

## **Treball final de grau**

**Estudi: Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica**

**Títol: Desenvolupament d'un anemòmetre basat en ultrasons**

**Document:** 1. Memòria

**Alumne:** Sohayb Azibou-Mokrai Nabrisi-Bakkioui

**Tutor:** Lluís Pacheco Valls

**Departament:** Arquitectura i Tecnologia de Computadors

**Àrea:** Arquitectura i Tecnologia de Computadors

**Convocatòria (mes/any):** juny/2018

## ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ.....	3
1.1. Antecedents .....	3
1.2. Objecte .....	3
1.3. Especificacions i abast .....	4
2. ANEMÒMETRES ULTRASÒNICS.....	5
2.1. Tècniques de mesura velocitat del vent.....	5
2.1.1. Temps de vol.....	5
2.1.2. Desplaçament de fase .....	5
2.2. Tipus d'anemòmetres ultrasònics .....	6
2.2.1. Anemòmetre de ressonància acústica .....	6
2.2.2. Anemòmetre ultrasònic del tipus emissor-receptor .....	7
2.3. Càlcul velocitat del vent .....	9
2.4. Factors ambientals .....	10
3. SENSOR ULTRASÒNIC .....	12
3.1. Paràmetres del sensor ultrasònic.....	12
3.2. Sensor 400PT160.....	14
3.3. Proves sensor 400PT160 .....	15
3.3.1. Amplitud senyal .....	15
3.3.2. Número polsos .....	16
3.4. Mesura del temps de vol.....	18
3.5. Distància de separació i altura sensors.....	19
4. DISSENY ELECTRÒNIC .....	21
4.1. Microcontrolador.....	21
4.1.1. Característiques .....	22
4.1.2. Comptador.....	22
4.1.3. Resolució .....	23
4.2. Multiplexació.....	24
4.3. Filtratge, amplificació i detector creuant per zero .....	27
4.4. Pantalla LCD .....	31
4.5. Alimentació .....	32
5. PROGRAMACIÓ.....	33
5.1. Interrupcions Atmega 328.....	33
5.2. Generació senyal PWM.....	35
5.3. Mesura temps de vol .....	36
5.4. Tractament de dades i multiplexació.....	38

6.	RESULTATS I COMPROVACIONS .....	41
6.1.	Ventilador domèstic 45 W .....	41
6.2.	Ventilador industrial 3,5 kW .....	45
7.	RESUM DEL PRESSUPOST .....	49
8.	CONCLUSIONS.....	50
9.	RELACIÓ DE DOCUMENTS .....	52
10.	BIBLIOGRAFIA .....	53
11.	GLOSSARI .....	55
A.	PROGRAMARI .....	56
B.	ESPECIFICACIONS ANEMÒMETRE ULTRASÒNIC .....	63

## **1. INTRODUCCIÓ**

### **1.1. Antecedents**

A dia d'avui en molts àmbits es requereix de sistemes que mesurin la velocitat del vent i amb el temps cada vegada es tendeix a millorar-los per obtenir unes dades més precises. Els camps d'aplicació de l'anemometria són molt diversos: edificis industrials, mineria, meteorologia, construcció de túnels i ponts, aviació, navegació o l'energia eòlica entre molts altres.

Un dels sistemes més simples i més utilitzats han sigut els anemòmetres de cassoletes i d'hèlix que estan formats per peces mecàniques i que la seva mesura ve determinada per la velocitat en que gira la part exposada al vent. Aquest tipus d'anemòmetres mecànics fan que les seves parts mòbils tinguin un desgast amb el temps, causant d'una pèrdua significativa de la precisió en la mesura i requereixen d'un calibratge periòdic. D'altra banda tenim alternatives d'anemòmetres que no tenen parts mòbils com és l'anemòmetre de fil calent, els de làser o els ultrasònics.

### **1.2. Objecte**

Es redacta el present projecte amb l'objecte de dissenyar i implementar un anemòmetre basat en sensors ultrasònics del tipus dual, emissor i receptor. El sistema serà capaç de mesurar la velocitat del vent a partir de la mesura del temps que tarda una ona enviada des d'un transductor (emissor) cap a un altre encarat a aquest i situat a un distància de separació determinada (receptor), aquest temps és l'anomenat temps de vol i a partir d'aquesta mesura es determinarà la velocitat del vent. Amb el mateix sistema es calcula la direcció del vent amb el càlcul del temps de vol dels quatre sensors col·locats en les direccions nord, sud, est i oest.

Per tal d'obtenir aquestes dades es mesurarà el vent de manera alternada en els quatre sensors i en els dos sentits per cada parella de sensors, en un temps òptim per tal de que l'anemòmetre ens proporcioni la informació del vent amb una freqüència acceptable.

L'anemòmetre haurà de donar la velocitat del vent en els dos eixos i la direcció respecte un eix de referència amb un temps de resposta total adequat per la interpretació dels resultats en temps real o per un tractament posterior de les dades.

### **1.3. Especificacions i abast**

Es tindrà en compte la influència de factors ambientals com la temperatura en la velocitat del so en l'aire i es dissenyarà una estructura de suport dels sensors i de la part electrònica estable, fixe i segura per tal d'obtenir uns resultats amb la màxima precisió.

En el disseny final de l'anemòmetre es prioritzarà que tingui unes dimensions i un pes adequat per tal que el seu transport i instal·lació el facin apte en múltiples aplicacions. També s'hauran de fer les comprovacions pertinents per cada component per determinar la seva aptitud en la nostra aplicació i ens garanteixin un correcte funcionament.

Les dades finals que ha de proporcionar l'anemòmetre seran visualitzades en una pantalla LCD i amb l'opció de poder enviar-les per port sèrie en cas que es vulgui prescindir de la pantalla.

També es faran proves amb diferents intensitats de vent i una comparació amb un altre tipus d'anemòmetre comercial per tal de comprovar el correcte funcionament de l'anemòmetre desenvolupat en diverses condicions de vent i la veracitat i precisió de les dades que proporciona.

## **2. ANEMÒMETRES ULTRASÒNICS**

En aquest capítol es fa una breu explicació sobre els principals tipus d'anemòmetres ultrasònics, així com les diverses tècniques utilitzades per calcular la velocitat del vent, les fórmules que intervenen en el disseny que escollim i els factors ambientals que influeixen en el so.

### **2.1. Tècniques de mesura velocitat del vent**

Per mesurar la velocitat del vent a partir de sensors ultrasònics tenim varis mètodes, els dos més comuns es presenten en aquest apartat.

#### **2.1.1. Temps de vol**

És la tècnica més utilitzada per la mesura de distàncies amb sensors ultrasònics i la mesura de velocitat del vent. En el cas de la mesura de distàncies es mesura el temps de retorn del rebot de la ona enviada en l'objecte a mesurar, en canvi en els anemòmetres es mesura el temps que tarda en anar de l'emissor al receptor.

Un dels avantatges que presenta aquesta tècnica en el cas dels anemòmetres és la rapidesa amb la que s'adquireix la mesura ja que s'obté el resultat un cop ha arribat la ona al receptor i no cal analitzar la ona rebuda com es fa al següent subapartat, i tampoc cal enviar al receptor molts polsos fet que suposarà un estalvi de temps en la mesura.

En el desenvolupament del nostre anemòmetre optem per aquesta tècnica ja que suposa tenir un programa més simple i poder adquirir les dades amb molta rapidesa, fets que fan que puguem fer un filtratge de les dades i alhora enviar-les amb una freqüència adequada per la seva posterior manipulació i interpretació.

#### **2.1.2. Desplaçament de fase**

En aquesta tècnica no només busquem enviar un feix d'ones ultrasòniques sinó un senyal d'una duració òptima per tal que el receptor compari el senyal rebut amb un senyal de referència igual al transmès podent així mesurar la diferència de fase entre els dos senyal i saber la velocitat del vent.

El desplaçament de fase pot expressar-se en funció de la velocitat segons la següent expressió:

$$\varphi = \frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot f}{c} \quad (\text{Eq. 1})$$

on:

d: distància de separació entre emissor i receptor

f: freqüència del senyal enviat a través de l'emissor

c: velocitat del so

$\varphi$ : desplaçament de fase

Aquesta tècnica presenta l'avantatge de poder fer una mesura molt més precisa del temps de vol però alhora presenta inconvenients per determinar en quin número de ona estem comparant en cas que hàgim passat per alt alguna ona i el recompte final no ens quadri. També requereix d'un temps major per obtenir les dades de la velocitat del vent ja que s'ha d'enviar un senyal de major duració i l'anàlisi del mateix senyal al receptor necessita d'un temps afegit respecte a la tècnica anterior. Un dels altres problemes que pot donar aquesta tècnica és que el temps d'establiment (veure subapartat 3.1) que tenen els sensors, fa que al receptor tinguem un senyal de major duració que el real, fet que pot provocar un error en la determinació del desplaçament de fase.

Tot i que aquesta tècnica ofereix resultats més precisos alhora també ens pot portar a una major probabilitat d'errors i haver d'implementar un programa i un circuit electrònic més complex, per això descartem aquesta tècnica i optem per l'anterior en la nostra aplicació.

## **2.2. Tipus d'anemòmetres ultrasònics**

Des del sorgiment de la tecnologia d'ultrasons aplicada a la anemometria s'han fet varis dissenys de diverses alternatives per tal d'obtenir dades més precises que podríem classificar de manera general en dos grans grups.

### **2.2.1. Anemòmetre de ressonància acústica**

Aquest tipus d'anemòmetres estan formats per dos plaques separades, on una és la que conté els sensors ultrasònics i l'altre serveix com a reflector, d'aquesta manera l'aire que passa en

l'espai entre les dues plaques provoca un canvi en la ona reflectida que és analitzada a partir del desplaçament de fase que aquesta pateix.

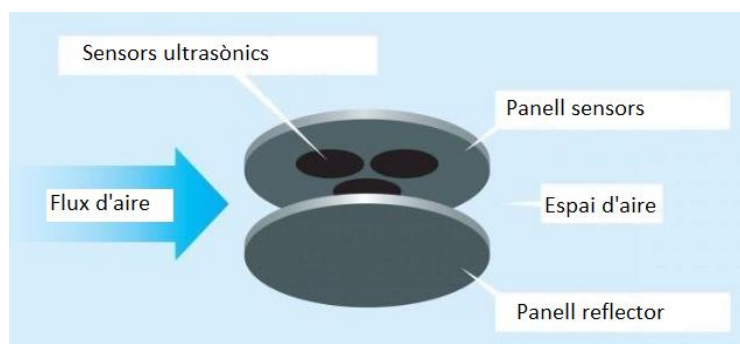


Figura 1. Esquema anemòmetre ultrasònic reflector

Quan es mesura el valor del desplaçament de fase de les senyals rebudes per cadascun dels transductors el sistema és capaç de proporcionar una mesura horitzontal precisa de la velocitat i direcció del vent.

Els avantatges que presenten aquest tipus d'anemòmetres és la seva mida ja que ocupen menys espai que la majoria i es veuen menys afectats pel flux del vent en la seva estructura ja que el vent circula de manera més lliure en l'espai que hi ha entre les dues plaques. D'altra banda a nivell de desenvolupament aquest tipus de sistemes és més complicat ja que utilitza un algoritme més complex per obtenir la velocitat del vent i requereix d'una estructura més elaborada degut a l'angle d'inclinació que han de tenir els diversos sensors ultrasònics que el conformen.

En el nostre anemòmetre descartarem aquesta model ja que la precisió que ens ofereix és la mateixa que pot arribar a tenir el model que expliquem a continuació que resulta més fàcil a l'hora d'implementar tan a nivell de muntatge com de programari.

### 2.2.2. Anemòmetre ultrasònic del tipus emissor-receptor

Aquest tipus d'anemòmetres està conformat per parelles de sensors ultrasònics del tipus dual (emissor i receptor) que es basen en la mesura del temps de vol d'una ona ultrasònica des de l'emissor fins al receptor. Aquests sistemes són els més utilitzats i dins d'aquests trobem moltes variants a nivell d'estructura, d'algoritmes de càlcul i col·locació dels sensors tot i que el més comú és el que està conformat per quatre sensors col·locats en braços simètrics i separats un certa distància.



Aquest anemòmetre ofereix també la mesura de la velocitat i la direcció del vent amb una precisió elevada i amb una resolució de fins a 0,01m/s en models comercials, però un dels inconvenients que té és que els braços on són col·locats els sensors influeixen en el flux de l'aire provocant turbulències aerodinàmiques que causen una falta de precisió en la mesura final.

Es fa el càlcul utilitzant cada un dels sensors com a emissors i receptors de manera alternada, variant el sentit i la direcció de la mesura per tal d'obtenir les dades de les quatre mesures (dos per cada eix).



Figura 2. Gill WindObserver 65

Un dels altres tipus d'estructura que hi ha són els anemòmetres formats per tres sensors ultrasònics col·locats de manera que formen un triangle, on sempre tenim un emissor i dos receptors.

El fet que hi hagi dos receptors fa que tinguem una mesura més precisa i es redueixen les turbulències aerodinàmiques. D'altra banda requereix d'un programari i un circuit per processar les dades més complexos, ja que l'arribada del senyal és simultània en dos sensors i per tant requereix de dos circuits de condicionament, fets que el fan una alternativa més cara que la resta.

Tot i que els dos principals models són els anteriors, dins d'aquest grup d'anemòmetres ultrasònics podem trobar molts dissenys on es canvia la posició dels diferents sensors en funció del camp d'aplicació on el vulguem utilitzar o les prestacions que pot arribar a donar en termes de resolució o precisió.

### 2.3. Càlcul velocitat del vent

En l'apartat anterior especificuem el model d'anemòmetre que es porta a terme en aquest projecte, no obstant a continuació expliquem les fórmules que intervenen en el nostre model per obtenir la velocitat final del vent i la seva direcció.

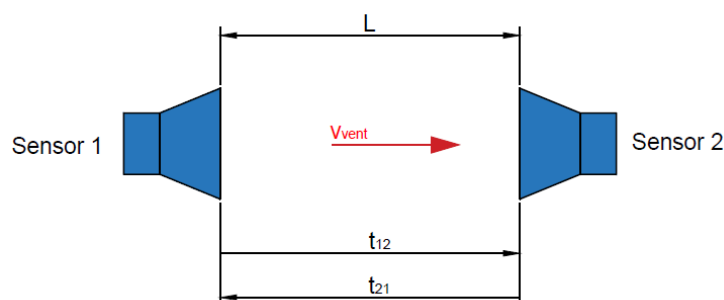


Figura 3. Temps de vol i velocitat del vent en un eix

En la figura anterior observem els temps de vol en els dos sentits en el cas de que el sensor 1 funcioni com a emissor ( $t_{12}$ ) o el sensor 2 funcioni com a emissor ( $t_{21}$ ). La distància,  $L$ , és la distància de separació que hi ha entre els dos transductors i prenent com a sentit positiu el sentit d'emissió del so obtenim les següents fórmules:

$$t_{12} = \frac{L}{c + V_{\text{vent}}} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$t_{21} = \frac{L}{c - V_{\text{vent}}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Fent la combinació de les dues equacions anteriors obtenim la equació final que determina el valor de la velocitat del vent:

$$V_{12} = V_{\text{vent}} = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

L'equació anterior a diferència de les altres dues és independent de la velocitat del so i per tant dels paràmetres que la afecten (temperatura, pressió, humitat, etc), per això, utilitzant aquesta última equació el nostre sistema no requereix d'informació sobre l'ambient exterior a excepció de la distància de separació de cada eix que ha de ser constant i la més precisa possible per evitar una falta de precisió en el resultat final.

Utilitzant les mateixes equacions d'abans aplicades per l'altre eix obtenim la velocitat en l'altre direcció ( $V_{34}$ ).

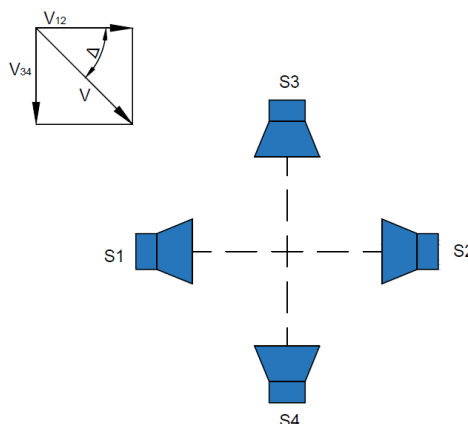


Figura 4. Velocitats de cada eix i angle direcció

Partint de la figura anterior i les velocitats de les dues direccions es troba l'angle que forma el vector  $V$ , velocitat del vent, respecte l'eix 1-2 que d'aquí endavant anomenem eix EO.

$$\Delta = \tan^{-1} \left( \frac{V_{34}}{V_{12}} \right) \quad (\text{Eq. 5})$$

Amb aquestes equacions obtenim les dues velocitats en els dos eixos i la direcció respecte un eix, de manera independent a la velocitat del so, només utilitzant els temps de vol i les distàncies de separació. Alhora també s'anul·len els retards que produeix el nostre sistema (microcontrolador, circuit de filtratge...) ja que es fa la diferència dels dos sentits en cada eix on el retard produït per l'electrònica és manté pràcticament constant en cada mesura i per tant s'acaben restant entre ells.

A partir d'aquestes equacions determinem la velocitat del vent tenint en compte que les mesures dels temps de vol en els dos sentits han de ser consecutives i les més ràpides possibles per tal d'obtenir el valor més precís.

## 2.4. Factors ambientals

La velocitat del so varia en funció del medi en el que es transmet, en el nostre cas el medi és l'aire però també cal tenir en compte altres factors ambientals que influeixen de manera significativa en la velocitat del so. El factor ambiental més important a tenir en compte en

aquest tipus d'aplicacions és la temperatura, que té una relació directa amb la velocitat del so tal com es veu a l'aproximació següent:

$$c_{\text{aire}} = (331,3 + 0,606 \cdot \vartheta) \quad (\text{Eq. 6})$$

L'equació anterior ens mostra la variació de la velocitat del so en l'aire en funció de la temperatura en graus centígrads ( $\vartheta$ ) ja que un augment de temperatura es tradueix en l'augment de la freqüència amb la que es produeixen les interaccions entre les partícules que transporten la vibració i aquest augment d'activitat fa que augmenti la velocitat. També cal afegir que les fluctuacions grans de temperatura dins els camí que recorre la ona ultrasònica poden causar dispersió i refracció del senyal ultrasònic però en el nostre cas aquesta última consideració no és important ja que la separació entre l'emissor i receptor no és molt gran.

