



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

**Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica**

**CARACTERITZACIÓ I IMPLEMENTACIÓ DE TRANSDUCTORS  
ACÚSTICS PEL SEGUIMENT D'ESPÈCIES MARINES**



**Memòria i Annexos**

**Autor:** Martí Majó Batlle  
**Director:** Spartacus Gomariz Castro  
**Co-Director:** Ivan Masmitja Rusiñol  
**Convocatòria:** Primavera 2020



## **Resum**

Aquest treball estudia les comunicacions subaquàtiques amb l'objectiu de fer un seguiment d'escamarlans dins d'una reserva marina, centrant-se en el sistema de seguiment mitjançant etiquetes acústiques.

Primerament s'ha fet un estudi exhaustiu dels diferents mètodes de comunicació subaquàtica per concloure quin dels tres predominants (ones electromagnètiques, impulsos òptics i ones acústiques), és el més adient per la present aplicació. Un cop conclòs que les ones sonores es tracta del mètode de comunicació més eficaç en el cas que ens ocupa, es fa una recerca de diferents sistemes i dispositius per realitzar aquestes comunicacions, centrant-se en les etiquetes acústiques.

En segon lloc es fa un estudi de diferents materials piezoelèctrics encapsulats, buscant les freqüències de ressonància i el SPL, per observar els seus pros i contres per utilitzar-los com a element emissor en una etiqueta acústica.

La intenció inicial del projecte era encapsular diferents piezoelèctrics amb diferents materials per extreure'n la combinació de quin piezoelèctric amb quin encapsulat resulta més eficaç, però degut a la impossibilitat d'accedir al laboratori degut al COVID, s'ha realitzat l'estudi sobre varis piezoelèctrics disponibles en el laboratori ja encapsulats.

## Resumen

Este trabajo estudia las comunicaciones subacuáticas con el objetivo de hacer un seguimiento de cigalas dentro de una reserva marina, prestando especial atención en el sistema de seguimiento usando etiquetas acústicas.

En primer lugar, se ha realizado un estudio exhaustivo de los distintos métodos de comunicación subacuática para concluir cuál de los tres considerados (ondas electromagnéticas, impulsos ópticos i ondas acústicas), es el mejor para la presente aplicación. Una vez concluido que las ondas sonoras se tratan de el método de comunicación más efectivo en el presente caso, se hace una búsqueda de diferentes sistemas y dispositivos para realizar estas comunicaciones, centrado en las etiquetas acústicas.

En segundo lugar, se hace un estudio de distintos materiales piezoeléctricos encapsulados, buscando sus frecuencias de resonancia y su SPL, para observar sus pros y contras para ser utilizados como elemento emisor en una etiqueta acústica.

La intención inicial del proyecto era encapsular distintos piezoeléctricos con distintos materiales para extraer la combinación de piezoeléctrico y material encapsulador que realizara una emisión más eficaz, pero dado a la imposibilidad de acceder al laboratorio provocado por el COVID, se ha realizado el estudio sobre varios piezoeléctricos ya encapsulados disponibles en el laboratorio.

## **Abstract**

This paper focuses on studying everything related to underwater Communications with the aim of monitoring benthic species within a marine reserve, and thoroughly studies the tracking System using acoustic labels.

Firstly, an exhaustive study of the different methods of underwater Communications has been made to conclude which of the three predominant ones (electromagnetic waves, optical pulses and acoustic waves) is the most suitable for the present application. Once it was concluded that sound waves are the most effective method of communication in the case at hand, a search is made for different Systems and devices to make these Communications focusing on acoustic labels.

Secondly, I studied the different encapsulated piezoelectric materials, looking for resonant frequencies and the SPL, to value their pros and cons for using them as an emitting element on an acoustic label.

The initial intention of the project was to encapsulate different piezoelectric with different materials to extract the combination of which piezoelectric and encapsulation is more effective, but due to the impossibility of accessing the laboratory due to COVID, the study is made based on various piezoelectric already encapsulated available in the laboratory.



## **Agraïments**

Un cop acabat el treball, amb la satisfacció que això comporta volia dedicar unes paraules a la gent que directa o indirectament han contribuït.

Primer de tot, dono les gràcies al meu tutor Spartacus Gomariz i a la mateixa universitat per brindar-me l'oportunitat de poder realitzar un treball que em permetés combinar el meu interès per l'enginyeria i el meu amor pel mar.

A continuació, vull agrair la implicació en aquest treball del Co-Director Ivan Masmitjà, sense la seva ajuda m'hagués costat bastant més familiaritzar-me amb el projecte.

També he d'agrair a molta gent que m'ha ajudat durant el treball, entre molts altres moments, en especial als meus germans Lluís i Laia, als meus pares i al meu oncle, i més gent que donades les circumstàncies no m'atreveixo a mencionar.

Moltes gràcies.

Martí Majó Batlle.







# Índex

<b>RESUM</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRAÏMENTS</b>	<b>V</b>
<b>1. PREFACI</b>	<b>1</b>
<b>2. INTRODUCCIÓ</b>	<b>3</b>
2.1. Escamarlà .....	4
2.2. Reserva marina .....	4
2.3. Etiqueta acústica .....	5
<b>3. LES COMUNICACIONS A DISTÀNCIA</b>	<b>7</b>
3.1. Ones .....	7
3.2. Modulació d'ones.....	9
3.3. Mètodes de comunicació i influència del medi aquàtic.....	15
3.3.1. Ones electromagnètiques .....	15
3.3.2. Impulsos òptics .....	20
3.3.3. Ones acústiques.....	22
3.4. Valoració mètodes de comunicació .....	28
<b>4. DISPOSITIUS COMUNICACIONS ACÚSTIQUES</b>	<b>29</b>
4.3. Hidròfons.....	29
4.4. Mòdems acústics .....	32
4.4.1. Models comercials.....	32
4.4.2. Casos pràctics .....	33
4.5. Sonar .....	34
4.6. Telemetria acústica .....	34
4.6.1. Etiquetes acústiques.....	35
4.6.2. Receptors.....	36
4.6.3. Trajectòria telemetria acústica.....	36
4.6.4. Estat actual del mercat.....	37
<b>5. ESTUDI EXPERIMENTAL DE DIFERENTS TRANSDUCTORS PIEZOELÈCTRICS</b>	<b>39</b>
5.3. Freqüència de ressonància .....	40

