferents obstacles comprovant si la presentació en el display correspon amb la distància que separa les càpsules de l'obstacle.

Qüestió L3.4. Presenteu les captures amb l'oscil·loscopi del senyal de START i del senyal de STOP per a les distàncies de 0,5 m i 1 m. Quines són les lectures del display que obtenuï amb el vostre mesurador quan la distància és de 0,5 m i 1 m?

Qüestió L3.5. Quin és l'abast del vostre mesurador de distància?

LLISTA DE COMPONENTS

La llista de components necessaris en les Pràctiques 4 i 6 és la següent:

| QUANTITAT | COMPONENT | |
|-----------|---|---|
| 1 | PCB USoundBoard |  |
| 1* | CÀPSULA TRANSMISSORA ULTRASONS MCUST16P40B12RO |  |
| 1* | CÀPSULA RECEPTORA ULTRASONS MCUSR16P40B12RO |  |
| 2* | AMPLIFICADORS OPERACIONALS TLC082 DIP-8 |  |
| 2* | TIMERS NE555 DIP-8 |  |
| 1* | CD4049 HEX INVERTING BUFFER |  |
| 3 | DÍODES 1N4148 |  |
| 2 | FAMÍLIES COMPLETES RESISTÈNCIES 5% 1/4W de 100Ω a 1MΩ |  |
| 3 | POTENCIÒMETRES PT-10 LH 10kΩ |  |
| 1 | POTENCIÒMETRE PT-10 LH 50kΩ |  |
| 2 | CONDENSADORS ELECTROLÍTICS 25V 10µF |  |
| 2 | CONDENSADORS ELECTROLÍTICS 25V 1µF |  |
| 1 | CONDENSADOR POLIÉSTER MKT 63V 220nF |  |
| 10 | CONDENSADORS POLIÉSTER MKT 63V 100nF |  |
| 5 | CONDENSADORS POLIÉSTER MKT 63V 10nF |  |
| 1 | CONDENSADOR CERÀMIC 1nF |  |
| 1 | CONDENSADOR CERÀMIC 330pF |  |
| 4 | SÒCOLS PER A CIRCUIT INTEGRAT DE 8 PINS |  |
| 3 | CONNECTORS MASCLES D'1 FILA I 2 VIES DE 2,54 mm |  |
| 2 | CONNECTORS MASCLES DE 2 FILES I 2 VIES DE 2,54 mm |  |
| 1 | CONNECTOR MASCLE DE 3 FILES I 2 VIES DE 2,54 mm |  |
| 10 | PUNTS DE TEST: Longitud 4,65 mm. Diàmetre 1,3 mm |  |
| 5* | JUMPERS DE DUES VIES 2,54 mm |  |
| 1* | TORNAVÍS PETIT (per ajustar potenciòmetres) |  |

Tot el material, PCB i components, el guardareu sempre en la caixa en la que escriureu els vostres noms, i que deixareu en el lloc del tècnic de laboratori en finalitzar cada sessió. **Aquesta caixa amb els components assenyalats amb un asterisc s'hauran de retornar quan s'acabi el curs.**