La humitat en menor mesura també influeix en la velocitat del so, fent que el senyal sigui atenuat a mesura que la humitat s'augmenta, sobretot en el cas de freqüències elevades. Tot i així la influència de la humitat en la nostra aplicació és insignificant ja que un augment del 50% de la humitat relativa només significa un canvi del 0,18% en la velocitat del so.

En aplicacions on es fa servir el mètode del desplaçament de fase descrit anteriorment, si que requereix la incorporació de sensors de temperatura per tal de determinar la velocitat del so amb exactitud, però en el cas de la mesura del temps de vol no fa falta saber la temperatura de l'aire ja que com hem comprovat a l'apartat anterior aquest paràmetre no intervé en el càlcul.

D'altra banda a temperatures molt baixes per sota de zero o molt altes el temps per fer la mesura de la velocitat del vent variarà i per tant la freqüència amb la que enviem les dades es pot veure alterada.

### 3. SENSOR ULTRASÒNIC

En aquest capítol fem una breu explicació dels paràmetres del tipus de sensor ultrasònic que utilitzarem i diverses proves que serveixen per determinar si el sensor que escollim és l'adient per la nostra aplicació abans de seguir amb el disseny final de l'anemòmetre.

#### 3.1. Paràmetres del sensor ultrasònic

Els sensors ultrasònics són aquells basats en l'efecte piezoelèctric és a dir que converteixen les deformacions causades per una força externa en una diferència de potencial elèctric i alhora de manera inversa produint un senyal ultrasònic. Els paràmetres més importants que hem de tenir en compte per la nostra aplicació i que determinen l'elecció d'un sensor s'expliquen al llarg d'aquest apartat.

Els sensors ultrasònics tenen una zona morta en la qual no poden detectar cap objecte, aquesta és la distància entre la membrana del sensor i el mínim rang de sensibilitat. En la nostra aplicació la distància de la zona morta ens servirà com a referència per determinar la distància mínima de separació entre els dos transductors encarats. En el cas d'aplicacions per detecció d'objectes o mesura de distàncies amb ultrasons aquest paràmetre és molt important en sistemes que requereixen molta precisió a curta distància ja que determinen la distància mínima a la que s'ha de trobar un objecte.

A diferència del paràmetre anterior el màxim rang sensible ens indica la distància màxima entre els dos transductors que no hauríem de superar per tal que el receptor rebi un senyal adequat.

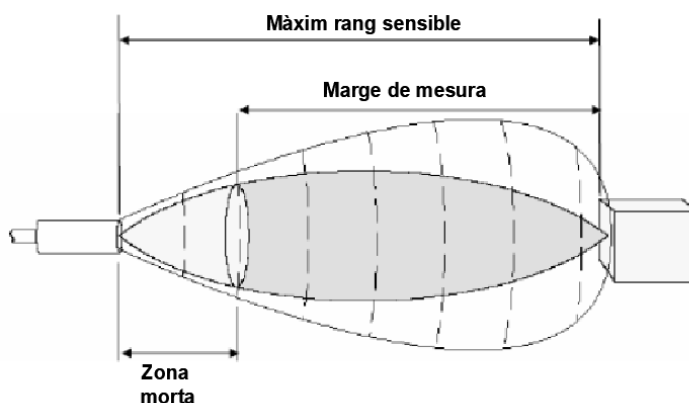


Figura 5. Zona morta i màxim rang sensible transductor ultrasònic

L'angle del con d'emissió d'un sensor ultrasònic està format pels punts de l'espai en els que el senyal del sensor és atenuat com a mínim 3dB, fora d'aquest con el senyal que existeix es molt més dèbil. És a dir les ones enviades pel transmissor no es transmeten en línia recta sinó que es genera un senyal que s'expandeix formant un con. En aquesta aplicació com els sensors estan encarats l'angle d'emissió ha de ser suficientment gran com per arribar a l'altre costat alhora que no ens arribi als altres sensors i ens introdueixi soroll al sistema.

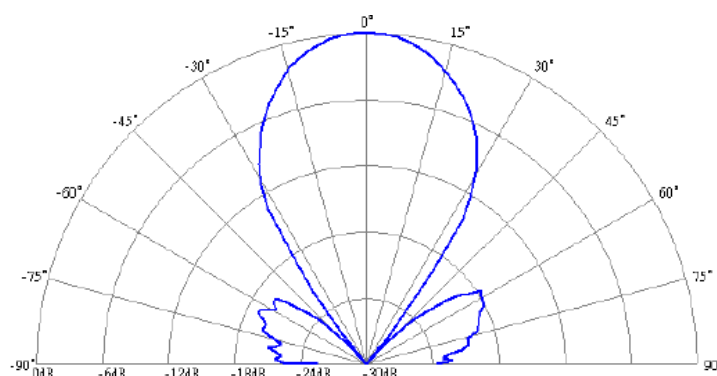


Figura 6. Gràfic angle d'emissió transductor ultrasònic

La freqüència de disparament d'un transductor ultrasònic és la freqüència central a la que es recomana la seva activació, com més gran és la freqüència de disparament aconseguim un sistema amb més resolució. D'altra banda el preu dels transductors augmenta a mesura que la freqüència és major i fa necessaris de sistemes que generin senyals d'una freqüència major.

La impedància del transmissor ultrasònic varia amb la freqüència d'operació i la temperatura en menor mesura en funció del tipus de construcció del sensor. En general en freqüències aproximadament d'una dècima d'octava dels dos costats de la freqüència central el transmissor actua com un condensador. A mesura que s'acosta a la freqüència central la caiguda de tensió disminueix i el corrent augmenta proporcionalment. Quan el transmissor està en la freqüència central aquest actua com una resistència pura. En cas que de freqüències superiors a la freqüència de ressonància la caiguda de tensió assoleix un pic definit com a freqüència antiressonant, durant aquesta transició el transmissor té una característica inductiva.

El temps d'establiment ("ringing") és el temps que transcorre des de que es deixa d'emetre el senyal d'excitació a la entrada del transmissor fins que realment es deixa d'enviar a la sortida del mateix transmissor. El mateix fenomen però de manera molt més atenuada també succeeix en el receptor sumant-se al senyal ja modificat enviat pel receptor. Aquest paràmetre marcarà el disseny del nostre sistema per evitar tornar a aplicar voltatge en el transmissor

quan encara estem dins el temps d'establiment i aquest encara esta enviant un senyal més atenuat. De la mateixa manera el disseny haurà de contemplar aquest paràmetre pel receptor per saber quan tornar a rebre un senyal assegurant-nos que hem sortit del temps d'establiment de la ultima recepció.

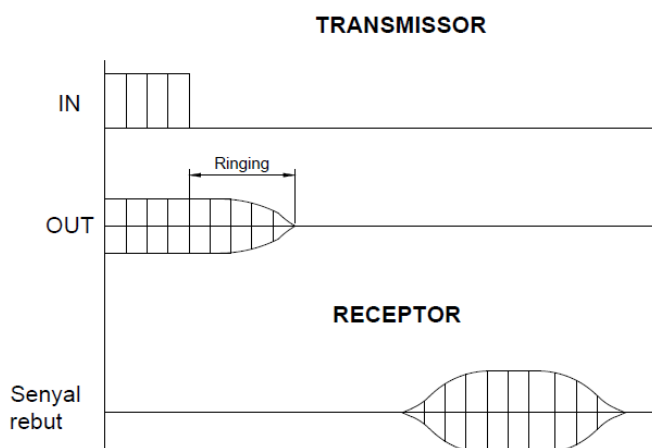


Figura 7. Temps d'establiment transductor ultrasònic

I en últim lloc cal destacar que el nivell de pressió sonora determina la intensitat del so que genera una pressió sonora, i serveix per saber la intensitat del so en el receptor en funció de la distància de separació entre els dos sensors. Paral·lelament en el costat receptor el paràmetre de sensibilitat receptora indica la sensibilitat del receptor a rebre el senyal del transmissor, però en aquest cas s'expressa en decibels i amb un numero negatiu.

### 3.2. Sensor 400PT160

En funció dels paràmetres descrits anteriorment s'agafa el sensor ultrasònic 400PT160 del tipus dual (emissor i receptor) de les característiques següents:

Paràmetre	Valor
Freqüència central [kHz]	40,00
Nivell de pressió sonora mínim (transmissor) [dB]	117,00
Sensibilitat receptora mínima [dB]	-65,00
Impedància nominal [ $\Omega$ ]	1.000,00
Temps d'establiment màxim [ms]	1,20
Voltatge màxim d'alimentació [Vrms]	20,00
Angle total d'emissió [°]	40,00
Zona morta [cm]	20,00

Taula 1. Característiques sensor 400PT160

Aquest tipus de sensors són els més utilitzats en la majoria d'aplicacions pel seu baix cost i característiques de funcionament. El fet que sigui de 40 kHz fa que no es requereixi d'un sistema de generació de polsos molt complex i es pugui arribar a generar els polsos amb un microcontrolador. D'altra banda el voltatge d'alimentació abasta un rang bastant ample, paràmetre que ens permetrà no requerir de circuits d'amplificació del senyal de generació.

Pel que fa la zona morta teòricament hauríem de respectar una distància mínima entre els sensors de 20 cm i a mida que anem allunyant els sensors el voltatge del receptor anirà disminuint en funció del voltatge que utilitzem pel senyal d'emissió.

Els paràmetres de nivell de pressió sonora i sensibilitat receptora han sigut un dels més importants per escollir els sensors juntament amb el seu mode de funcionament (dual), ja que aquest determinen la distància a la que s'han de trobar els sensors encarats i la qualitat del senyal rebut al costat de recepció, és per això que aquest model de sensor es situa lleugerament per sobre a nivell de preu de la resta de sensors del mateix tipus.

### **3.3. Proves sensor 400PT160**

Per comprovar que el sensor escollit és el correcte per la nostra aplicació es fan dues proves per comprovar el seu funcionament i determinar amb quin tipus de senyal funciona millor. Per això determinarem l'amplitud òptima a enviar al transmissor i el numero de polsos amb el que ens dóna millors resultats.

#### **3.3.1. Amplitud senyal**

Per aquesta prova utilitzem un generador de funcions per generar el senyal al receptor i un oscil·loscopi de dos canals connectat a la sortida del generador de funcions i a la sortida del receptor. En les següents imatges es mostra en el canal 1 (groc) el senyal al receptor i al canal 2 (blau) el senyal de l'emissor.

En una primera comprovació utilitzem una ona quadrada d'una amplitud aproximada de 5 V pic a pic, amb una freqüència de 40 kHz i un cicle de treball del 50%. Al receptor ens arriba un senyal de 376 mV pic a pic.



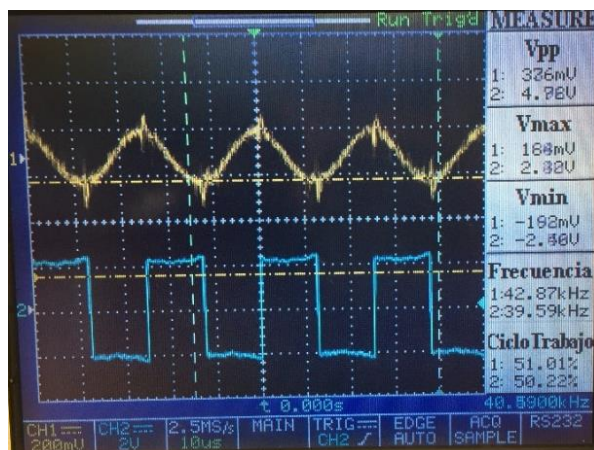


Figura 8. Prova 1 senyal emissor i receptor

A diferència de la primera prova a la prova següent augmentem l'amplitud del senyal a 10 V pic a pic per observar si es rep un senyal més clar i poder determinar en el disseny final l'amplitud final a utilitzar per l'emissor.

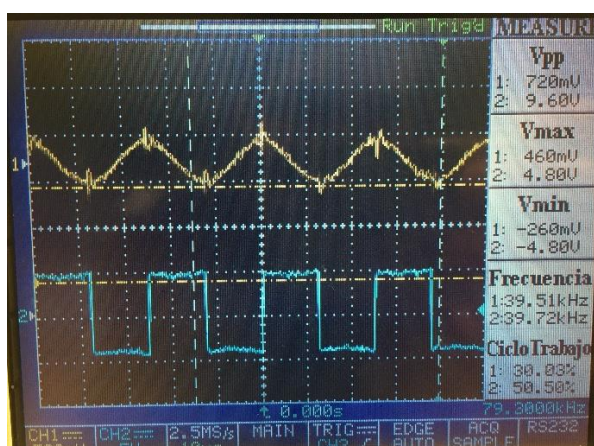


Figura 9. Prova 2 senyal emissor i receptor

De la figura anterior podem concloure que no s'observen diferències entre els dos senyals rebuts a diferència de l'amplitud de manera que podem utilitzar una tensió de 5 V pel disseny final i així no tenir que utilitzar alternatives més complexes per la generació d'una ona amb una amplitud superior a 5 V.

### 3.3.2. Número polsos

Per determinar el número de polsos òptim utilitzarem el mateix muntatge que utilitzem en l'apartat següent, per tant en aquest apartat només ens centrem en la determinació del número

de polsos adequat a enviar i no explicarem el muntatge en detall. Primer enviem un senyal d'una amplitud de 5 V quadrada de 5 polsos cada un cert temps.

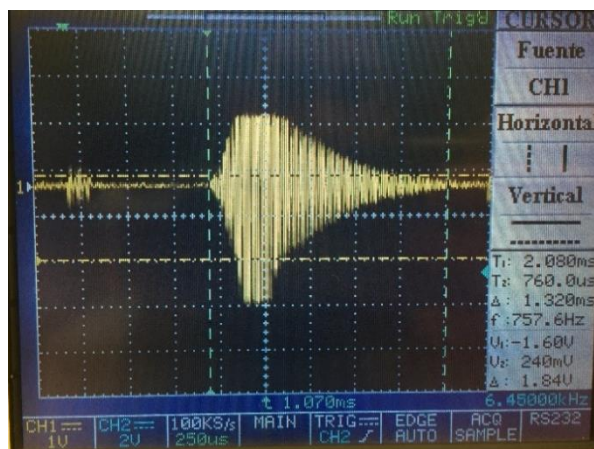


Figura 10. Senyal receptor amb 5 polsos

Tal com veiem en la figura anterior el temps d'establiment és d'aproximadament d'1ms tal com especifica el fabricant i la resposta és adequada per determinar el temps de vol, però per assegurar que és el correcte provem amb un senyal de 10 polsos assegurant que saturem el sensor receptor.

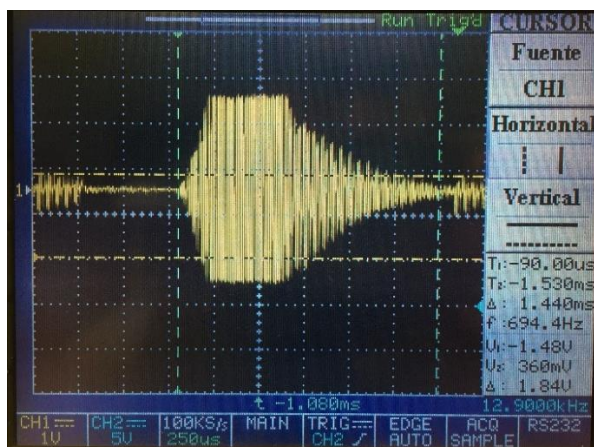


Figura 11. Senyal receptor amb 10 polsos

Enviant 10 polsos el temps d'establiment és bastant semblant fet que ens indica que aquest paràmetre és independent del número d'ones a enviar i alhora ens mostra un senyal molt semblant a l'anterior. Amb aquestes proves observem que l'augment del número d'ones a enviar no millora el senyal al receptor tot i saturar el sensor receptor, per tant utilitzarem un senyal de 5 polsos en el disseny final ja que presenta menys duració i ens permet adquirir el temps de vol amb més rapidesa i reduint el temps de mesura total.

### 3.4. Mesura del temps de vol

Per acabar de comprovar el funcionament del sensor necessitem veure si som capaços de determinar el temps que tarda la ona en anar des del transmissor fins al receptor. Per determinar aquest temps es fa necessari la utilització d'un microcontrolador que ens generi un número de polsos determinat a una freqüència de 40 kHz i esperi un temps fins que arribi tot el senyal i torni a enviar un altre cop.

Per fer aquesta prova s'utilitzen dos sensor encarats i separats una distància (provisional) de 22,50 cm i la placa Arduino Uno per generar el senyal de l'emissor, on utilitzem un programa simple amb interrupcions basat en el programa final que s'implementa en l'anemòmetre per generar el senyal quadrat de 5 polsos amb la freqüència desitjada.

Fent aquesta prova i la de l'apartat anterior observem que el microcontrolador ens genera el senyal desitjat però que el senyal rebut al receptor és molt més petit que el que teníem en les proves de l'apartat anterior amb un senyal al transmissor d'amplitud 5 V pic a pic. Això es degut a que el senyal que genera el microcontrolador és un senyal unipolar i aquest tipus de transductors treballen molt millor amb ones quadrades bipolars.

Per solucionar el problema de la pèrdua de qualitat degut a la utilització d'un senyal unipolar fem el disseny d'una etapa d'amplificació i filtratge per tal d'amplificar el senyal rebut i eliminar freqüències baixes introduïdes al sistema. Les justificacions i càlculs del filtre que utilitzem es troben a l'apartat 4.3 d'aquest mateix document. Es connecta el terminal positiu del receptor a l'entrada del circuit d'amplificació filtratge i s'obté el senyal que tenim a continuació en el canal 1 (groc) a la sortida del mateix circuit..