5.3.1. Assaig realitzat .....	40
5.3.2. Procediment Resultats i interpretació.....	46
5.3.3. Conclusions freqüències de ressonància.....	55
5.4. Sound Pressure Level.....	56
5.4.1. Assaig realitzat .....	56
5.4.2. Procediment Resultats i Interpretació.....	59
5.4.3. Conclusions SPL.....	62
<b>6. VALORACIÓ PIEZOELÈCTRICS ESTUDIATS _____</b>	<b>63</b>
<b>7. ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL _____</b>	<b>65</b>
<b>CONCLUSIONS _____</b>	<b>67</b>
<b>PRESSUPOST I/O ANÀLISI ECONÒMICA _____</b>	<b>69</b>
<b>BIBLIOGRAFIA _____</b>	<b>75</b>
<b>ANNEX A (DIAGRAMA DE BLOCS VI ESCOMBRAT DE FREQÜÈNCIES) _____</b>	<b>78</b>
<b>ANNEX B (REPRESENTACIONS OBTINGUDES RINT. VS. FREQ.) _____</b>	<b>79</b>
<b>ANNEX C (VI SPL) _____</b>	<b>85</b>
<b>ANNEX D (REPRESENTACIONS OBTINGUDES SPL) _____</b>	<b>86</b>

## **1. Prefaci**

L'elecció d'aquest treball ha sigut fruit del meu amor pel mar. Tot i escollir estudiar el grau en enginyeria electrònica industrial i automàtica degut al interès que sento per les innovacions i les tecnologies emergents la meva motivació més gran sempre ha sigut el mar i tot el que l'envolta. Per aquest motiu vaig veure aquest treball com a la primera oportunitat de relacionar les meves dues aficions.





## 2. Introducció

Aquest treball està adherit al projecte coordinat "Reserves marines d'interès pesquer com a eina de gestió per recuperar pesqueries icòniques del mediterrani: el cas de l'escamarlà *Nephrops norvegicus*" o RESNEP. Un projecte finançat per l'Agència Estatal d'Investigació que té com a objectiu principal la investigació de les activitats marítimes en zones de pesca, sent l'activitat objecte d'estudi principal la mateixa pesca, degut a que es considera l'activitat causant un impacte més elevat, per estudiar com es pot millorar la situació de sobreexplotació de les aigües mediterrànies, on tant les poblacions d'espècies com la mida d'aquestes estan disminuint considerablement. Aquest projecte ha agafat com a objecte d'estudi l'escamarlà o *Nephrops norvegicus* degut a que una gran part de l'activitat pesquera de la costa mediterrània d'Espanya es basa en la pesca d'aquest animal i les facilitats que presenta aquesta espècie pel seu estudi.

Un dels projectes relacionats amb el RESNEP és el SASES. Aquest projecte persegueix el desenvolupament tecnològic pel seguiment d'espècies marines, i un dels seus objectius és el disseny d'una l'etiqueta acústica per seguir les poblacions d'escamarlà.

L'objectiu d'aquest treball és col·laborar en aquest projecte en el disseny de l'element emissor de l'etiqueta acústica, avaluant diferents materials piezoelèctrics per dur a terme aquesta funció.

Inicialment, l'objectiu era encapsular diferents materials piezoelèctrics amb diferents materials aïllants, posteriorment avaluar la resposta de cada un i definir quines avantatges i desavantatges presenta cada un per utilitzar-se com a element emissor de l'etiqueta. Però, degut a la situació provocada pel COVID i al confinament no s'ha disposat del temps suficient. Per tal d'obtenir un projecte amb uns continguts semblants, s'ha realitzat aquesta avaluació amb sis piezoelèctrics ja encapsulats que estaven a disposició en el laboratori, incloent un estudi teòric de les comunicacions subaquàtiques, l'estudi de les freqüències de ressonància i l'eficiència d'emissió de diferents piezoelèctrics.

A continuació es fa una breu pinzellada de l'entorn en el que es desenvoluparà el projecte, per més endavant poder justificar els continguts.

## 2.1. Escamarlà

L'escamarlà o *Nephrops norvegicus* és un crustaci decàpode de la família Nephropidae, aquesta espècie és molt apreciada en la cuina Mediterrània i internacionalment. El seu cos consta d'un abdomen allargat que pot arribar als 18 cm, dos potes davanteres llargues i amb pinces, les demés potes són considerablement més petites. Per realitzar aquest estudi es considerarà 10 cm com la mida mitja del abdomen d'aquesta espècie, degut a que aquest espai és l'únic on es podrà situar l'etiqueta sense influir en la mobilitat de l'animal serà de gran importància a la hora de valorar si les etiquetes resulten útils. De mitja pesen aproximadament 50 g. Habiten en zones de poca profunditat fins a 800 metres, majoritàriament en fons de sorra on poden amagar-se en petites galeries que ells mateixos construeixen. Tot i ser una espècie bastant sedentària solen sortir durant la sortida i posta del sol per alimentar-se. [8]



Figura 1. – *Nephrops norvegicus*. [8]

## 2.2. Reserva marina

La reserva on s'efectuaran les proves amb l'etiqueta acústica es troba a la Costa Brava, aproximadament a uns 25 km de la costa davant del massís del Montgrí. Es tracta d'una zona amb relativament poca activitat marítima, comparant-ho amb la majoria d'espais del litoral català, això és degut a que la costa és molt abrupta i de difícil accés. Independentment, també està situada en un dels punts amb més població d'escamarlans en base a un registre de pes de les captures dels pesquers de Roses i Palamós en kg/km<sup>2</sup> dels últims 10 anys. L'extensió d'aquesta és de 10 km<sup>2</sup>, basant-se en estudis anteriors de l'espècie es considera que amb una extensió menor seria suficient, però un dels objectius és conèixer amb exactitud la mida de les àrees de campeig i rang de dispersió de l'escamarlà. [30]

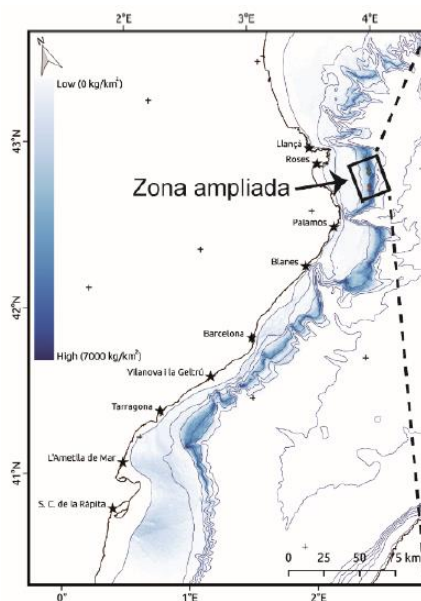


Figura 2. – Localització zona de proves. [30]

### 2.3. Etiqueta acústica

Les bases del projecte RESNEP estableix que s'espera de l'etiqueta dissenyada que emeti en un rang d'entre 100 i 200 m. També esmentà que generalment aquestes comunicacions es solen fer utilitzant freqüències entre els 69 i els 180 kHz. [30]





### 3. Les comunicacions a distància

Des dels inicis de la humanitat, l'evolució de l'espècie a nivell biològic ha anat de la mà d'avenços tecnològics per tal d'adaptar-se al medi, adquirint noves capacitats per sobreviure, en molts casos, imitant el que s'observava en altres espècies animals, en àmbits tant diferents com poden ser el desplaçament i crear un aparell que imiti la forma d'un ocell per volar, o en el de les comunicacions utilitzant les ones sonores per crear una imatge del medi.

Clarament, l'àmbit de les telecomunicacions, es tracta d'un dels punts on aquest progrés ha sigut de vital importància, tant per comunicar-se amb altres éssers humans com amb l'entorn.

La necessitat dels essers humans per enviar missatges a una distància major a la que el seu organisme permet va ser determinant. És per aquest motiu que, començant per les senyals de fum, passant pel telègraf entre infinitats d'altres innovacions, es van arribar a crear les connexions sense fil que ens permeten transmetre qualsevol tipus de dades a qualsevol lloc del planeta de forma pràcticament instantània. Fins arribar en el punt en el que ens trobem ara, en el que les comunicacions a distància s'han tornat imprescindibles per el nostre dia a dia.

#### 3.1. Ones

La majoria d'aquestes comunicacions es realitzen mitjançant ones. Una ona [1] és la propagació d'una pertorbació de naturalesa mecànica o electromecànica, que es defineix pels següents tres paràmetres:

- **Amplitud (A):** la distància màxima que s'assoleix entre l'ona i el punt d'equilibri.
- **Longitud d'ona ( $\lambda$ ):** la distància mínima que separa dos punts homòlegs en l'ona.
- **Període (T):** el temps que es tarda en recórrer un cicle, en altres paraules, el temps que es tarda en recórrer una vegada la longitud d'ona. La inversa d'aquesta unitat és la **freqüència (F)**, defineix el número de cicles que es donen per segon, la seva unitat de mesura és l'**HERTZ (Hz)**, aquesta unitat correspon a un cicle per segon.

Tots aquests paràmetres estan representats a la següent imatge:

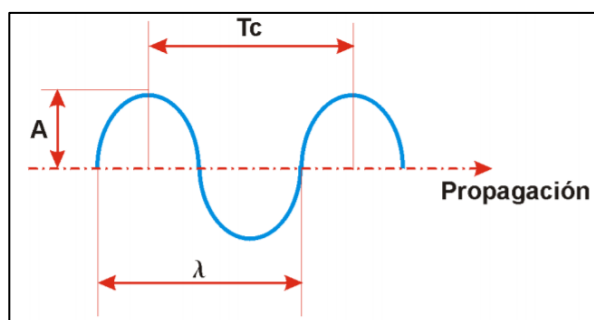


Figura 3. – Paràmetres d'una ona. [1]

La pertorbació en qüestió es propaga a una velocitat  $V$ . Aquesta es pot obtenir a partir de la següent equació, vàlida per qualsevol de les naturaleses de l'ona estudiada:

$$\lambda = \frac{V}{F}$$

(1)

És important tenir en compte que en cap cas es produeix una propagació de la matèria. Aquesta pot intervenir en la transmissió de les vibracions, com és el cas de les ones sonores, però no es propagarà.

Un cop definits tots aquests conceptes podem distingir entre dos grans grups d'ones en funció de la direcció en la que es produeix la pertorbació.

- **Ones transversals:** la pertorbació és perpendicular a la direcció de propagació de l'ona, és el cas de les ones provocades a l'aigua al llençar-hi una pedra.
- **Ones longitudinals:** la pertorbació és paral·lela a la direcció de propagació de l'ona, és el cas de les ones sonores.