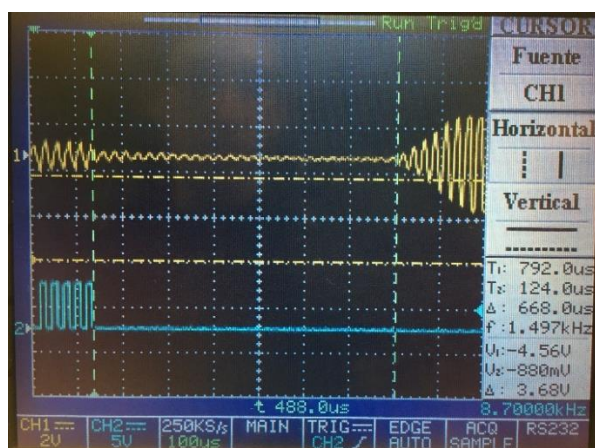


Figura 12. Temps de vol

Com es pot observar a la figura anterior el microcontrolador (canal 2) ens genera 5 polsos d'una freqüència de 40 kHz i amb una amplitud de 5 V. El temps que tarda en arribar la ona al receptor és de 668 µs. Per fer aquesta comprovació només es tindran en compte el temps mesurat i la distància dels dos sensors, per tant el resultat no serà tan precís com en el disseny final. La distància de separació provisional entre els dos sensors és de 22,50 cm per tant amb aquest valor i el temps mesurat podem calcular la velocitat aproximada del so:

$$\text{Velocitat del so} = \frac{\text{Distància separació (m)}}{\text{Temps de vol (s)}} = 336.83 \text{ m/s} \quad (\text{Eq. 7})$$

Aplicant l'equació anterior per una distància de 0,225 metres i un temps de vol de 668 µs obtenim una velocitat de 336.83 m/s un valor molt semblant a la velocitat teòrica de 343,20 m/s que és la velocitat del so a una temperatura de 20 °C. Amb aquesta etapa de filtratge i amplificació i amb el senyal quadrat de 5 polsos a una freqüència de 40 kHz amb una amplitud de 5 V veiem que som capaços de determinar el temps de vol i per tant podem donar com a vàlids aquests sensors per la nostra aplicació.

### 3.5. Distància de separació i altura sensors

Tot i que amb les proves fetes a l'apartat anterior observem que amb una distància de 22,50 cm arribem a determinar el temps de vol amb una bona precisió necessitem fixar una distància que ens permeti assegurar el funcionament de l'anemòmetre en totes les situacions alhora que ens permeti dissenyar una estructura compacta i no molt gran. El fabricant ens indica que la zona morta (primer apartat d'aquest capítol) del nostre sensor és de 20cm però fent diverses proves variant la distància dels sensors que utilitzem arribem a determinar que els sensors funcionen molt bé a distàncies entre 20 i 30 cm, de manera que si posem distàncies molt grans perdem amplitud del senyal rebut i necessitem augmentar el guany de l'etapa de filtratge i si posem distàncies molt baixes perdem resolució en la mesura ja que el temps de vol és menor.

El nostre muntatge pot treballar amb distàncies de separació d'entre 20 i 30 cm ja que el guany de l'etapa de filtratge ens és suficient, tot i així en el disseny final s'utilitza una distància de 25,00 cm de separació entre els dos transductors per estar en un entremig entre els dos límits de manera que tindrem valors de temps de vol d'aproximadament 728 µs en funció de les condicions ambientals.

D'altra banda l'altura a la que han d'estar situats els sensors ha de ser la suficient per no veure's afectada pel flux d'aire que pot rebotar en la part inferior de l'estructura o en la superfície en el que és col·locat l'anemòmetre. Tot i que en el present projecte no fem un estudi de l'efecte del vent en l'estructura de l'anemòmetre agafem una altura suficient per assegurar que la caixa que subjecta els braços no afecta l'aire que passa pels sensors i tampoc sigui molt elevada per no afectar l'estabilitat dels mateixos braços.

#### 4. DISSENY ELECTRÒNIC

Per fer el disseny de la part electrònica del nostre anemòmetres expliquem tots els components que necessitem i els paràmetres més importants de cada component a l'hora d'escollir-lo, ja que una part fonamental de l'anemòmetre és l'elecció dels components correctes per tal de tenir un sistema que faci les mesures el més acurades possibles. A la figura següent es mostra a nivell d'esquema general com hauria de ser el nostre muntatge basant-nos en els anemòmetres comercials del nostre tipus que hi ha en el mercat actual i el seu funcionament:

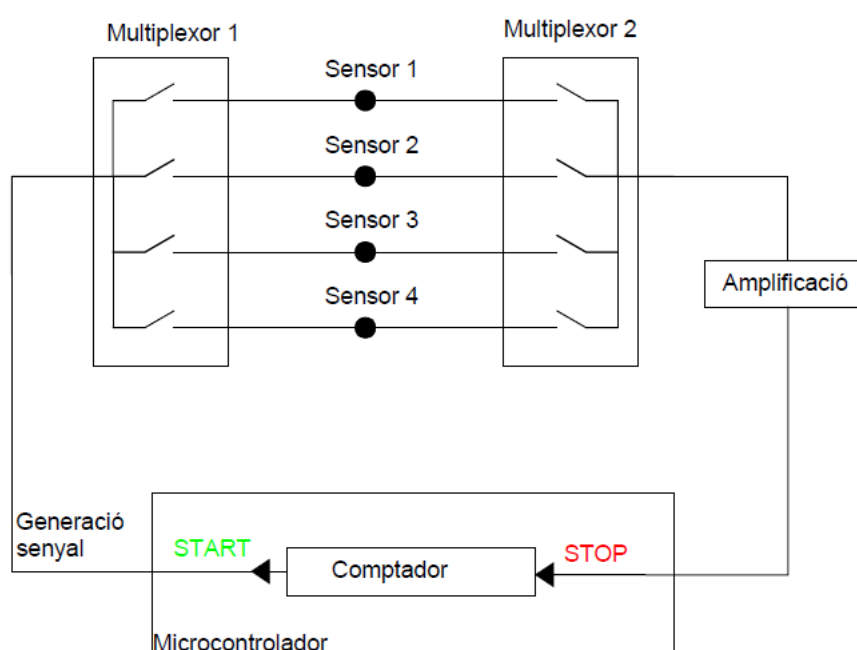


Figura 13. Esquema electrònic general de l'anemòmetre

El microcontrolador serà l'encarregat tan de generar el senyal en el multiplexor 1 que selecciona el sensor que funciona com a transmissor com de guardar el valor del comptador quan arriba el senyal al receptor a través del multiplexor 2. La selecció del canal de cada multiplexor la fa el mateix microcontrolador que va alternant de manera rotativa l'elecció dels sensors per cada multiplexor en funció de la mesura.

##### 4.1. Microcontrolador

Com hem vist en la figura anterior el microcontrolador és una part molt important del nostre anemòmetre ja que és l'encarregat del control del sistema i de l'adquisició i enviament de les

dades. L'elecció i configuració del microcontrolador és essencial per aconseguir bons resultats, per això en aquest apartat expliquem les característiques del microcontrolador que escollim, el comptador que utilitzem i la resolució del sistema.

#### **4.1.1. Característiques**

Algun dels requisits que ha de complir el nostre microcontrolador a nivell general per poder dur a terme les diferents tasques per mesurar la velocitat del vent són les següents: entrades i sortides suficients per poder connectar els diversos elements que conformen l'anemòmetre, voltatge de sortida de 5 V al pin PWM per tal de generar el senyal que s'envia al transmissor amb una amplitud suficient, rellotge d'alta velocitat per poder tenir un anemòmetre amb una resolució adequada i una arquitectura del microcontrolador que ens permeti utilitzar interrupcions de la manera més senzilla i efectiva possible.

En base als requisits anteriors utilitzem la placa Arduino UNO basada en el microcontrolador Atmega328 que incorpora un rellotge amb una velocitat de 16 MHz i disposa de 14 pins digitals amb un voltatge d'operació de 5 V.

Pel que fa els valors de la memòria de la placa Arduino no són paràmetres de gran importància ja que no emmagatzemem dades sinó que solament hem de carregar el programa i mostrar les dades per una pantalla LCD o enviar-les per port sèrie. Pel que fa el microprocessador Atmega328 té un comptador de 16 bits que ens servirà per generar el senyal PWM a una freqüència de 40 kHz amb una amplitud de 5 V i captar l'arribada del senyal al receptor amb un número suficient de bits.

#### **4.1.2. Comptador**

En aquest apartat només comentarem la part de muntatge del disseny electrònic que té a veure amb el comptador de 16 bits que utilitzarem, tot i que es fa una explicació més detallada del funcionament del comptador que utilitzem en el capítol següent.

Utilitzarem el rellotge de 16 MHz que incorpora la placa Arduino sense escalar que configurarem amb els registres corresponents obtenint així la màxima resolució, i amb el mateix comptador generarem un senyal PWM d'una freqüència de 40 kHz i comptarem el temps que tarda a arribar al receptor. La sortida del PWM amb el comptador de 16 bits es pot escollir al pin 15 o 16 de l'Atmega 328, que corresponen als pins 9 i 10 que incorpora l'Arduino.

Per captar la interrupció que ha de generar el senyal del receptor utilitzarem el registre de captura d'entrada (ICRn) a través del comparador analògic que incorpora l'Atmega 328, aquest el que fa és comparar el voltatge al pin 6 de l'Arudino amb un altre voltatge al pin 7 de manera que quan el voltatge que tenim al pin 6 supera a l'altre s'activa la interrupció. Una explicació més enfocada a la programació del comparador analògic està en el capítol següent.

#### 4.1.3. Resolució

La velocitat del rellotge del microcontrolador serà el paràmetre que determinarà la resolució del nostre sistema, per això en aquest subapartat fem els càlculs pertinents per determinar la resolució que tindrà el nostre anemòmetre.

La placa Arduino incorpora un rellotge de 16 MHz, i prenent com a referència el teorema de Nyquist-Shannon que diu que el senyal s'ha de mostrejar al menys dos vegades la seva freqüència màxima agafem una freqüència màxima de 8 MHz, ja que serà aquesta la freqüència que pugui mostrejar el nostre microcontrolador. Una freqüència de 8 MHz equival a un temps de període de 125 ns que serà el temps que serà capaç d'arribar a mostrejar el nostre Arduino, i per tant serà la variació en el temps de vol màxima a la qual pugui arribar. Per això el que fem és afegir aquest temps de període al temps de vol per saber quina és la resolució quan el vent està en sentit contrari a l'emissió, i també restem aquest temps de període al temps de vol per saber quina és la resolució quan el vent va en el mateix sentit d'emissió dels sensors.

En el cas que no tenim cap flux d'aire que afecti el nostre anemòmetre el temps de vol entre dos dels seus sensors el defineix la següent equació:

$$t = \frac{L}{c} = \frac{0,25}{343,20} = 0,000728438 \text{ s} = 728,438 \text{ } \mu\text{s} \quad (\text{Eq. 8})$$

Amb una distància de separació de 25 cm i una velocitat del so de 343,20 m/s (a 20°C de temperatura, amb 50 % d'humitat a nivell del mar) obtenim un temps de vol de 728,438 μs que sumant-li i restant-li 125 ns obtindrem el temps de vol amb els que trobarem la resolució del sistema.

$$t_{12} = 728,438 - 0,125 = 728,313 \text{ } \mu\text{s} \quad (\text{Eq. 9})$$



$$t_{21} = 728,438 + 0,125 = 728,563 \mu s \quad (\text{Eq. 10})$$

On  $t_{12}$  és el temps de vol amb el sentit del vent a favor del sentit d'emissió de l'ona i el  $t_{21}$  el sentit del vent va en sentit contrari al d'emissió.

A partir de les equacions 2 i 3 del segon capítol aïllem la velocitat i obtenim les següents equacions:

$$V_{\text{vent}} = \frac{L - c \cdot t_{12}}{t_{12}} = 0,0590 \text{ m/s} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$V_{\text{vent}} = \frac{c \cdot t_{21} - L}{t_{21}} = 0,0587 \text{ m/s} \quad (\text{Eq. 12})$$

Com podem veure la velocitat que determina la resolució més restrictiva que obtenim és de 0,059 m/s que podem aproximar i afirmar que la màxima resolució del nostre sistema serà de 0,06 m/s. Aquest paràmetre serà determinant per saber si el nostre anemòmetre és apte en determinades aplicacions i quin ús li voldrem donar. Cal remarcar que alhora de fer les comprovacions del disseny final podem veure que quan no hi ha vent la velocitat ens marca entre 0 i 0,05 m/s confirmant els valors anteriors.

## 4.2. Multiplexació

Els multiplexors seran els encarregats de multiplexar el senyal de generació i el senyal rebut en els diversos sensors, però degut a que el senyal generat és de 5 V i el rebut és d'aproximadament 30 mV necessitem un multiplexor d'unes característiques determinades per garantir el correcte funcionament de l'anemòmetre.

En un primer disseny optem pel multiplexor CD4052 de la casa Texas Instruments però ens adonem que no és una bona elecció ja que hi ha diversos paràmetres que el fan inadequat per la nostra aplicació.

El paràmetre més important a considerar en els multiplexors en l'ús que li volem donar és la diafonia entre els canals, que és el voltatge que un canal en estat ON transmet a un canal en estat OFF. Per aquest multiplexor la diafonia té un valor de -40 dB, que suposava una diafonia de 50 mV per un senyal de 5 V tenint en compte que ens atenua el senyal 100 vegades.

Aquest valor dona problemes en el disseny ja que el senyal enviat a través del canal del multiplexor encarregat de la transmissió faria arribar 50 mV cap a l'altre costat (receptor) que és una amplitud superior als 30 mV que rep el transmissor a través de l'aire (amplitud del senyal abans de passar per l'amplificació). Això faria impossible determinar l'arribada del senyal que ens interessa analitzar ja que el soroll del propi multiplexor ens impediria detectar l'arribada de l'ona al receptor.

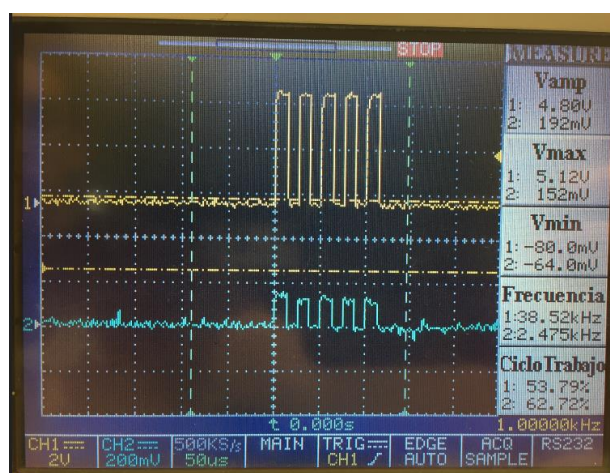


Figura 14. Imatge diafonia multiplexor CD4052 (canal 2)

El paràmetre de la diafonia fa que l'elecció del multiplexor es decanti per la família dels multiplexors de precisió, i en aquest cas agafem el multiplexor MAX4518 de la casa MAXIM INTEGRATED, que és un multiplexor de 4 canals d'entrada o sortida i dos canals de selecció amb les característiques següents:

Paràmetre	Valor mínim	Valor típic	Valor màxim
Consum (uW)			300,00
Resistència ON canals ( $\Omega$ )		150,00	225,00
COM-Off corrent de fuga (nA)	-0,20		0,20
COM-On corrent de fuga (nA)	-5,00		5,00
Diafonia entre canals (dB)		-92,00	
Aïllament OFF (dB)		-75,00	
Temps de transició (ns)		90,00	245,00
Temps activació (ns)		90,00	200,00
Temps desactivació (ns)		50,00	125,00

Taula 2. Característiques elèctriques MAX4518, Vcc: +5 V i T:+25°C

Es tracta d'un multiplexor basat en la tecnologia CMOS amb uns corrents de fuga entre l'alimentació i el drenador (sortida) molt baixos en estat ON i OFF, i un consum de molt baixa

potència. El paràmetre del corrent de fuga és important a considerar ja que un corrent de fuga molt elevat suposa un error d'offset a la sortida del multiplexor que s'ha d'evitar.

Pel que fa els valors del temps de transició, d'activació i desactivació són paràmetres que s'han de tenir en compte en el moment de dissenyar l'algoritme de mesura de tal manera que hi hagi el temps suficient per a que és pugui dur a terme el canvi de canal abans de donar una ordre d'enviament o recepció de senyal, i que per tant determinaran en part la rapidesa total del sistema.

La diafonia entre els canals com hem dit és el paràmetre més important a tenir en compte en aquesta aplicació juntament amb l'aïllament OFF, i en el nostre cas l'atenuació de la diafonia és de 92 dB.

$$V_{\text{CANAL OFF}} = V_{\text{CANAL ON}} \cdot 10^{\frac{\text{Guany (dB)}}{20}} \quad (\text{Eq. 13})$$

Aplicant l'equació anterior per un voltatge de 5 V en el canal d'entrada, que serà l'amplitud de el senyal enviat al transmissor, i un guany de -92dB obtenim que en un altre canal en estat OFF ens arribarà un voltatge de 0,126 mV un valor acceptable per la nostra aplicació, a diferència del multiplexor que es va fer servir sense contemplar el paràmetre de la diafonia que suposava un voltatge teòric de 50 mV.

D'altra banda l'aïllament OFF és el voltatge que transmet un canal en estat OFF a un altre qualsevol, en aquest multiplexor té un valor de -75 dB que aplicant la mateixa equació d'abans per un valor de 5 V s'obté un resultat de 0,889 mV, un valor apte per la nostra aplicació ja que es troba molt per sota dels 30 mV.

Per simplificar el circuit i aprofitar les sortides digitals del nostre microprocessador utilitzarem dos sortides digitals per controlar els dos multiplexors i connectarem els sensors de manera que quan en un costat tinguem un sensor funcionant com a transmissor, l'altre sensor que es troba encarat a aquest, funcionarà com a receptor.