En la següent imatge es representa la diferència entre els dos tipus d'ones:

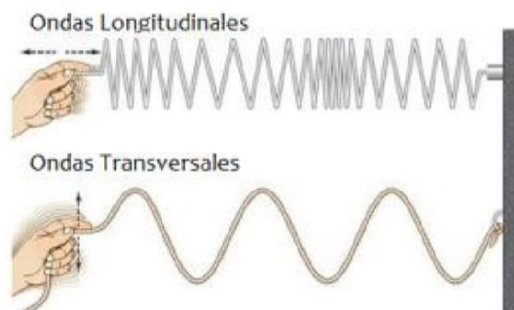


Figura 4.- Representació gràfica ones longitudinals i transversals [4]

### 3.2. Modulació d'ones

Des de la seva aparició, en la majoria de les telecomunicacions s'han utilitzat les ones i les seves propietats com a base degut a la rapidesa i eficiència de la seva transmissió. A grans trets aquest mètode de comunicació consisteix en generar una ona portadora  $c(t)$ , habitualment sinusoidal, amb unes característiques determinades i modular-la. En altres paraules, modificar una o diverses de les seves magnituds característiques (fig.3) per transmetre un missatge determinat  $m(t)$ , un cop realitzat aquest procés s'obté l'ona modulada  $s(t)$ . Aquest procés està representat a la imatge a continuació:

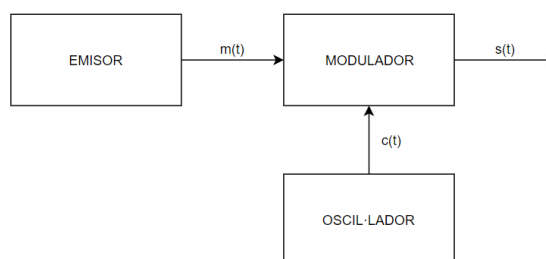


Figura 5.- Diagrama de blocs modulació.

Hi ha dos grans mètodes per realitzar aquesta modulació diferenciats pel tipus de funció moduladora:

- **Modulació analògica:** la modulació analògica, transmet informació que varia en el temps de forma contínua, és a dir, el senyal es pot representar com una funció matemàtica contínua en el domini del temps. A nivell pràctic la modulació analògica presenta com a avantatges principals un grau d'exactitud superior i una menor amplada de banda a utilitzar. Per altra banda aquests senyals són molt susceptibles al soroll i a les interferències, això provoca que en el cas d'haver una transmissió fallida aquesta no es podrà recuperar.
- **Modulació digital:** la modulació digital es tracta d'un mètode molt semblant, l'única diferència en aquest aspecte és que en lloc d'utilitzar una funció portadora contínua, s'utilitza una que pot adoptar un número determinat finit de valors discrets, habitualment dos: 1 i 0. Aquest mètode té certes desavantatges que podrien dificultar la comunicació en algunes aplicacions concretes, principalment que les dades es presenten de forma discreta, això es tradueix a un menor grau d'exactitud, aquest no sol resultar un gran inconvenient en la majoria dels casos. A més, presenta el gran avantatge de tenir una capacitat de transmetre dades de forma molt més eficient i modelable segons la necessitat.

Modulació analògica	Modulació digital
Més exactitud (domini continuu).	Menys exactitud (domini discret).
Amplada de banda menor.	Amplada de banda major.
Susceptible al soroll i interferències.	Robust davant de soroll i interferències.
Impossible recuperació de transmissions fallides.	Facilitat per recuperar transmissions fallides.
Menor capacitat de transmissió de dades.	Major capacitat de transmissió de dades.
Més econòmic.	Cost més elevat.
La informació s'ha de passar a un format digital per ser tractada.	Tractament de la informació més senzill.

*Taula 1.- Comparació modulació analògica i digital.*



En la gran majoria d'aplicacions, avui en dia s'escull la modulació digital, principalment per la robustesa de la comunicació i per les facilitats a la hora d'emmagatzemar i tractar la informació transmesa.

En qualsevol dels dos mètodes de modulació explicats anteriorment, l'ona portadora es tracta d'una ona sinusoidal, és a dir, té la següent forma:

$$c(t) = A_c * \text{Cos}(2\pi * f_c * t + \varphi_c) \quad (2)$$

On  $A_c$  és l'amplitud,  $f_c$  és la freqüència i  $\varphi_c$  és la fase. Modulant una d'aquestes tres variables s'obté cada un dels mètodes de modelatge de senyal:

- Modulació per canvi de fase: Aquest mètode utilitza la variació de la fase del senyal portador com a element transmissor. És a dir, substitueix la fase original per una en funció del senyal modulador.

$$\varphi_c = \varphi_0 + m(t) \quad (3)$$

On  $\varphi_0$  és la fase de l'ona portadora. D'aquesta forma fent les substitucions pertinents amb les equacions (2) i (3) obtenim l'equació que defineix el senyal modulad:

$$s(t) = A_c * \text{Cos}(2\pi * f_c * t + (\varphi_0 + m(t))) \quad (4)$$

En el cas d'utilitzar aquest mètode amb un modelatge digital, s'anomena PSK "*Phase Shift Keying*". Dins d'aquesta modalitat la més habitual és l'anomenada BPSK "*Binary Phase Shift Keying*", on el senyal modulador consta de dos únics valors complementaris: 0 i 180º,

d'aquesta forma cada salt de fase indica un canvi en el valor de la seqüència binària. Aquest cas es pot observar en la imatge a continuació:

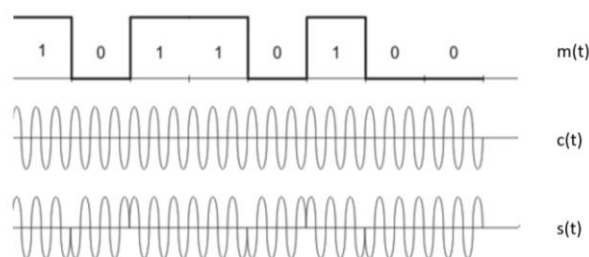


Figura 6.- Modelatge BPSK [39]

- Modulació per canvi d'amplitud: Aquest mètode utilitza la variació de l'Amplitud del senyal portador com a element transmissor. És a dir, genera una amplitud en funció del senyal modulador.