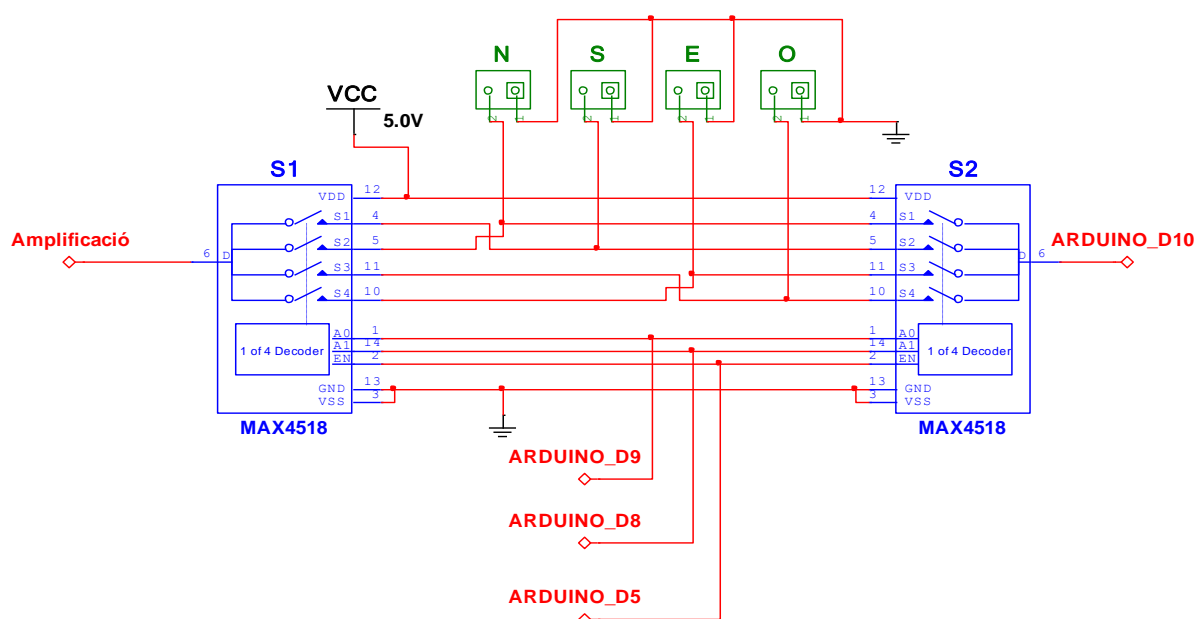


Figura 15. Esquema multiplexació senyals

Tal com veiem a la figura anterior amb dos multiplexors aconseguim poder actuar sobre tots els sensors i utilitzar-los com a receptors o emissors en funció de l'estat de mesura en el que ens trobem. A la taula següent podem veure de manera més fàcil com es fa la selecció de canals:

Canal B	Canal A	Multiplexor 1	Multiplexor 2
0	0	N	S
0	1	S	N
1	0	E	O
1	1	O	E

Taula 3. Selecció sensors pels multiplexors

El canal B determinarà la direcció en la que es vol fer la mesura i el canal A variarà el sentit, de tal manera que les dos primeres combinacions es mesura sobre l'eix NS i les altres dues combinacions sobre l'eix EO.

#### 4.3. Filtratge, amplificació i detector creuant per zero

Tal com hem explicat anteriorment el senyal que arriba al receptor és molt dèbil en comparació al de generació, per això es dissenya una etapa de filtratge i amplificació per tal d'assegurar una amplitud adequada a l'hora de determinar l'arribada de la ona al receptor.

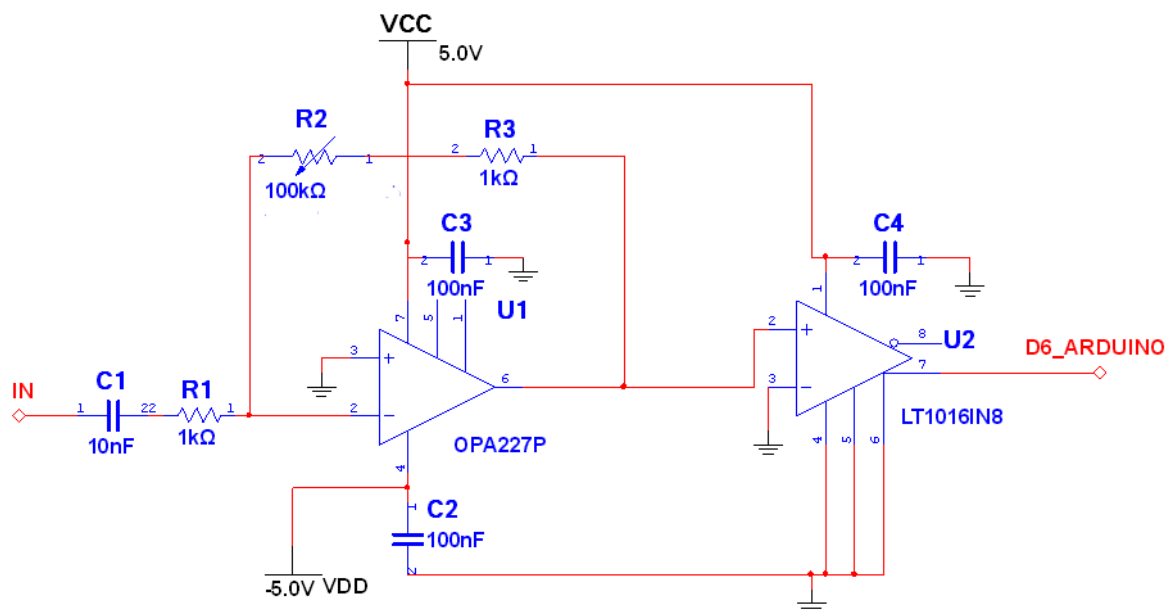


Figura 16. Filtratge, amplificació i detector creuament per zero

També s'afegeix un comparador configurat com a detector de creuament per zero per tal de generar un senyal quadrat quan ens arribi el primera pols al receptor.

A l'entrada del circuit de la figura anterior tenim el terminal positiu del receptor connectat i a la sortida del mateix circuit va connectat a una sortida digital l'Arduino corresponent a la entrada del comparador analògic per disparar la interrupció.

La funció de transferència, el guany i la freqüència central del nostre filtre estan determinats per les següents expressions:

(Eq. 14)

$$H(S) = \left( \frac{-(R2+R3)}{R1} \right) \cdot \frac{(R1 \cdot C1) \cdot s}{1 + (R1 \cdot C1) \cdot s}$$

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot C1} = 15,92 \text{ kHz} \quad (\text{Eq. 15})$$

$$k = \frac{-(R2+R3)}{R1} = -101 \quad (\text{Eq. 16})$$

La primera etapa consta d'un filtre pas alt actiu de primer ordre amb una freqüència de tall de 15,92 KHz i un guany màxim negatiu de 101. Aquest filtre pas alt s'incorpora per evitar que s'introdueixin sorolls al nostre sistema alhora d'alimentar l'Arduino amb cable USB a través de

l'ordinador o si decidim alimentar la placa a través d'una font d'alimentació, ja que fent proves amb diferents sistemes d'alimentació a vegades tenim sorolls amb freqüències molt baixes (50-60 Hz). Amb un filtre actiu de primer ordre tal com el que tenim és suficient per atenuar les senyals a baixa freqüència, i per freqüències de 100 Hz tenim una atenuació de 44 dB.

La primera resistència del filtre s'utilitza un valor de 1.000 Ohms degut a que la resistència del nostre transductor en la freqüència central de funcionament tal com hem vist al tercer capítol és d'aquest valor i d'aquesta manera s'afavoreix la màxima transferència de potència. Pel que fa els condensadors de desacoblaments situats entre les alimentacions i massa, serveixen per mantenir un voltatge en borns del circuit integrat i derivar les interferències d'alta freqüència a massa.

L'elecció de l'amplificador operacional pel filtre és un dels elements més importants en el disseny d'aquesta etapa, ja que el senyal que ens arriba és molt dèbil i propens a sorolls, i per tant es necessita un integrat que compleixi restriccions de baix soroll, alta velocitat i un valor de guany per ample de banda suficient per la nostra aplicació. Partint de les anteriors restriccions es troba l'amplificador operacional OPA227 de la casa Texas Instruments que es troba dins el grup d'amplificadors operacionals d'alta precisió i baix nivell de soroll.

Paràmetre	Valor mínim	Valor màxim	Valor nominal
Voltatge a l'entrada (V)	-0,70	0,70	
Voltatge d'alimentació (V)	-2,50	18,00	15,00
GBW (MHz)			8,00
Temps d'establiment ( $\mu$ s)			5,00
Tensió de soroll ( $nV/\sqrt{Hz}$ )			3,00
CMRR (dB)	120,00		138,00
Slew Rate ( $V/\mu$ s)			2,30
Voltatge offset ( $\mu$ V)		200,00	10,00

Taula 4. Característiques OPA227

Un dels altres paràmetres que hem de tenir en compte és el "slew rate" (SR) o velocitat d'ascens que ens indica la velocitat del amplificador operacional quan té a la entrada un graó. Aquest paràmetre ens indica tan la velocitat d'ascens com la de descens, i guarda una relació amb la freqüència amb la que es vol treballar.

$$SR=2\cdot\pi\cdot F_{\max}\cdot V_{p\max}=1,257\text{ V}/\mu\text{s} \quad (\text{Eq. 17})$$

On:

SR: slew rate (V/ $\mu$ s)

$F_{\max}$ : freqüència màxima (Hz)

$V_{p\max}$ : voltatge pic màxim (V)

Aplicant l'equació anterior per una freqüència màxima de 40 kHz i un voltatge de pic màxim de 5 V que seria el voltatge de saturació obtenim un "slew rate" de 1,257 V/ $\mu$ s que és un valor menor al del nostre operacional de 2,3 V/ $\mu$ s, resultat que també el fa apte per la nostra aplicació.

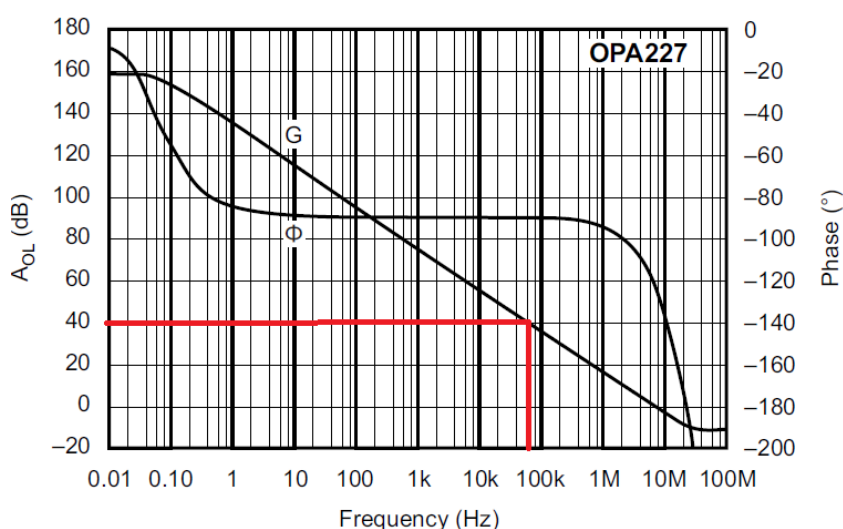


Figura 17. Relació guany, ample de banda i fase

D'altra banda amb la figura anterior podem comprovar que també complim el paràmetre del GBW, que determina el producte del guany enllaç obert d'un amplificador operacional multiplicat pel seu ample de banda, en el nostre cas el valor màxim és de 8 MHz. Per un guany de 40 dB (equivalent a multiplicar per 100) tenim un ample de banda d'aproximadament 70 kHz suficient pel nostre muntatge al qual el senyal ultrasònic ens arriba amb una freqüència de 40 kHz. Pel que fa el guany de 100 ens assegura un senyal d'amplitud suficient a la sortida del filtre de manera que puguem analitzar-lo després ja que el senyal que ens arriba té una amplitud aproximada d'uns 30 mV.

Un cop hem dissenyat l'etapa de filtratge i amplificació podríem connectar aquesta entrada directament a l'Arduino i variar el voltatge de referència del comparador fins trobar un valor òptim per donar pas a la interrupció, però això faria que tinguéssim dades molt poc precises i

que a mesura que hi hagués variacions en la intensitat del vent respecte el calibratge inicial obtindríem mesures molt allunyades de la realitat. Per aquest motiu s'incorpora un detector de creuament per zero emprant un comparador analògic d'alta velocitat i precisió. A la sortida d'aquest comparador tenim un senyal quadrat amb una amplitud d'entre 2,70 i 3,40 V.

D'aquesta senyal només ens servirà el primer impuls que és el que representarà l'arribada de la ona al receptor i per tant activarà la interrupció al comptador.

Per activar la interrupció que indica l'arribada del senyal al costat receptor comparem el senyal a la sortida del comparador amb un voltatge de referència tal com expliquem en l'apartat del microcontrolador i es torna a parlar al pròxim capítol.

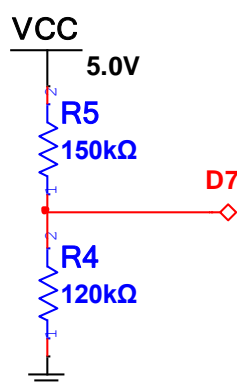


Figura 18. Divisor de tensió, referència del comparador analògic

Per això incorporem un divisor de tensió que ens proporciona un voltatge de referència de 2,22V valor que es troba dins el rang que busquem i que ens assegura un correcte funcionament del comparador analògic.

#### 4.4. Pantalla LCD

La pantalla LCD s'utilitza per mostrar les dades de la velocitat del vent, i en aquest cas s'utilitzarà una pantalla LCD de 16 x 2 caràcters. Les dades a enviar es faran amb 4 bits i s'utilitzarà la mateixa placa Arduino per fer la comunicació amb la pantalla i alimentar la mateixa pantalla. En el programa final de l'anemòmetre podem escollir si volem mostrar les dades per pantalla o enviar-les pel port sèrie. Tal com expliquem en l'apartat següent posem una resistència de 1 kΩ a l'alimentació de la il·luminació per limitar el pas d'intensitat i evitar un consum tan elevat.



#### 4.5. Alimentació

Per simplificar el disseny electrònic proposem alimentar tot el nostre muntatge a través dels 5 V que proporciona l'Arduino Uno, d'aquesta manera tindrem tot alimentat a través d'un sol circuit sense necessitat d'afegir cap component per regular o condicionar el voltatge.

Així mateix necessitem generar un voltatge negatiu a partir del voltatge que ens proporciona l'Arduino, en aquest cas, -5 V, per això utilitzem el ICL7660. Es tracta d'un convertidor de voltatge del tipus CMOS que converteix voltatges de 1,5 V fins a 10 V en voltatges negatius, amb un muntatge molt senzill i amb una intensitat suficient per alimentar el component que requereix d'alimentació dual (OPA227). Segons la fulla de dades que proporciona el fabricant per generar el voltatge negatiu només necessitem un voltatge amb polaritat positiva i dos condensadors de 10  $\mu$ F configurats d'una manera determinada.

Per verificar que el pin de 5 V de l'Arduino serà capaç d'alimentar tot el muntatge calculem de manera aproximada el consum de cada component verificant que no supera la intensitat proporcionada per la placa. Cal tenir en compte que la placa Arduino incorpora un fusible de 500 mA valor que no haurem de superar per no fer malbé la placa.

Descripció	Consum màxim (mA)
Comparador, LT1016	10,00
Amplificador operacional, OPA 227	20,00
Multiplexor, MAX4518 (x 2)	60,00
Sensor ultrasònic (emissor), 400PT160	5,00
Pantalla LCD amb il·luminació màxima	140,00
Convertidor de voltatge, ICL 7660	1,00
Pins digitals Arduino màxim rendiment	200,00
Microcontrolador i components de la placa a màxim rendiment	65,00
TOTAL	501,00

Taula 5. Consum anemòmetre

De la taula anterior podem observar que no complim la limitació dels 500 mA i que el consum de la pantalla LCD té un dels valors més grans que podríem limitar afegint una resistència. Per això amb un potenciòmetre es mesura la resistència òptima per assegurar una il·luminació adequada i agafem una resistència de 1 k $\Omega$  que farà que el consum màxim de la pantalla LCD sigui només de 5mA, i es pugui alimentar tot des de la placa Arduino sense problemes ja que el corrent total serà de 366mA estant molt per sota del límit de 500mA.

## 5. PROGRAMACIÓ

El programa a dissenyar controla la generació de senyal PWM per al transmissor i capta el temps que tarda en arribar l'ona a l'altre sensor de la manera més precisa possible, per això es necessari utilitzar les interrupcions i escriure directament sobre els registres que controlen el comptador que utilitzarem alhora que escollim la màxima resolució que ens ofereix el rellotge que incorpora la placa Arduino.

### 5.1. Interrupcions Atmega 328

Les interrupcions són molt útils a la hora de temporitzar determinades accions ja que si s'utilitzen retards ("delay" en Arduino) a través de llibreries bloquegem el microcontrolador fins que transcorre el temps indicat en el retard, cosa que no ens podem permetre en una aplicació com la nostra on el comptatge precís del temps és essencial.

Les interrupcions poden ser programades a través de determinats registres del microcontrolador on es pot configurar la freqüència del rellotge a utilitzar o el mode d'operació del comptador entre d'altres paràmetres. El microcontrolador Atmega 328 que és el que incorpora la placa Arduino Uno disposa de tres comptadors, dos comptadors de 8 bits (comptador 0 i 2) i un de 16 bits (comptador 1), en la nostra aplicació per tenir unes dades amb més resolució i un programa més simple utilitzarem el comptador 1 de 16 bits (format per dos registres de 8 bits) en diversos modes de funcionament per poder generar el senyal PWM i mesurar el temps de vol. També cal afegir que el comptador 1 és l'únic que incorpora un registre encarregat d'efectuar interrupcions des de l'exterior a través del "Input Capture Register" (ICR), característica que també justifica la seva elecció.

La velocitat d'increment del comptador depèn del rellotge que hi ha connectat al microcontrolador que en aquest cas és de 16 MHz, tot i que també es pot utilitzar un altre escala del rellotge per comptar a una freqüència més baixa en cas que interressi treballar amb interrupcions de valors pròxims o superior al segon. En la nostra aplicació com que necessitem un sistema amb la màxima resolució tant en la generació de senyal com en la mesura del temps de vol s'utilitza el factor unitari en el escalar del rellotge per tal de tenir un comptatge a 16 MHz.

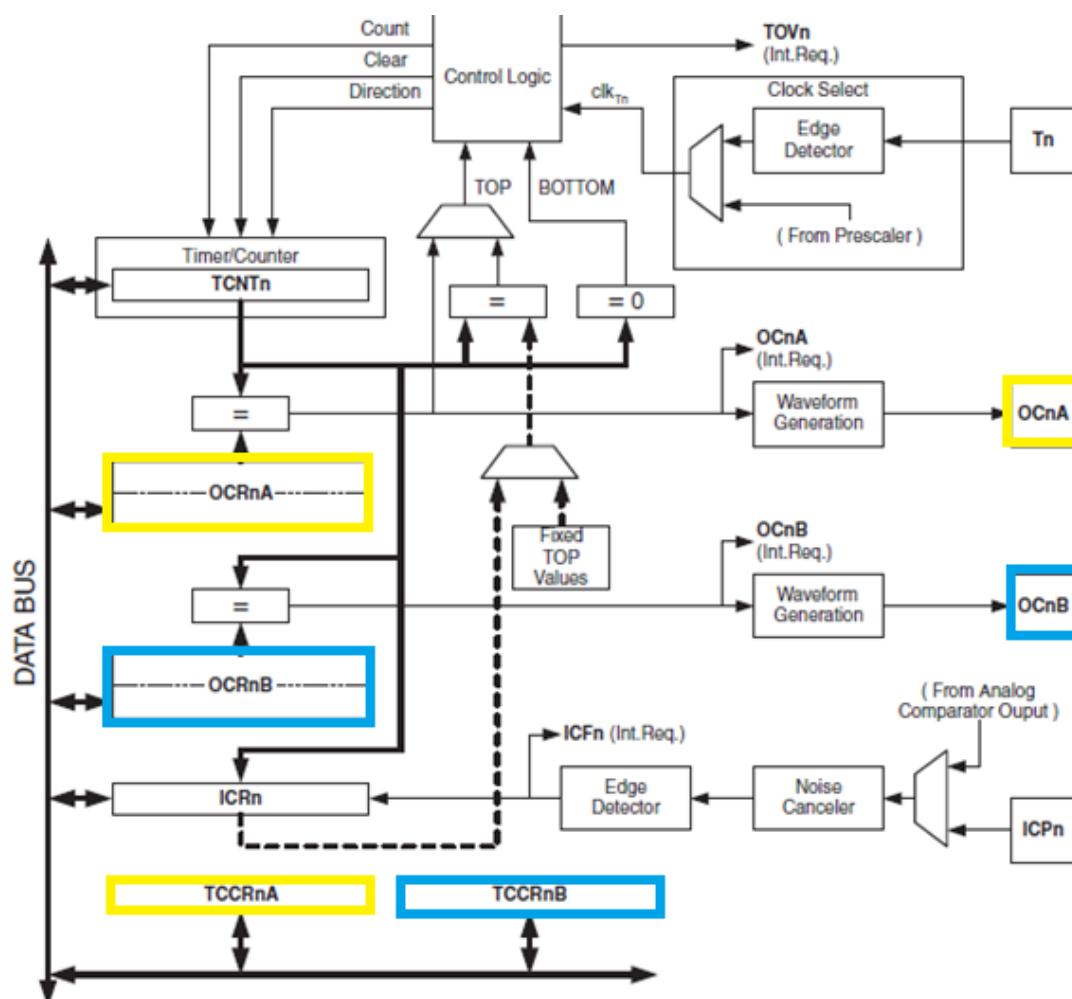


Figura 19. Diagrama de blocs comptador 16 bits

Els comptadors tenen diversos modes de funcionament, el mode normal, el PWM i el “Clear Timer on Compare” (CTC), els que utilitzem en el nostre programa són el mode PWM que utilitza les sortides OCnA i OCnB i el mode CTC que quan el comptador arriba al valor del registre “compare match” es dispara la interrupció.

En la figura anterior (on n és 1, referent al número de comptador) podem veure els diferents registres que conformen el comptador 1 de 16 bits, on: els registres TCCR1A i TCCR1B són els encarregats de gestionar l'escalar i la configuració del comptador, el registre OCR1 és el “Output Compare Match Register”, el registre ICRn és el “Input Capture Unit” que s'encarrega d'activar interrupcions des de l'exterior (pin físic de l'Arduino) i el registre TCNT1 que emmagatzemarà el valor del comptador. En la mateixa figura podem veure clarament que el mateix comptador té dos OCR independents (color groc i blau) que ens permetrà utilitzar-los per configurar la generació del senyal PWM.

Encara que no surti en la figura anterior totes les interrupcions estan emmascarades de manera individual dins el registre “Timer Interrupt Mask Register” (TIMSK1) que ens permet activar o desactivar una interrupció i el “Timer Interrupt Flag Register” (TIFR1) que ens indica si hi ha una interrupció pendent. Un cop hem vist de manera superficial com és l'arquitectura del comptador a l'apartat següent expliquem com a partir d'aquest comptador generem un senyal de 40 kHz.

## 5.2. Generació senyal PWM

Com veiem en el tercer capítol, necessitem generar un senyal quadrat de 5 polsos amb una freqüència de 40 kHz, per això utilitzarem la unitat de comparació de sortida del comptador de 16 bits del registre A que és el que ens permet utilitzar el mode de generació PWM.

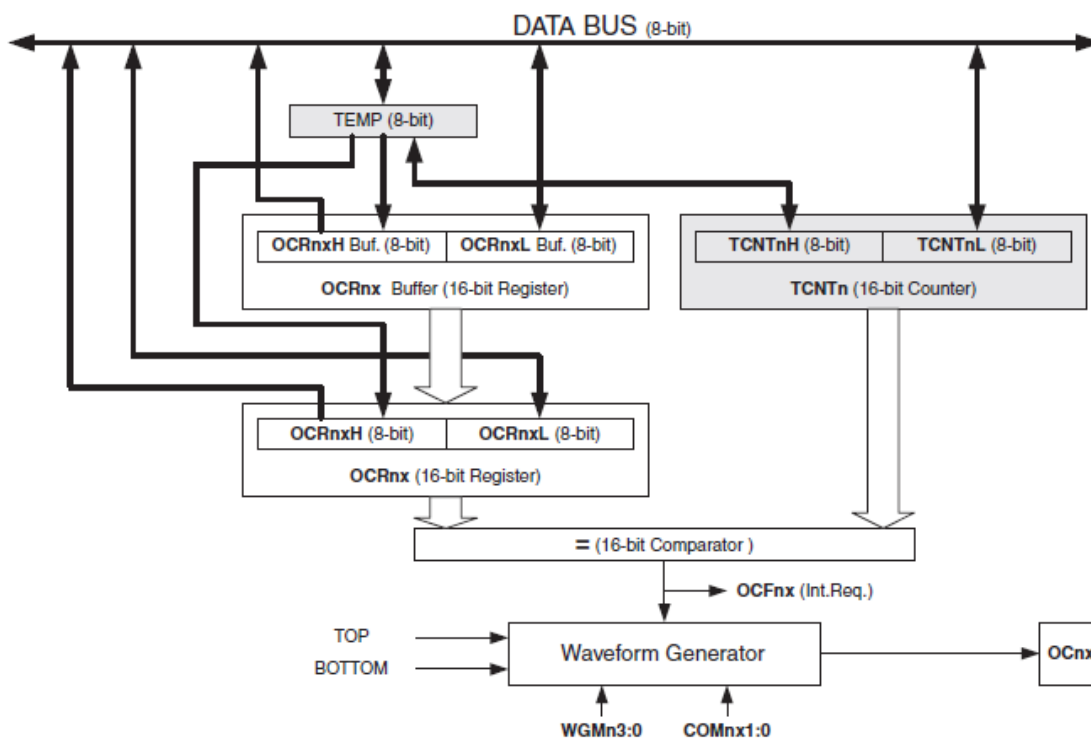


Figura 20. Diagrama de blocs “Output Compare Unit”

Tal com veiem en la figura anterior per definir el comportament d'un comptador funcionant com a generador d'ona necessitem configurar dos paràmetres, el “Waveform Generation Mode” (WGM) que indica quin tipus de senyal PWM volem generar i el “Compare Output Mode” (COM) que defineix el mètode per comparar el valor amb el que reiniciem el comptador. En el nostre cas utilitzarem el fast PWM mode (pel WGM) que ens proporciona un senyal

PWM d'alta freqüència i el mode dos pel COM que ens permetrà comparar amb els valors que hem fixat en els registres OCR per determinar el període i el cicle de treball del senyal a generar. A continuació es representa de manera gràfica com seria la generació de senyal PWM d'un pols amb un període 40 kHz en el cas que hàgim escollit els modes descrits abans.

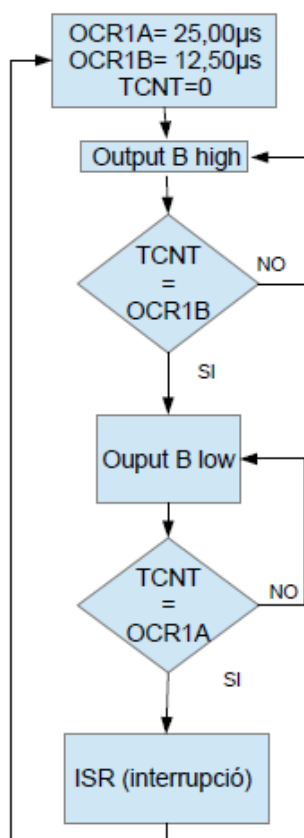


Figura 21. Diagrama de flux generació PWM

En el diagrama anterior podem veure fàcilment com el valor del registre OCR1B determina el cicle de treball del senyal i el OCR1A la duració total, és a dir, el període. Un cop s'ha enviat un pols es genera una rutina d'interrupció (en cas que estiguin activades les interrupcions per aquesta unitat mitjançant el registre TIMSK) i quan hem sortit d'aquesta rutina tornem a reiniciar el comptador i enviem un nou pols PWM. Nosaltres com que necessitem enviar 5 polsos haurem de repetir aquest procés cinc cops sense fer treballar el microcontrolador durant la rutina d'interrupció (ISR) per obtenir el senyal final que desitgem.

### 5.3. Mesura temps de vol

Per determinar el temps de vol utilitzarem el mateix comptador de 16 bits però en aquest cas l'altre registre que tenim lliure per comptar el temps que transcorre des de que enviem l'últim

pols fins que arriba la ona a l'altre sensor que activarà una interrupció externa que serveix per parar el comptatge.

Per generar la interrupció utilitzarem el comparador analògic que incorpora el microcontrolador, que l'utilitzem comparant el senyal de sortida de la etapa de filtratge, amplificació i detecció de creuament de zero amb un senyal de referència, explicada en l'apartat 4.3, i que en cas de superar aquesta senyal es dispara la interrupció.

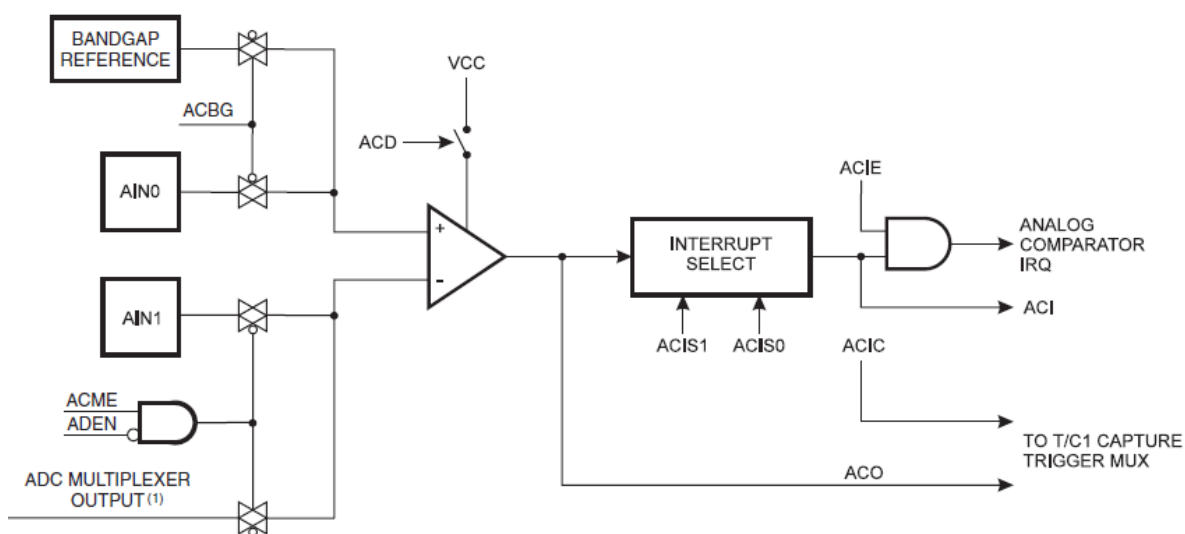


Figura 22. Diagrama de blocs comparador analògic

Tal com veiem en la figura anterior actuant sobre ACME i ADEN podem seleccionar sobre quin pin volem posar el senyal de referència (entrada negativa del comparador), en el nostre cas utilitzarem el pin predeterminat corresponent a l'entrada AIN1, que correspon al pin digital 7 de la placa Arduino (pin 13 del microcontrolador). Pel senyal d'entrada provinent del receptor utilitzem l'entrada predeterminada AIN0 que correspon al pin digital 6 de la placa Arduino (pin 12 del microcontrolador). El "Bandgap Reference" serveix per afegir un voltatge sobre la pota positiva del comparador i poder tenir un senyal de referència més alt, però en el nostre cas no l'activem ja que segons la fulla d'especificacions del microcontrolador aquesta opció afegeix un retard al sistema perquè s'ha d'estabilitzar el voltatge i pel voltatge d'entrada que tenim a la pota positiva és suficient i no ens fa falta augmentar-lo. Per configurar el comparador analògic treballarem sobre els registres ADCSRB i ACSR.

D'altra banda per fer el comptatge del temps de vol com hem dit utilitzarem el registre B del comptador de 16 bits i la unitat de captura d'entrada (ICU).

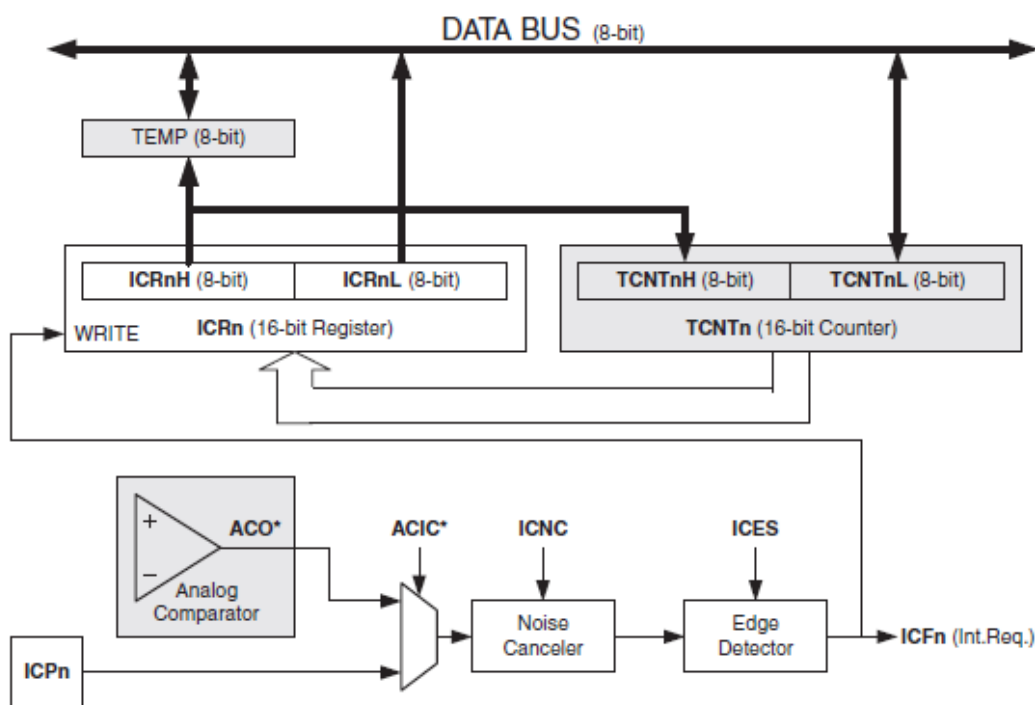


Figura 23. Diagrama de blocs unitat de captura d'entrada (ICU)

Com podem veure les interrupcions les podem disparar des del comparador analògic o des de el pin ICP, nosaltres per tenir un sistema més fiable utilitzem el comparador analògic. Alhora també disposem del cancel·lador de soroll que ens serveix per protegir el disparador de la interrupció davant del soroll que pugui ser introduït a l'entrada, en el nostre cas l'activem ja que el retard que suposa és només de 4 senyals de rellotge. El cancel·lador de soroll i el detector de flanc s'activen amb el registre TCCR1B, i a través del registre TIMSK activem o desactivem les interrupcions de la unitat de captura d'entrada.

Un cop s'hagi disparat la interrupció es genera una rutina d'interrupció dins la qual podem llegir el valor dels comptadors a través dels registres ICR1H i ICR1L que hi ha a la figura anterior.