$$A_c = m(t) \quad (5)$$

D'aquesta forma fent les substitucions pertinents amb les equacions (2) i (5) obtenim l'equació que defineix el senyal modulad:

$$s(t) = m(t) * \text{Cos}(2\pi * f_c * t + \varphi_c) \quad (6)$$

Aquest mètode també s'utilitza per realitzar radiocomunicacions, s'anomena AM "Amplitude Modulating". Si parlem de la seva utilització en modulació analògica, ofereix més cobertura que els senyals FM, tot i que amb una amplada de banda més reduïda. En el cas d'utilitzar aquest mètode amb un modelatge digital, s'anomena ASK "Amplitude Shift Keying". Dins d'aquesta modalitat la més habitual és l'anomenada BASK "Binary Amplitude Shift Keying", on el senyal modulador consta de dos únics valors: un 1 en el cas que l'amplitud de l'ona sigui positiva, és a dir, que hi hagi una ona existent i constant; en el cas del 0, l'amplitud serà nul·la,

en altres paraules, aquest valor es transmetrà amb la pròpia absència de l'ona. Aquest cas es pot observar en la imatge a continuació:

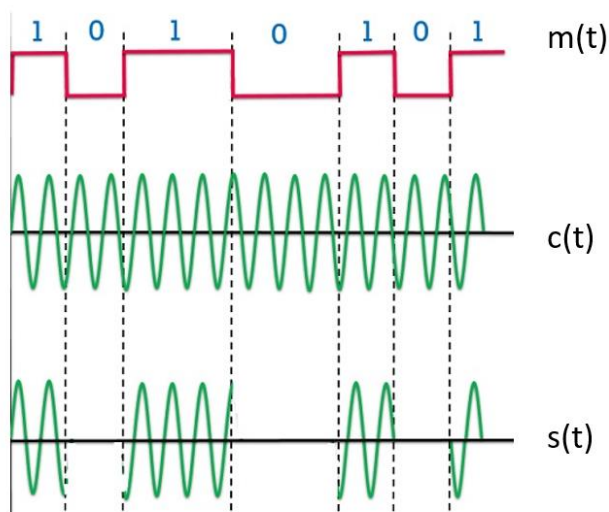


Figura 7.- Modelatge BASK [40]

- Modulació per canvi de freqüència: Aquest mètode utilitza la variació de la freqüència del senyal portador com a element transmissor. És a dir, genera una freqüència determinada en funció del senyal modulador.

$$f_c = m(t) \tag{7}$$

D'aquesta forma fent les substitucions pertinents amb les equacions (2) i (7) obtenim l'equació que defineix el senyal modulad:

$$s(t) = A_c * \text{Cos}(2\pi * m(t) * t + \varphi_c) \tag{8}$$

Aquest mètode és el més habitual si parlem de transmissió d'ones electromagnètiques, tant en modelatge analògic com digital. Això és degut a que presenta les següents avantatges: és més robust davant de soroll i interferències, necessita d'un consum de potencia considerablement més baix que els altres i permet la separació de canals adjacents per bandes de protecció. En el cas d'utilitzar aquest mètode amb un modelatge digital, s'anomena FSK "Frequency Shift Keying". Dins d'aquesta modalitat la més habitual és l'anomenada BFSK "Binary Frequency Shift Keying", on el senyal modulador consta de dos únics valors de freqüència per tal de transmetre la seqüència de zeros i uns desitjada. Aquest cas es pot observar en la imatge a continuació:

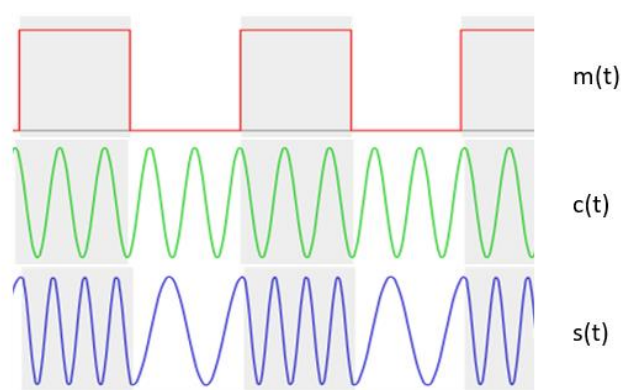


Figura 8.- Modelatge BFSK [41]

Un altre exemple de modulació per canvi de fase, utilitzat sobretot en comunicacions mitjançant ones acústiques són els senyals de freqüència modulada polsada o "Chirp". Es tracta d'una modulació que consisteix en una reducció o augment progressiu de la freqüència (fig.9). Aquest és el que es sol utilitzar per mètodes de comunicació subaquàtics com són el sonar o el radar. Aquestes ones presenten dos grans avantatges: permeten optimitzar l'energia de l'ona emesa i donat al gran ventall de freqüències utilitzades s'obté una resolució major. La imatge a continuació és la representació d'una ona Chirp de freqüència creixent representada en funció del temps:



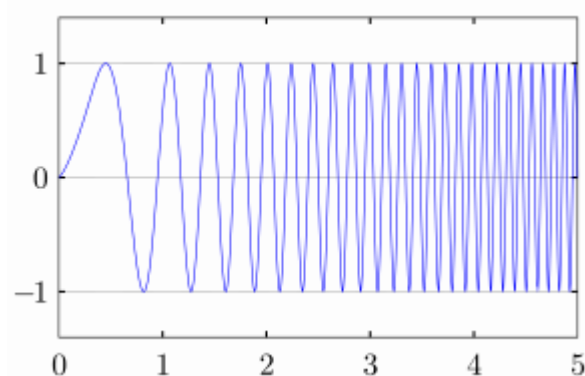


Figura 9.- Senyal Chirp [42]

En aquest apartat s'ha explicat quins paràmetres d'una ona es poden utilitzar per transmetre la informació tant analògica com digital. Tot i així existeixen casos en els que la importància del missatge no resideix únicament en la seqüència sinó en la simple presència de l'ona, com per exemple en el cas de la tecnologia de l'etiqueta acústica.