#### 5.4. Tractament de dades i multiplexació

Amb la generació senyal de 5 polsos a 40 kHz i la configuració del sistema de captura de l'arribada del senyal a l'altre sensor ens falta determinar la manera de fer les mesures en els diversos sentits i direccions i tractar les dades per obtenir unes dades fiables i amb la màxima precisió. A continuació es representa a nivell general i de manera simplificada en un diagrama de flux la seqüència del programa complet:

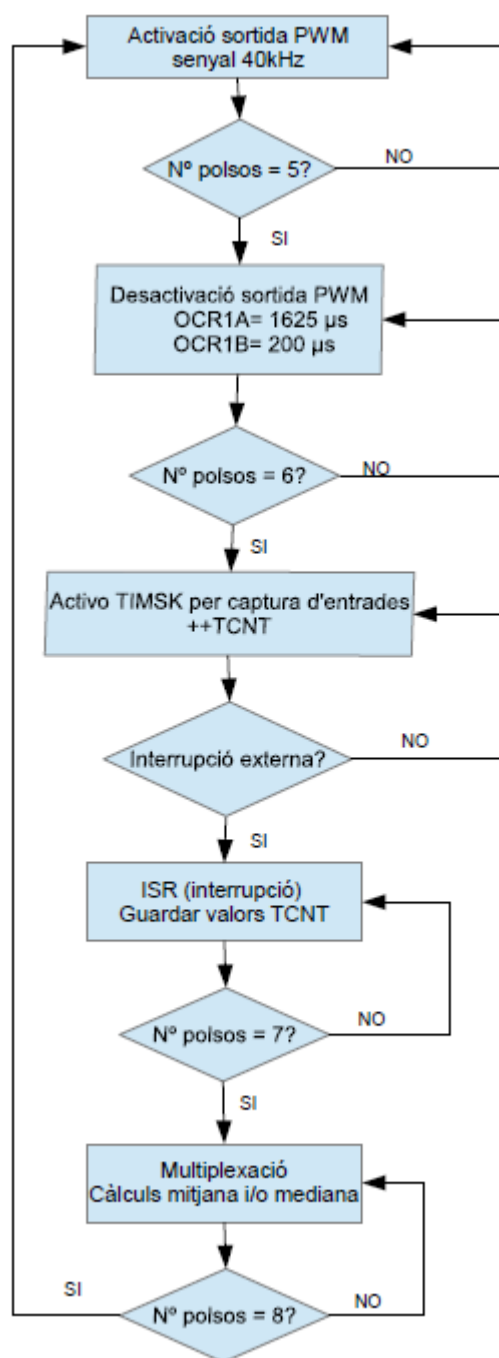


Figura 24. Diagrama flux programa complet

Un cop hem enviat 5 polsos desactivem la sortida i canviem el valor dels registres OCR, en aquest cas el OCR1A el posem molt gran per desbordar el comptador, i el OCR1B determina el temps que tarda fins a comptabilitzar un nou pols i per tant començar a esperar l'arribada del senyal. Es posa un valor de 200 µs en el OCR1B ja que és un temps que mai arribarem a superar ja que el nostre anemòmetre no seria capaç de mesurar i alhora augmentem les possibilitats de descartar dades errònies.



Un cop es guarda el valor del comptador amb el temps de vol al següent pols es fa el càlcul de la mediana i/o la mitjana i el canvi d'estat dels multiplexors en funció de l'estat en que ens trobem.

Cal remarcar que el programa ens fa la mediana de tres mostres d'un mateix eix i alhora ens fa la mitjana de les medianes, d'aquesta manera fent la mediana descartem mesures que estiguin molt allunyades o que siguin errònies i amb la mitjana aconseguim suavitzar les fluctuacions curtes d'aire en temps molt curts. Aplicant la mitjana i la mediana també aconseguim enviar les dades del vent amb una freqüència adequada per la lectura en temps real.

D'altra banda cal recalcar que implementant el programa descrit en el nostre anemòmetre observem que el temps entre dos recepcions consecutives d'una mateixa parella de sensors és de 3,76 ms temps suficient per assegurar que no hi ha problemes per sobreposició de senyals tal com hem vist al segon capítol on el nostre sensor té un temps d'establiment d'aproximadament 1,2 ms.

## 6. RESULTATS I COMPROVACIONS

En aquest capítol es mostren les diverses proves que fem a l'anemòmetre per comprovar el seu funcionament, en un primer moment provem l'anemòmetre amb un ventilador típic de tres aspes d'ús domèstic i en segon lloc amb un ventilador industrial capaç de generar vent a velocitats més altes, i així poder provar el nostre sistema en diferents circumstàncies i intensitats de vent.

En els dos casos l'adquisició de dades es fa amb el PLX-DAQ, un programa que ens guarda les dades que adquirim a través del port sèrie en un document Excel, cosa que ens facilita el treball per la posterior realització de gràfiques i interpretació de les mesures.

### 6.1. Ventilador domèstic 45 W

En aquest apartat es mostren les proves que fem amb un ventilador de 3 velocitats amb una potència de 45W, de tres aspes i amb un diàmetre de 40 cm. Per comprovar el funcionament de l'anemòmetre i la precisió de les seves dades es fan proves aplicant vent en sentit paral·lel al qual es vol fer la mesura, en aquest cas s'aplica en els dos eixos en sentit positiu per tal de poder verificar la veracitat de les mesures.

En els dos casos es comença a aplicar el vent en el sentit de mesura al cap d'uns 10 segons aproximadament d'haver començat a adquirir les dades i es va canviant la velocitat del ventilador, de major a menor, cada 25 segons aproximadament. Tant el sentit del vent com la posició de l'anemòmetre es mantenen constants durant tota la mesura. El ventilador es col·loca a una distància de 50 cm i a la mateixa altura que els sensors ultrasònics per garantir que arriba el màxim flux d'aire als sensors amb els quals estem fent la mesura. També cal remarcar que les proves es fan en un espai tancat fet que pot provocar que les mesures no siguin el més acurades possibles degut als retorns d'aire que es poden produir.

En les gràfiques següents es mostren els resultats de les velocitats i la direcció del vent després d'aplicar vent en l'eix EO.

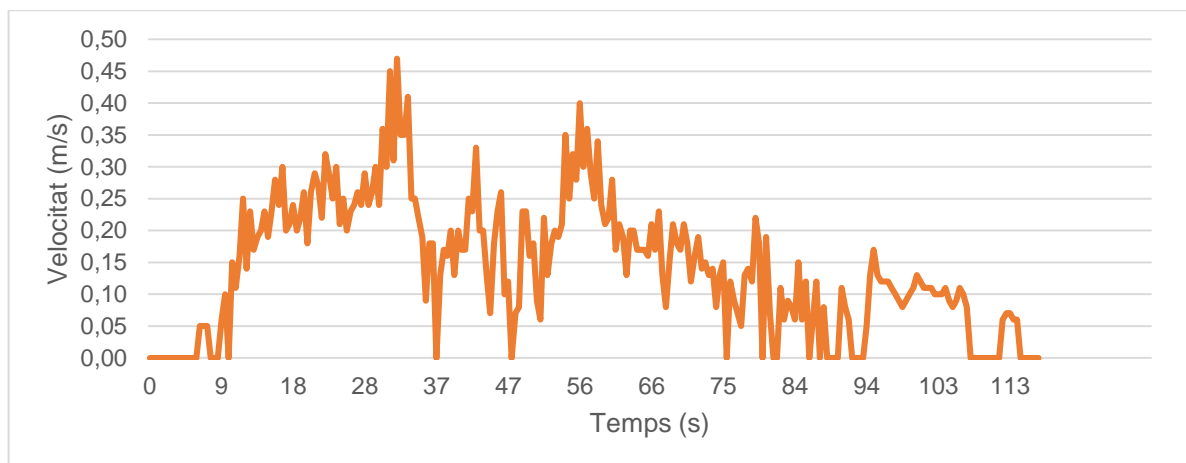


Figura 25. Velocitat eix NS

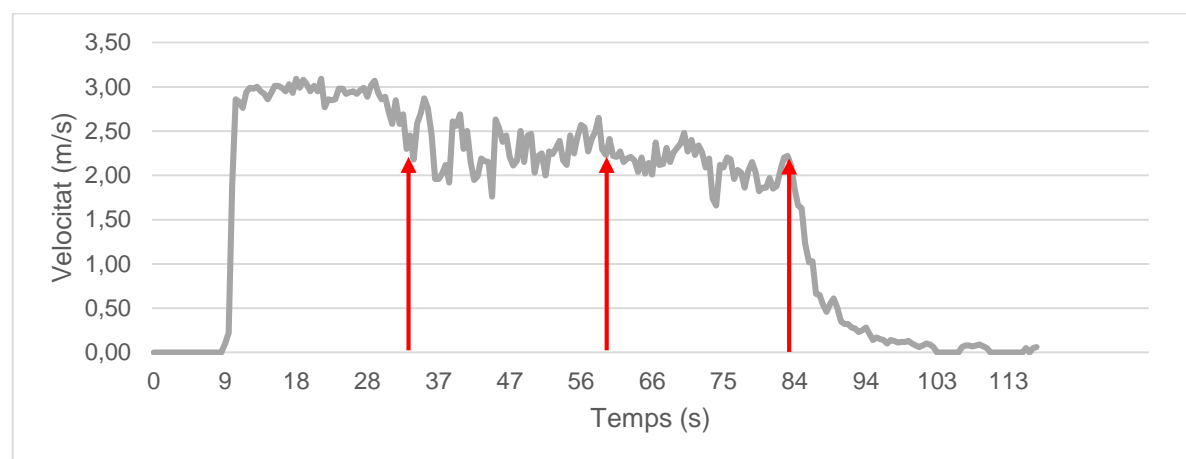


Figura 26. Velocitat eix EO

Com podem veure en la gràfica anterior les fletxes vermelles indiquen quan es produeix un canvi de velocitat en el ventilador. Pel que fa la gràfica de l'eix NS els valors de la velocitat són molt petits en comparació amb l'eix on s'aplica el vent, tot i així com que les velocitats en l'eix NS només són positives és possible que una part del flux del vent generat pel ventilador tingui el mateix sentit que el sentit positiu de mesura de l'eix NS.

Pel que fa les dades de mesura en l'eix on s'aplica el vent podem veure que la màxima velocitat que adquireix el ventilador és de 3 m/s, rang de velocitat en el qual l'anemòmetre treballa de manera molt més estable que no pas quan baixem de velocitat. Un cop fem el canvi a la velocitat intermèdia (35 segons) es veu clarament que el rang de mesura es situa principalment entre 2,0 i 2,5 m/s, i quan es canvia a la velocitat baixa (60 segons) el canvi de rang no es veu tan clar tot i que podem apreciar que les dades no superen els 2,5 m/s a diferència de la velocitat anterior.

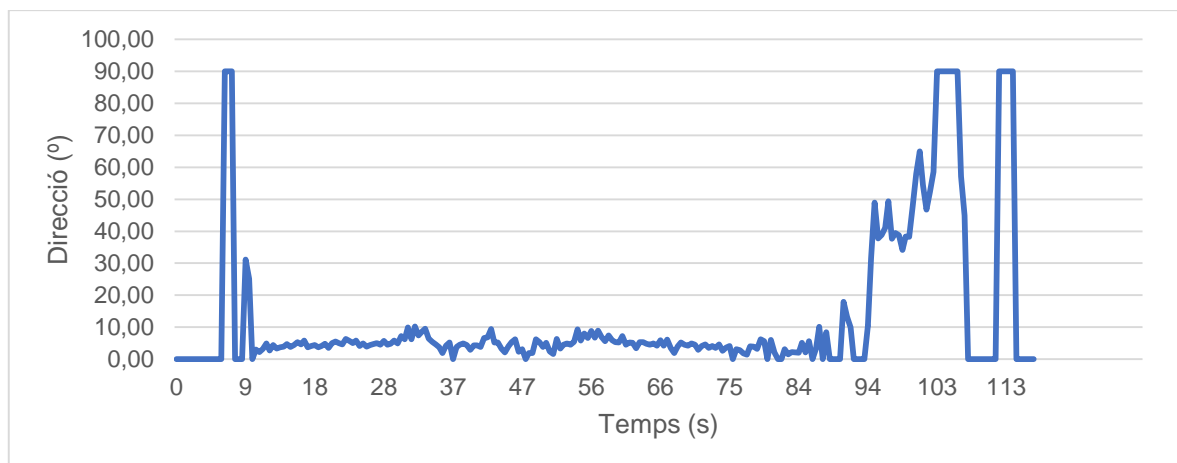


Figura 27. Direcció vent respecte eix EO

A partir de les velocitats en els dos eixos obtenim la direcció del vent respecte l'eix EO, i tal com podem veure en el gràfic de la direcció quan el vent s'ha estabilitzat la direcció és molt propera a 0 ja que el sentit del vent és paral·lel a l'eix de referència, però quan comença a agafar velocitat el ventilador, la direcció es situa durant un temps molt curt a 90° i de la mateixa manera quan hem apagat el ventilador (a partir 85 segons). Això es produeix perquè els valors de les velocitat en els dos eixos comencen a decreixer i igualar-se i fa que la possibilitat de tenir errors en la direcció del vent sigui major fins que no es tornin a estabilitzar els valors. Tot i així podem apreciar que quan la velocitat del ventilador és estable la mesura de la direcció es situa entre un rang entre 0 i 10 graus, valors bastant ajustats a la realitat.

De la mateixa manera que en el cas anterior en les gràfiques següents es mostren els resultats d'aplicar vent en l'eix NS.

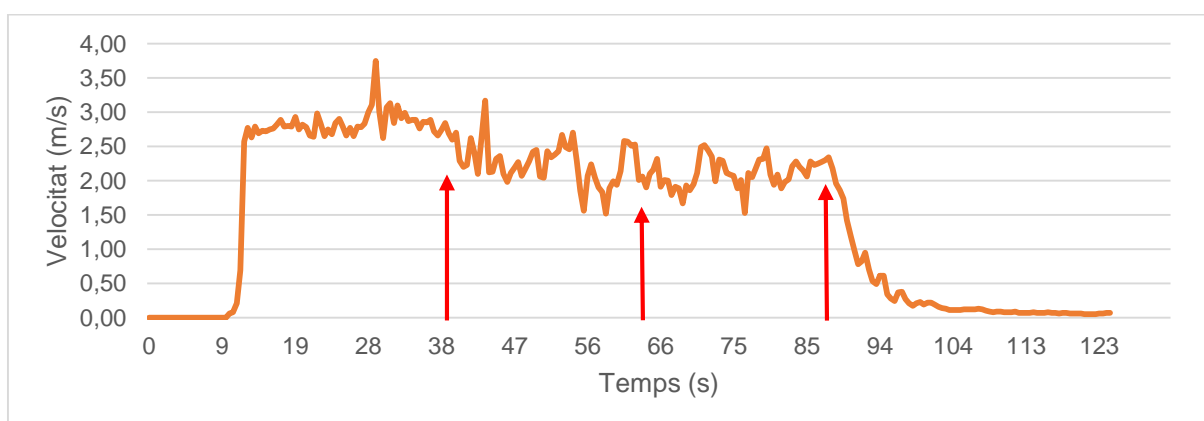


Figura 28. Velocitat eix NS

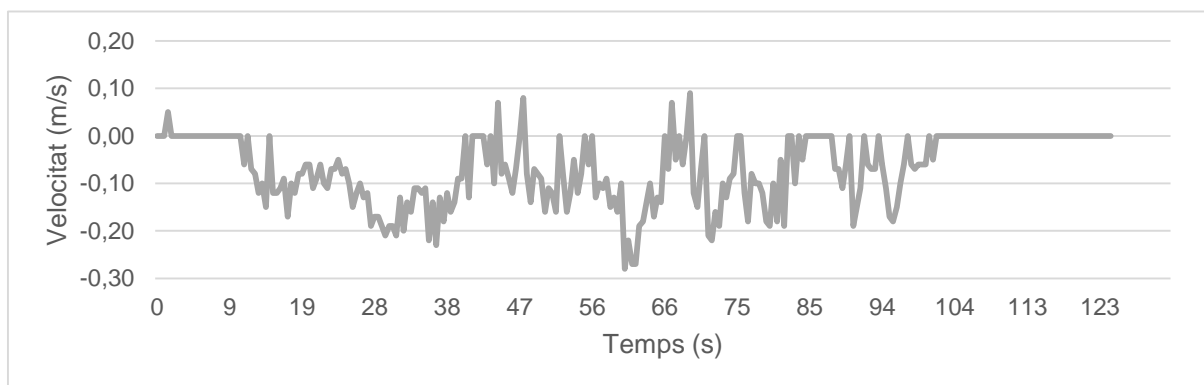


Figura 29. Velocitat eix EO

A diferència del cas anterior ara en l'eix EO és on tenim unes dades amb més soroll i d'una magnitud molt més baixa tot i que ara són majoritàriament negatives. Tot i així en l'eix de mesura que és el que ens interessa analitzar la velocitat del vent en el mode de velocitat ràpida del ventilador la velocitat es manté molt propera a 3 m/s valor molt semblant al cas anterior. Però d'altra banda en aquesta mesura ens costa més diferenciar el canvi de velocitat entre el mode de velocitat intermèdia (15 - 40 segons) i baix (40 - 65 segons), encara que és manté majoritàriament entre un rang de 2 i 2,5 m/s.

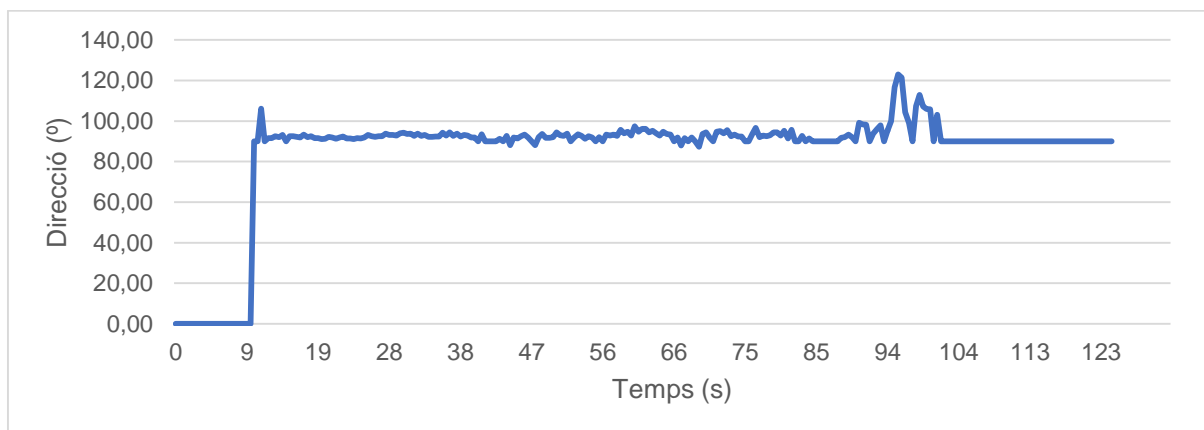


Figura 30. Direcció vent respecte eix EO

D'altra banda en aquest cas com que el vent s'aplica en l'eix perpendicular a l'eix EO ens dona un valor de 90 graus aproximadament, amb uns pics a l'inici (12 segons) i final (a partir dels 90 segons) de l'aplicació del vent corresponent a la marxa i parada del ventilador.

Finalment cal remarcar que en aquest tipus d'anemòmetres un dels inconvenients que presenta és que quan el vent que apliquem es paral·lel a la direcció dels sensors augmenten les possibilitats d'error ja que els braços que subjecten els sensors poden provocar canvis en el flux d'aire i arribar a produir turbulències, tot i així els canvis de velocitat del ventilador i la direcció del vent es poden apreciar en els resultats i les gràfiques.

## 6.2. Ventilador industrial 3,5 kW

Per fer les mesures amb velocitats superior a les que arribem a provar amb el ventilador domèstic utilitzem un ventilador accionat per un motor trifàsic de la casa ABB de 3,5kW que controlem mitjançant un variador de freqüència i que es troba dins el laboratori d'energies de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona.

Cal remarcar que aquest ventilador ens genera un flux d'aire no uniforme ja que al centre d'aquest es troba col·locat el motor i per tant pot fer que les mesures siguin imprecises, tot i així ens serveix per comprovar el funcionament de l'anemòmetre a velocitats més altes.

En una primera prova fem girar l'anemòmetre sobre si mateix de tal manera que puguem apreciar com fa la mesura en els dos eixos i amb quina precisió ens mostra la direcció del vent, a diferència de la prova amb el ventilador domèstic on l'anemòmetre es mantenia fixe.

En aquesta prova la velocitat del motor la mantenim a 15 Hz de manera constant ja que el que ens interessa és veure amb quina rapidesa i exactitud ens mostra els canvis de direcció, per això la velocitat màxima a la que arribem en aquesta prova és d'aproximadament 2,5 m/s.

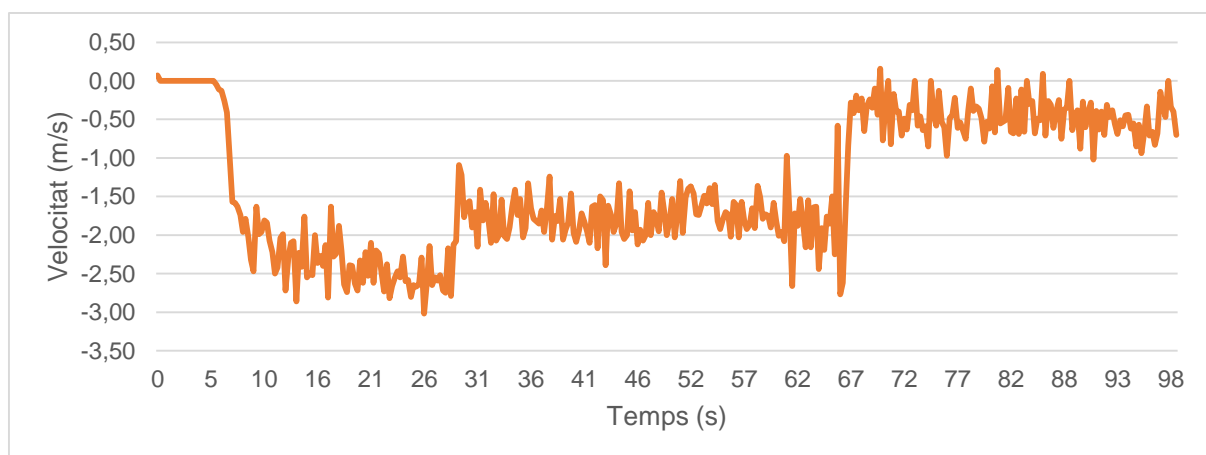


Figura 31. Velocitat eix NS

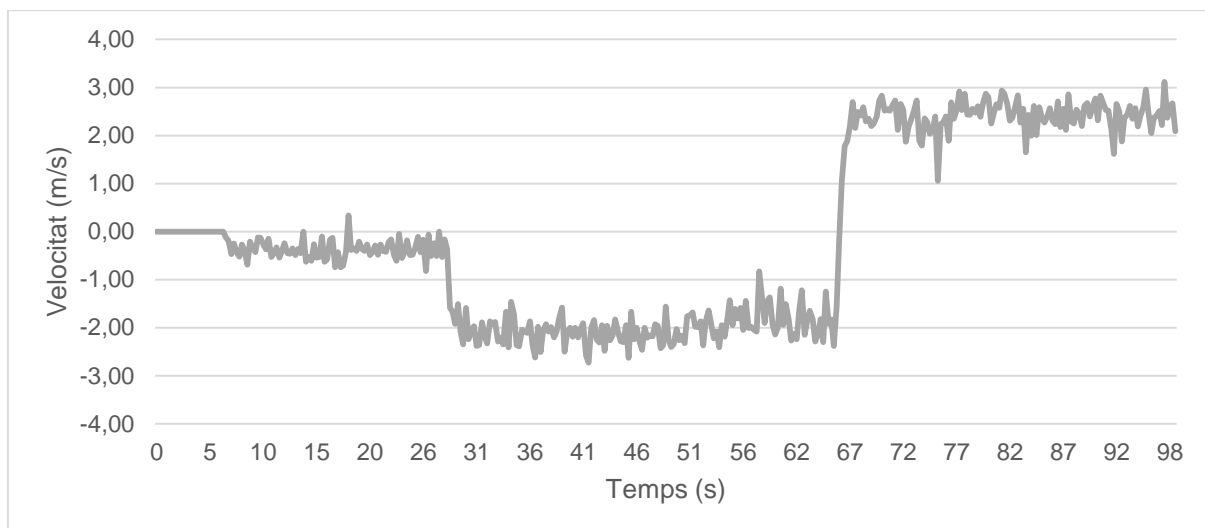


Figura 32. Velocitat eix EO

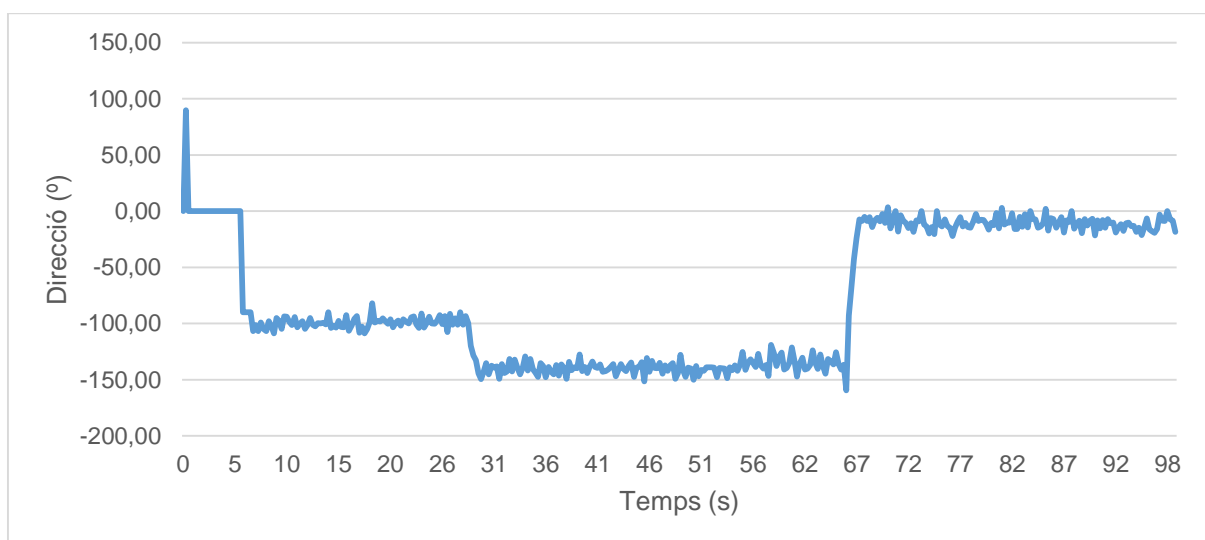


Figura 33. Direcció vent respecte eix EO

Tal com veiem a les gràfiques anteriors quan fem girar l'anemòmetre varien els valors de les velocitat ens els dos eixos i ens marca la direcció amb una precisió bastant bona. En aquest cas intentem encarar el vent a una direcció de  $-90^\circ$ ,  $-135^\circ$  i finalment a  $0^\circ$ . Aquesta prova la fem amb el ventilador industrial ja que amb el ventilador domèstic que no és estable ni fixe quan va a la màxima velocitat i en un espai més reduït resulta més difícil fer aquesta prova i poder arribar a veure resultats de la direcció amb una exactitud com la que obtenim en la gràfica anterior.

D'altra banda a les gràfiques següents es fa una prova mantenint l'anemòmetre fixe amb el flux d'aire paral·lel al sentit EO i variant la velocitat del motor mitjançant el variador de freqüència amb unes freqüències de 10, 20 i 30 Hz.

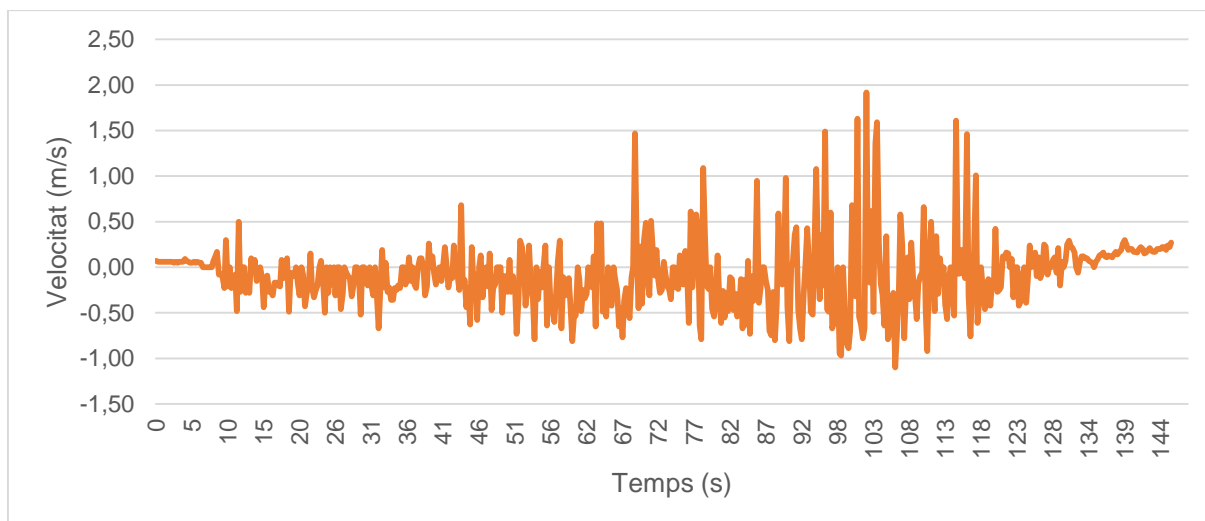


Figura 34. Velocitat eix NS

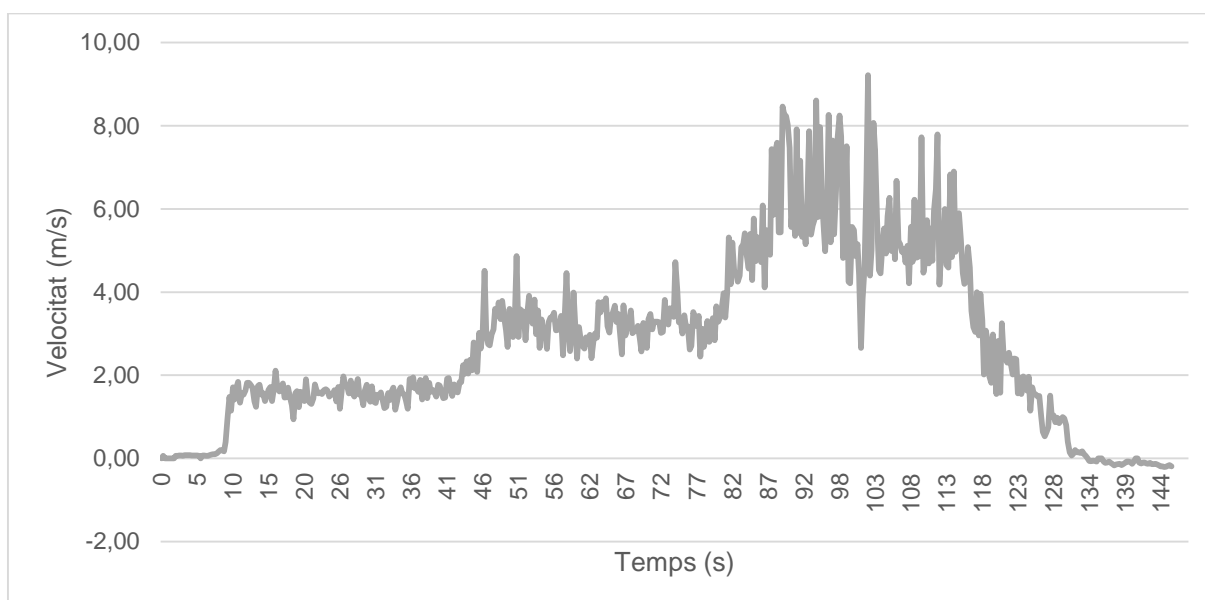


Figura 35. Velocitat eix EO

A la gràfica anterior podem observar que a partir dels 77 segons aproximadament que és quan posem el motor a 30 Hz aconseguim augmentar la velocitat del vent i alhora la mesura és més imprecisa. La limitació que trobem és en l'estructura de l'anemòmetre, i és el que ens posa un límit en la mesura de la velocitat màxima del vent ja que a velocitats molt més superiors a la de la prova la vibració dels braços es major i per tant les dades són més imprecises. A la gràfica anterior podem veure clarament com la mesura és més imprecisa a mesura que la velocitat és més alta i alhora de fer la prova observem com augmenta la vibració dels braços, però al mateix temps els salts de la velocitat del vent s'aprecien molt millor que en les proves amb el ventilador domèstic.



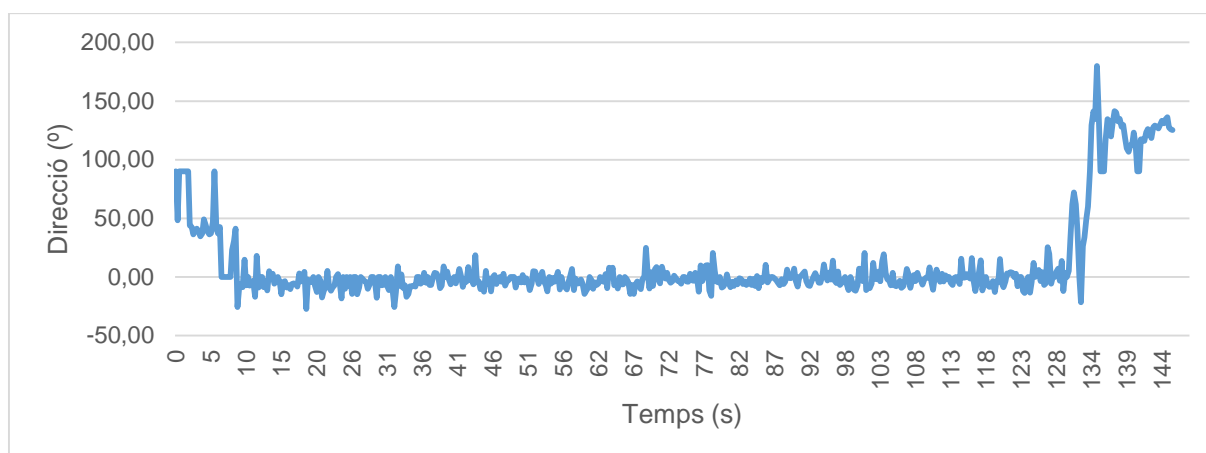


Figura 36. Direcció vent respecte eix EO

Pel que fa la direcció ens la mostra amb bastant exactitud a excepció de l'inici i final de la prova quan els valors dels dos eixos s'apropen com ha passat a les comprovacions anteriors.

Durant aquesta última prova es va fer una mesura simultània amb un anemòmetre manual d'aletes que disposa el mateix laboratori d'energies de la Universitat de Girona, es tracta concretament del model CFM Master8901 que mesura la velocitat del vent en un rang d'entre 0,4 i 35 m/s amb una resolució de 0,01 fins a 1 m/s. La mesura amb aquest anemòmetre només s'utilitza per validar que les dades del nostre anemòmetre són properes a les de l'anemòmetre comercial, i podem arribar a veure que les dos mesures es mouen dins un rang de valors molt semblants concretament amb una diferència màxima de 0,5 m/s, si es fa la mesura encarant els dos punts de mesura dels anemòmetres en el mateix lloc i altura.

Provant amb l'anemòmetre d'aletes acabem de confirmar que el flux d'aire generat pel ventilador no es constant ni en volum ni espai ja que les mesures es desorbiten molt en funció del lloc on es situa l'anemòmetre manual tenint en compte els paràmetres de resolució, el rang de mesura i el temps de resposta de l'anemòmetre d'aletes.

## **7. RESUM DEL PRESSUPOST**

El costos totals per l'adquisició dels elements que componen l'anemòmetre ultrasònic, el seu muntatge i la posterior comprovació ascendeixen a la quantitat de dos mil cent quaranta-i-dos euros amb onze cèntims, IVA no inclòs.

## 8. CONCLUSIONS

En aquest projecte s'han descrit tots els elements, procediments i comprovacions per dissenyar un anemòmetre basat en sensors ultrasònics del tipus dual, capaç de proporcionar la velocitat del vent en els dos eixos de mesura i la direcció del vent respecte l'eix de referència EO.

La tècnica utilitzada per saber la velocitat del vent es basa en el temps de vol, temps que tarda en arribar un senyal ultrasònic des d'un sensor emissor fins a un sensor receptor situat a una determinada distància i encarat a aquest. Les mesures dels temps de vol es fan de manera alternada en tots els eixos i amb una velocitat suficientment gran com per facilitar les dades amb una freqüència adequada, en aquest cas el temps de resposta del sistema és de 0,25 segons obtenint quatre mostres per segon. La resolució teòrica de les mesures de la velocitat del vent és de 0,06 m/s valor que coincideix a la pràctica quan la mesura es fa en condicions ambientals i de vent òptimes.

Les equacions utilitzades per determinar la velocitat del vent en un eix simplifiquen el programa i la part electrònica ja que no fa falta tenir en compte paràmetres que afecten la velocitat del so (temperatura, humitat, etc), i tampoc els retards produïts per la part electrònica ja que s'anul·len restant-se a si mateixos quan fem la diferència entre els temps de vol d'un mateix eix.

Així mateix les dades poden ser enviades a través del port sèrie que incorpora l'Arduino o a través de la pantalla LCD.