### 3.3. Mètodes de comunicació i influència del medi aquàtic

Per realitzar les comunicacions subaquàtiques a distància, es disposa de les mateixes tècniques que en un medi atmosfèric, però les diferències entre les dos situacions, generen clares diferències en la avaluació de cada un dels mètodes. També és de vital importància tenir en compte les propietats fisicoquímiques del medi al que s'enfrontarà la comunicació a dissenyar, no només valorar que es tracta d'un medi aquàtic, sinó les característiques concretes d'aquest: salinitat, conductivitat, transparència, etc.

Els mètodes a considerar per realitzar la comunicació són les ones electromagnètiques, els impulsos òptics i les ones sonores. En aquest apartat es farà un breu resum de cada un d'ells, comentant la influència del medi subaquàtic i les seves avantatges i desavantatges. Més endavant es farà una síntesis d'aquest anàlisi i es justificarà quina s'ha considerat la millor opció pel cas que ens ocupa.

#### 3.3.1. Ones electromagnètiques

Aquest mètode de transmissió de dades destaca en el medi atmosfèric, això és perquè presenta una gran avantatge que la fa despuntar davant de les seves alternatives. Es tracta de la seva capacitat per propagar-se sense necessitat d'un medi físic, aquesta propietat permet realitzar comunicacions en el buit a una velocitat de propagació molt elevada, 3.000.000 Km/s . Les comunicacions habituals amb ones electromagnètiques es solen realitzar amb ones de radiofreqüència o RF[1], aquest és el nom que

se li atorga a les comunicacions mitjançant senyals electromagnètiques utilitzant les freqüències de la porció del espectre electromagnètic amb menys energia, aquest es situa entre 3Hz i 300 GHz[1].

La principal avantatge de les ones EM és la seva capacitat de treballar a freqüències altes, permetent d'aquesta forma la disposició d'una amplada de banda major. Tot i així hi ha diversos factors que limiten el seu ús per realitzar aquesta classe de comunicacions.

Per tal d'avaluar el medi de transmissió de les ones RF, cal obtenir certs valors que defineixen les seves característiques i la seva interacció amb aquestes ones, aquests són: la conductivitat, la permeabilitat magnètica, i la constant dielèctrica.

- Conductivitat elèctrica: és la mesura de la capacitat d'un material o substància per deixar passar corrent elèctrica a través seu. Aquesta conductivitat es pot calcular amb la següent equació[12]:

$$\sigma = 0,18 * C^{0,93} [1 + 0,02 (T - 20)] \quad (9)$$

On T es la temperatura en graus Celsius i C la salinitat de l'aigua en parts per mil (ppm). Basant-nos en aquesta fórmula podem concloure que la conductivitat de l'aigua és directament proporcional a la temperatura i la salinitat d'aquesta. Considerant com a valor d'aquestes dos magnituds les seves mitjanes respectives en el mar mediterrani: C=34 ppm, T=20º C; obtenim una conductivitat de 4,78 S/m. Aquest valor, tot i estar una mica per sota, és molt pròxim al que es considera la Mitjana de conductivitat d'aigua marina, 5 S/m. En el cas de l'aigua dolça aquest valor és pràcticament zero, aquest fet ens demostra la importància de tenir en compte les propietats de l'aigua on s'ha de establir la comunicació[12].

- Permeabilitat magnètica: és la capacitat d'un material, medi o substància d'afectar i ser afectat per camps magnètics, així com la capacitat d'esdevenir font d'aquests, és a dir, la capacitat per crear-los sense la intervenció de cap corrent externa. Aquesta magnitud s'obté calculant el producte de la permeabilitat magnètica dels materials en el buit i la permeabilitat magnètica relativa del material estudiat, tal com s'indica a la següent equació [12]:

$$\mu = \mu_r * \mu_0 \quad (10)$$

El valor de la permeabilitat magnètica de l'aigua és de  $1,256637 \times 10^{-6}$  H/m [12].

- Constant dielèctrica: aquesta magnitud defineix, en un medi continuu, com un camp elèctric afecta a el material en qüestió. Aquesta magnitud s'obté amb el producte de la permeabilitat del buit ( $\epsilon_0$ ) i la permeabilitat relativa del material ( $\epsilon_r$ ), com s'indica en la següent equació [12]:

$$\epsilon = \epsilon_r * \epsilon_0 \quad (11)$$

Aquest valor també va en funció de les propietats de l'aigua així com la salinitat i la temperatura entre d'altres. Tot i això, està acceptat com a valor mig d'aquest paràmetre de l'aigua del mar a 20°C una permeabilitat relativa de 80. Fent els càlculs obtenim una permeabilitat de l'aigua del mar de  $7,08 \times 10^{-12}$  F/m [12].

Un cop hem obtingut tots aquests valors podem començar a valorar la naturalesa de l'aigua del mar com a medi conductor d'ones de RF. En altres paraules concloure si aquest medi s'ha de tractar com un medi dielèctric o un medi conductor a la hora de calcular la velocitat de propagació i les pèrdues per absorció. En el cas que el material es tracti d'un dielèctric es complirà la igualtat presentada en la primera equació presentada a continuació (12) [14], en el cas contrari, i si es compleix la igualtat presentada en la segona equació (13) [14].

$$\left( \frac{\sigma}{2\pi f\epsilon} \right)^2 \ll 1 \quad (12)$$

$$\left( \frac{\sigma}{2\pi f\epsilon} \right)^2 \gg 1 \quad (13)$$

Utilitzant els valors obtinguts anteriorment:  $\sigma = 4,78 \text{ S/m}$ ,  $\varepsilon = 7,08 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ , és compleix la segona igualtat en la gran majoria dels casos. En els casos de l'extrem de freqüències més altes no es compliria cap de les dos igualtats, el valor calculat oscil·laria al voltant de 1.