En relació amb les comprovacions fetes a l'anemòmetre hem pogut estudiar com és el funcionament a baixes velocitats i la seva precisió i a velocitat més altes amb un ventilador més potent concloent que la falta d'estabilitat en l'estructura és la causa de la imprecisió a altes velocitats. Tot i així les mesures de velocitat són coherents i comparant-les amb un anemòmetre manual d'aletes tal com hem dit no trobem diferències majors de 0,5 m/s.

Pel que fa el programa, implementem un codi el més simplificat possible considerant les tasques que ha de fer el microcontrolador per fer les mesures amb la màxima precisió possible i al mateix temps s'han implementat algoritmes per depurar les dades que puguin ser errònies o es surten d'uns certs límits com per exemple el filtre de la mitjana de les medianes i l'aplicació d'un llindar d'inici de mesura tenint en compte la resolució de l'anemòmetre.

Per acabar convé destacar que es preveuen millores a curt termini en l'anemòmetre dissenyat emmarcades dins un conveni de cooperació educativa amb la Universitat de Girona. On es treballarà amb sensors resistents a l'aigua per tenir un sistema que pugui ser apte en condicions ambientals adverses, una millora de l'etapa de filtratge com a conseqüència de la baixa sensibilitat que ofereixen aquest tipus de sensors a implementar i un reforç en els braços de l'estructura per aconseguir augmentar la velocitat màxima a la que pot treballar amb la màxima precisió i així mateix millorar l'estabilitat del sensors.

Sohayb Azibou-Mokrai Nabrisi-Bakkioui

Graduat en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

Girona, 28 de maig de 2018

## **9. RELACIÓ DE DOCUMENTS**

El present projecte està compost per 5 documents:

Memòria, plànols, plec de condicions, estat d'amidaments i pressupost.

## 10. BIBLIOGRAFIA

Accolti, E., Veca, A. Ultrasonidos para ingenieros y estudiantes de ingeniería. Instituto de Ingeniería Eléctrica. Universidad de la República. Uruguay. 2016

ATMEL. Atmega 328. ([http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P\\_Datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf), 10 de març de 2018)

Gaiza, X. Diseño y construcción de un amplificador de muy bajo ruido y un sistema de filtros para el acondicionamiento de señales de un transductor piezoeléctrico. Projecte Fi de carrera. Enginyeria tècnica industrial especialitat electrònica. Universitat Politècnica de Catalunya. Juny 2015.

Gilaberte, E. Implementación de sensores de ultrasonidos en un sistema autónomo de tiempo real. Projecte Fi de Carrera. Universidad Politécnica de Madrid. Març 2003.

GILL INSTRUMENTS. Tecnologia meteorològica. (<http://gillinstruments.com/>, 4 de maig de 2018)

Gwirc, S., Ferdeghini, F., Comastri, A., Lupi, D. Sensores ultrasónicos: respuesta a distintas formas de onda de emisión. Centro de Investigación y Desarrollo en Electrónica e Informática (CITEI). Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Buenos Aires, Argentina. 2007.

National Instruments. NI Ultiboard User Manual. (<http://www.ni.com/pdf/manuals/374488c.pdf>, 4 de maig de 2018)

NONGNU, Interrupcions. ([http://www.nongnu.org/avr-libc/user-manual/group\\_\\_avr\\_\\_interrupts.html](http://www.nongnu.org/avr-libc/user-manual/group__avr__interrupts.html), 10 de març de 2018)

Perez, M., Álvarez, J., Campo, J., Ferrero, J., Grillo, G. Instrumentación electrónica. Editorial Thomson. Gijón. 2014.

Pous, C. Disseny de circuits electrònics. Apunts desenvolupament de projectes d'electrònica. Universitat de Girona. 2017.

Texas Instruments. Precision Labs, Multiplexers. (<https://training.ti.com/ti-precision-labs-multiplexers>, 10 de març de 2018)

Wang, Y., Zhou, Y. To Measure Wind Speed using the theory of One-dimensional Ultrasonic Anemometer. Projecte Fi de Grau. Enginyeria electrònica/telecomunicacions. University of Gävle. Juny 2011.

WIKIPEDIA. Anemòmetre ultrasònic. ([https://en.wikipedia.org/wiki/Anemometer#Ultrasonic\\_anemometers](https://en.wikipedia.org/wiki/Anemometer#Ultrasonic_anemometers), 20 de febrer de 2018)

## 11. GLOSSARI

ACME: Analog Comparator Multiplexer Enable

ACSR: Analog Comparator Control and Status Register

ADCSRB: Analog Digital Converter Control and Status Register

CTC: Clear Timer on Compare

EO: Est-Oest

GBW: Gain-bandwidth

ICR: Input Capture Register

ISR: Interrupt Service Routine

LCD: Liquid Crystal Display

NS: Nord-Sud

OCR: Output Compare Register

PVC: Polyvinyl chloride

PWM: Pulse Width Modulation

SR: Slew Rate

USB: Universal Serial Bus



## A. PROGRAMARI

```
#include <math.h>
#include <LiquidCrystal.h>

//Assignació pins pantalla LCD
const int rs = 13, en = 12, d4 = 11, d5 = 2, d6 = 3, d7 = 4;
LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);

/*En funció de si volem mostrar les dades per la pantalla LCD o enviar-les pel port
sèrie posarem la seva respectiva variable a 1, però mai posarem les dues variables
amb el mateix valor*/

#define LCD 0
#define SERIAL_PORT 1

#define almux 8 //Canal selecció del multiplexor A1
#define a0mux 9 //Canal selecció del multiplexor A0
#define actmux 5 //Pin activació multiplexors
#define SENYAL 10 //Sortida senyal PWM
#define NUM_MITJANA 5 //Número de mostres per fer la mitjana mòvil
#define NUM_VOLTES 3 //Número de mostres per fer la mediana

//Distància de separació entre els transductors NORD-SUD i EST-OEST
#define DIST_NS 0.245
#define DIST_EO 0.245
#define LLINDAR_VEL_MIN 0.05 // Llindar velocitat mínima a mostrar
//Valors en hexadecimal del OCR1A pel PWM=399 (equivalent a 25 us)
#define OCR1AH_PWM 0x01
#define OCR1AL_PWM 0x8F
//Valors en hexadecimal del OCR1B pel PWM=199 (equivalent a 12,50 us)
#define OCR1BH_PWM 0x00
#define OCR1BL_PWM 0xC7

//OCR1A=26000 valor suficient gran per saturar el comparador i poder reiniciar-lo
#define OCR1AH_LONG 0x65
#define OCR1AL_LONG 0x90
//OCR1B=3200 (equivalent a 200 us), temps entre la desactivació del PWM i captura
d'entrada
#define OCR1BH_LONG 0x0C
#define OCR1BL_LONG 0x80

volatile unsigned int compt_pols; // Comptador dels polsos PWM
volatile unsigned int compt_voltes; //Comptador número de voltes
volatile unsigned int compt_mitjana; // Comptador número de mostres mitjana
```

```

volatile unsigned int calcula; //Avisa que hem fet totes les voltes
volatile unsigned int mux; //Indica en quin estat ens trobem per multiplexar
volatile unsigned int envia; //Podem enviar les dades per port sèrie o LCD
volatile unsigned int z;
volatile float toffinal[4]; //Valor final del temps de vol
volatile float tof[4][NUM_VOLTES]; //Temps de vol per fer la mediana
volatile float velocitat_ns[NUM_MITJANA]; //Velocitat eix NS abans de fer la mitjana
volatile float velocitat_eo[NUM_MITJANA]; //Velocitat eix EO abans de fer la mitjana

void setup()
{
    compt_pols = 0;
    pinMode(almux, OUTPUT);
    pinMode(a0mux, OUTPUT);
    pinMode(SENYAL, OUTPUT);
    pinMode(actmux, OUTPUT);
    digitalWrite(actmux, HIGH); //multiplexors sempre a ON
    lcd.begin(16, 2);

    Serial.begin(9600);

    /*
    TCCR1A - Timer/Counter1 Control Register A
    Bit 7:6 - COM1A1:0: Compare Output Mode pel Canal A (Pin 15, Arduino Pin 9)
    Bit 5:4 - COM1B1:0: Compare Output Mode pel Canal B (Pin 16, Arduino Pin 10)
    Bit 3:2 - Reservat
    Bit 1:0 - WGM11:0: Waveform Generation Mode
    */
    TCCR1A = 0b00100011; //Canal B, Mode "Fast PWM" i "Clear Timer on Compare Match"

    /*
    TCCR1B - Timer/Counter1 Control Register B
    Bit 7 - ICNC1: Input Capture Noise Canceler
    Bit 6 - ICES1: Input Capture Edge Select
    Bit 5 - Reservat
    Bit 4:3 - WGM13:2: Waveform Generation Mode
    Bit 2:0 - CS12:0: Clock Select
    */
    TCCR1B = 0b11011001; //Cancel·lació de soroll, Flanc de pujada, Rellotge=16MHz,
    Mode "Fast PWM"

    /*
    TIMSK1 - Timer/Counter1 Interrupt Mask Register
    Bit 7,6 - Reservat
    Bit 5 - ICIE1: Timer/Counter1, Input Capture Interrupt Enable
    Bit 4,3 - Reservat

```

```

    Bit 2 - OCIE1B: Timer/Counter1, Output Compare B Match Interrupt Enable
    Bit 1 - OCIE1A: Timer/Counter1, Output Compare A Match Interrupt Enable
    Bit 0 - TOIE1: Timer/Counter1, Overflow Interrupt Enable
    */
TIMSK1 = 0b00000100;

/*
ADCSRB - ADC Control and Status Register B
    Bit 6 - ACME: Analog Comparator Multiplexer Enable
    */
ADCSRB = 0b00000000; // Multiplexor en OFF, s'utilitza pin predeterminat del
comparador

/*
ACSR - Analog Comparator Control and Status Register
    Bit 7 - ACD: Analog Comparator Disable
    Bit 6 - ACBG: Analog Comparator Bandgap Select
    Bit 5 - ACO: Analog Comparator Output
    Bit 4 - ACI: Analog Comparator Interrupt Flag
    Bit 3 - ACIE: Analog Comparator Interrupt Enable
    Bit 2 - ACIC: Analog Comparator Input Capture Enable
    Bits 1, 0 - ACIS1, ACIS0: Analog Comparator Interrupt Mode Select
    */
ACSR = 0b00000100; // Captura d'entrada del comparador activat, mode d'interruptió:
sortida de commutació

// Posem els valors corresponents a un senyal de 40kHz en els OCR
OCR1AH = OCR1AH_PWM;
OCR1AL = OCR1AL_PWM;
OCR1BH = OCR1BH_PWM;
OCR1BL = OCR1BL_PWM;
}
// Servei Rutina d'Interrupció pel "Output Compare Match" del registre B
ISR(TIMER1_COMPB_vect)
{
    ++compt_pols;
    switch (compt_pols)
    {
        // Si hem enviat els 5 polsos desactivem la sortida PWM i canviem els registres OCR1
        case (5):
            {
                TCCR1A = 0b00000011;
                OCR1AH = OCR1AH_LONG;
                OCR1AL = OCR1AL_LONG;
                OCR1BH = OCR1BH_LONG;
                OCR1BL = OCR1BL_LONG;
            }
    }
}

```

```

        break;
    }

    case (6):
    {
        /*
TIFR - Timer/Counter1 Interrupt Flag Register
    Bit 7,6 - Reservats
    Bit 5 - ICF1: Timer/Counter1, Input Capture Flag
    Bit 4,3 - Reservats
    Bit 2 - OCF1B:Timer/Counter1, Output Compare B Match Flag
    Bit 1 - OCF1A:Timer/Counter1, Output Compare A Match Flag
    Bits 0 - TOV1: Timer/Counter1, Overflow Flag
        */
        TIFR1 = 0b00100000; //Resetegem la bandera de captura d'entrada (ICF)
        TIMSK1 = 0b00100100; //Activem la interrupció per captures d'entrada (ICIE)

        break;
    }
//Control dels multiplexors i del número de mostres fetes
    case (7):
    {
        ++mux;
        mux &= 0b11;
        digitalWrite(almux, mux & 0b10); // Bit 1 de mux
        digitalWrite(a0mux, mux & 0b01); // Bit 0 de mux

        if (mux == 0b00) // Si hem fet un volta entra dins de la condició
        {
            ++compt_voltes;
            if (compt_voltes == NUM_VOLTES)
            {
                compt_voltes = 0;
                ++compt_mitjana;
                calcula=1; //Enviem dades a calcular, hem fet totes les voltes

                if (compt_mitjana == NUM_MITJANA)
                {
                    envia=1;
//Podem mostrar les dades perquè ja tenim les dades suficients per fer la mitjana
                    compt_mitjana=0;
                }
            }
        }
        break;
    }
}

```

```
//Sortida PWM a on, reiniciem el comptador i posem els valors del senyal de 40kHz
case (8):
{
    OCR1AH = OCR1AH_PWM;
    OCR1AL = OCR1AL_PWM;
    OCR1BH = OCR1BH_PWM;
    OCR1BL = OCR1BL_PWM;
    TCCR1A = 0b00100011;
    compt_pols = 0;
    break;
}
}

// Servei Rutina d'Interrupció per la captura d'entrada
ISR(TIMER1_CAPT_vect)
{
    //Lectura del valor del comptador a través dels registres ICR1L i ICR1H
    uint16_t valor_timer;
    uint8_t timer_low;
    timer_low = ICR1L;
    valor_timer = ICR1H;
    valor_timer <<= 8;
    //Afegim els últims 8 bits (ICR1L) del comptador a la variable final
    valor_timer |= timer_low;
    mux &= 0b11; //Passem valor dels dos últims bits de mux a binari
    tof[mux][compt_voltes] = valor_timer;
    TIMSK1 = 0b00000100; //Desactivem la captura d'interrupcions d'entrada
}

//Comparem la velocitat final amb el llindar de velocitat mínima que hem prefixat
float velocitat_corregida(float vel_final)
{
    float vel_final_abs = abs(vel_final);
    if (vel_final_abs == 0)
    {
        return vel_final_abs;
    }
    if (vel_final_abs < LLINDAR_VEL_MIN)
    {
        vel_final = 0;
        return vel_final;
    }
    if (vel_final_abs > LLINDAR_VEL_MIN)
    {

```

```

    return vel_final;
}
}

//Ordenem els números de l'array i agafem el valor intermedi, extracció mediana
float valor_intermedi( volatile float tof[4][NUM_VOLTES], int z)
{
    int i, j, flag = 1;
    int temp;
    float tof_intermedi;
    for (i = 1; (i <= NUM_VOLTES) && flag; i++)
    {
        flag = 0;
        for (j = 0; j < (NUM_VOLTES - 1); j++)
        {
            if (tof[z][j + 1] < tof[z][j])
            {
                temp = tof[z][j];
                tof[z][j] = tof[z][j + 1];
                tof[z][j + 1] = temp;
                flag = 1;
            }
        }
    }
    tof_intermedi=tof[z][1]*62.5e-9;
    return tof_intermedi;
}

void loop()
{
    if (calcula)
    {
        for (z = 0; z <= 3; z++)
        {
            toffinal[z] = valor_intermedi(tof,z);
        }
        z = 0;
    }
    //Càlcul de les velocitats en els dos eixos
    float vel_ns = ((1 / (toffinal[1])) - (1 / (toffinal[0]))) * (DIST_NS / 2);
    float vel_eo = ((1 / (toffinal[3])) - (1 / (toffinal[2]))) * (DIST_EO / 2);
    // Guardem les velocitats en un array que ens servirà per fer la mitjana
    velocitat_ns[compt_mitjana] = vel_ns;
    velocitat_eo[compt_mitjana] = vel_eo;

    // Un cop s'ha fet la mediana i aplicat el llindar mínim fem la mitjana de 5 dades
    i les enviem per port sèrie o per la pantalla

```

```
    if (envia)
    {
        //Calculem la mitjana de la velocitat en cada eix, en aquest cas per cada 5 mostres
        float velocitatfinal_ns =
        velocitat_corregida((velocitat_ns[0]+velocitat_ns[1]+velocitat_ns[2]+velocitat_ns[3]
        ]+velocitat_ns[4])/NUM_MITJANA);

        float velocitatfinal_eo =
        velocitat_corregida((velocitat_eo[0]+velocitat_eo[1]+velocitat_eo[2]+velocitat_eo[3]
        ]+velocitat_eo[4])/NUM_MITJANA);

        //Calculem la direcció del vent respecte l'eix EO
        float direccio = (atan2(velocitatfinal_ns, velocitatfinal_eo)) * (57.2958);

        if (SERIAL_PORT==1)//Envia dades pel port sèrie
        {
            Serial.print("NS: ");
            Serial.println(velocitatfinal_ns);
            Serial.print("                EO: ");
            Serial.println(velocitatfinal_eo);
            Serial.print("                                DIR: ");
            Serial.println(direccio);
            envia=0;
        }
        if (LCD==1)//Envia dades per la pantalla LCD
        {
            lcd.setCursor(0, 0);
            lcd.print("NS");
            lcd.setCursor(3, 0);
            lcd.print(velocitatfinal_ns,2);
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print("EO");
            lcd.setCursor(3, 1);
            lcd.print(velocitatfinal_eo,2);
            lcd.setCursor(10, 1);
            lcd.print(direccio,2);
        }
        calcula = 0; //Posem calcula a 0 fins que es torni a fer tot el càlcul de nou
    }
}
```

## B. ESPECIFICACIONS ANEMÒMETRE ULTRASÒNIC

A les taules següents es mostren les característiques de l'anemòmetre desenvolupat en aquest projecte:

Paràmetre	Valor
Velocitat màxima (m/s)	20,00
Llindar d'inici (m/s)	0,06
Resolució velocitat (m/s)	0,06
Rang direcció del vent (°)	0 - 359
Resolució direcció del vent (°)	5

Taula 6. Velocitat i direcció del vent

Paràmetre	Valor
Pes (kg)	0,65
Dimensions (cm)	32x32x50
Temperatura d'operació (°C)	-30 fins 70

Taula 7. Mecànica

Paràmetre	Valor
Transmissió de dades	USB o LCD
Baud rates comunicació USB (Bd)	300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 28800, 38400, 57600 o 115200
Temps de resposta (s)	0,25
Tipus d'alimentació	USB 5 V DC 7-12V DC (pins Vin i GND)
Unitats velocitat i direcció	m/s i graus
Voltatge d'operació (V)	5,00

Taula 8. Alimentació i comunicació