Un cop comprovat que en el cas d'estudi l'aigua marina s'ha de considerar un medi conductor s'ha de valorar els dos paràmetres escollits com a més significatius per valorar la comunicació: la velocitat de propagació i el coeficient d'absorció.

La velocitat de propagació de les ones RF en un medi que es consideri conductor, és directament proporcional a la freqüència de l'ona en qüestió. Aquesta velocitat s'obté amb la següent equació [10][14]:

$$c = \sqrt{4\pi f / \mu \sigma} \quad (14)$$

El coeficient d'absorció en aquestes condicions és directament proporcional a la freqüència, i ve donat per la següent equació [10][14]:

$$\alpha = \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (15)$$

Basant-nos en les últimes dos equacions comentades i amb els valors calculats anteriorment, s'ha obtingut utilitzant el software python, dos gràfiques exposades a continuació: on es mostra el valor de cada un d'aquests dos paràmetres en funció de la freqüència, en el rang de 30 kHz fins a 300 GHz, és a dir, el espectre de les ones de RF.

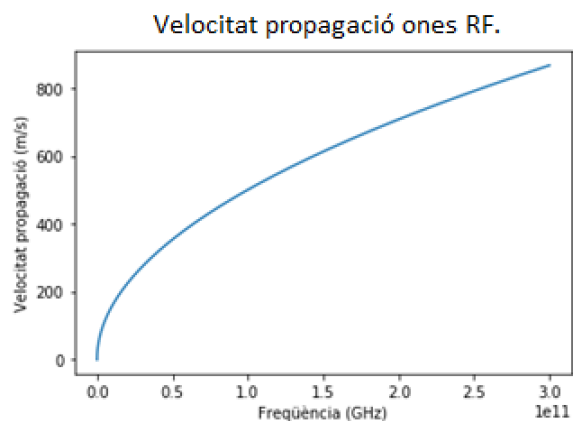


Figura 10.- Velocitat propagació ones RF.

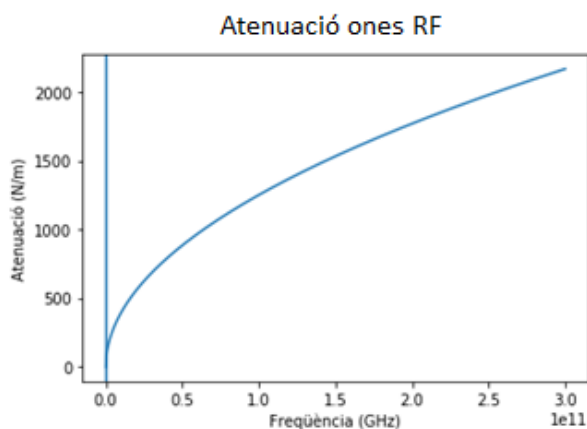


Figura 11.- Atenuació ones RF.

De les dos gràfiques anteriors podem extreure conclusions sobre la utilització de les ones EM com a mètode de comunicació dins de l'aigua salada. La velocitat de propagació és considerablement lenta, tot i que hi ha zones de la gràfica on aquesta velocitat es podria considerar suficient tot i ser considerablement menor a la velocitat del so dins l'aigua, aquestes pertanyen a la zona del espectre més alt, en concret a la Ultra High Frequency, Super High Frequency i Extremely High Frequency (fig10). Si es consideres com a opció utilitzar aquestes freqüències el problema que sorgiria seria el elevat grau d'atenuació de les ones (fig11). En definitiva, la atenuació que pateixen les ones es inversament proporcional a la freqüència d'aquestes, per tant a la velocitat, la conseqüència d'això és que utilitzant aquest mètode es podria obtenir una comunicació prou robusta, però a una velocitat insuficient; o una comunicació amb una velocitat adequada, però amb una degradació rapida de les ones, en altres paraules, es disposaria d'una distància d'emissió insuficient.

### 3.3.2. Impulsos òptics

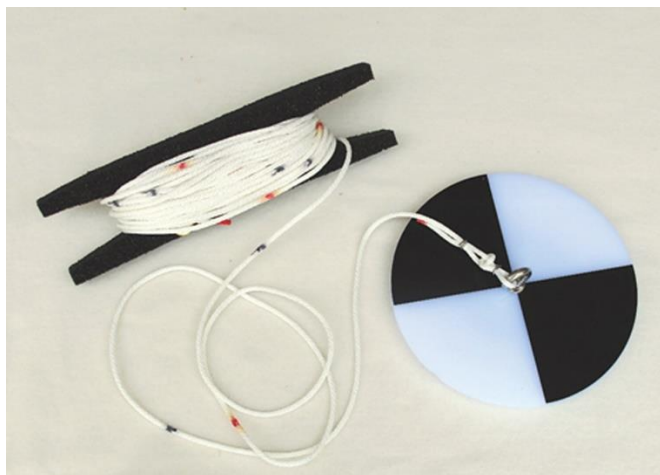
En física, la llum es considera una porció del espectre electromagnètic, concretament, la que es conté entre les longituds d'ona de 380 a 750 nm. La llum pot utilitzar-se com a mètode de transmissió d'informació. Dos exemples d'aquest mètode són l'ús de reflectors de senyals per enviar missatges en codi Morse o la fibra òptica. Cal destacar que aquest mètode només es pot utilitzar per realitzar una comunicació digital binària, ja que el senyal a enviar consta de dos únics valors: 1, llum encès i 0, llum apagat.

De la mateixa forma que amb les ones EM, cal tenir en compte que no totes les freqüències dins del espectre de la llum interaccionen de la mateixa manera amb el medi, quan més alta sigui la taxa de bits més ràpida serà la ona, però tindrà un índex de atenuació més elevat.

Com s'ha dit anteriorment, les propietats de la llum depenen del medi travessat i les seves característiques. En el cas d'un medi líquid, la intensitat baixa de forma considerable. Aquest fet és causat principalment pels següents dos motius [13]:

- Absorció: L'energia lumínica es converteix en energia d'un altre tipus, habitualment calor o energia química. Aquest fet és produït principalment pels següents processos:
  - Impacte amb partícules en suspensió.
  - La absorció energètica de la pròpia aigua.
  - Essers vius que utilitzen la llum com a font d'energia.
- Dispersió: Aquest fenomen és el resultat de l'impacte del raig de llum a diferents obstacles així com sòlids o partícules en suspensió, causant la desviació parcial del raig. Principalment l'impacte d'aquest fenomen depèn de la transparència de l'aigua.

Per tal de mesurar la transparència de l'aigua s'utilitza un instrument anomenat disc de Secchi [13], que utilitza un sistema tant eficaç com rudimentari. Aquest disc es va enfonsant poc a poc i es mesura a la profunditat en la que s'ha perdut de vista. A la fotografia a continuació hi apareix un disc de Secchi:



*Figura 12.- Aspecte disc Secchi. [13]*

Calcular l'energia dissipada per les partícules en suspensió es fa mitjançant un model matemàtic molt complex. La teoria de Lorenz-Mie és un model que ofereix una solució completament analítica a les equacions de Maxwell per tractar la dispersió de radiacions causada per partícules esfèriques, tot i que no quantifica el valor d'aquesta dispersió, ajuda a entendre la seva incidència en funció de les dimensions del obstacle i la longitud d'ona entre altres paràmetres.[13]

Aquest mètode de comunicació compleix tots els requeriments necessaris per utilitzar-se per realitzar comunicacions subaquàtiques degut a la alta velocitat de la llum, 224.844.349 m/s en aigua a 20°C, sempre i quant, en aquesta aigua es pugui garantir una transparència suficient, en aquesta condició es troba el primer obstacle per utilitzar-ho en aquest treball, ja que les zones costeres, degut al impacte de les ones entre altres factors, solen tenir una gran quantitat de partícules en suspensió, sobretot en períodes de temporals i durant les pluges quan s'avoca tota la matèria arrossegada per l'aigua al mar. En segon lloc, utilitzant aquest mètode de comunicació sorgeix un gran problema en aplicacions de seguiment d'espècies. Com s'ha explicat anteriorment els obstacles sòlids impossibiliten establir la comunicació, d'aquesta manera si l'animal a seguir es col·loques darrera una roca, un forat o qualsevol lloc on no hi hagués un camí directe entre emissor i receptor impossibilitaria establir la comunicació. Per últim, però no menys important, generar llum de forma constant o periòdica en el medi on viuen espècies marines podria incidir en els seus comportaments i activitats. Per aquest motiu es considera que aquest mètode no s'ajusta a el cas que ens ocupa.

### 3.3.3. Ones acústiques

Una ona sonora o acústica és una ona longitudinal que transmet una vibració (energia mecànica) de les partícules en una substància elàstica. Les variacions de pressió del medi produeixen un desplaçament de les molècules que el formen i aquestes transmeten la vibració a les seves veïnes. Aquesta reacció en cadena produeix la propagació de les ones sonores. L'oïda humana és capaç de captar sons que es situen en el espectre de freqüències entre els 20 i els 20.000 Hz, també anomenat espectre audible. Les freqüències menors a 20Hz s'anomenen infrasons, i les superiors a 20 kHz ultrasons.

Com en els demás casos, aquestes comunicacions tenen diversos factors que afecten a la comunicació a tenir en compte, degut a la interacció de l'ona amb les propietats fisicoquímiques de l'aigua i del medi. Els que s'ha considerat que tenen més incidència s'exposen a continuació:

- Velocitat de propagació:

Les ones sonores en l'aigua salada es propaguen a una velocitat mitja molt alta (1.533m/s), aquesta és inclús més alta que la del aire (340m/s) o a l'aigua dolça (1.493m/s). El motiu d'aquest fet és que al tractar-se de la propagació d'una vibració, quan més properes siguin les molècules més ràpida i efectiva serà, per això hi ha un salt molt important comparant aquesta magnitud entre diferents estats de la matèria. Tot i així aquesta velocitat depèn de molts factors. La següent fórmula aproxima la velocitat de propagació en funció dels tres paràmetres amb més incidència [15]:

$$c(T, S, z) = a_1 + a_2T + a_3T^2 + a_4T^3 + a_5(S - 35) + a_6z + a_7z^2 + a_8T(S - 35) + a_9Tz^3 \quad (16)$$

On T és la temperatura en graus centígrads, S la salinitat de l'aigua en ppm, z la profunditat en metres i  $a_{1-9}$  representen les constants, els valors de les quals es mostren a la següent taula:



Constant	Valor	Constant	Valor	Constant	Valor
a <sub>1</sub>	1448,96	a <sub>4</sub>	2,374x10 <sup>-4</sup>	a <sub>7</sub>	1,675x10 <sup>-7</sup>
a <sub>2</sub>	4,591	a <sub>5</sub>	1,34	a <sub>8</sub>	-1,025x10 <sup>-2</sup>
a <sub>3</sub>	-5,304x10 <sup>-2</sup>	a <sub>6</sub>	1,63x10 <sup>-2</sup>	a <sub>9</sub>	-7,139x10 <sup>-13</sup>

Taula 2.- Constants fórmula velocitat so en un medi aquàtic. [15]

Cal destacar que en l'estudi de la velocitat del so en funció d'aquests paràmetres, tots ells tenen una gran incidència i estan molt relacionats. Per aquest motiu resulta important no cometre errors com considerar alguna de les tres variables fixe, amb la variació d'una varien totes. En la següent imatge es representen aquests paràmetres en funció de la fondària.

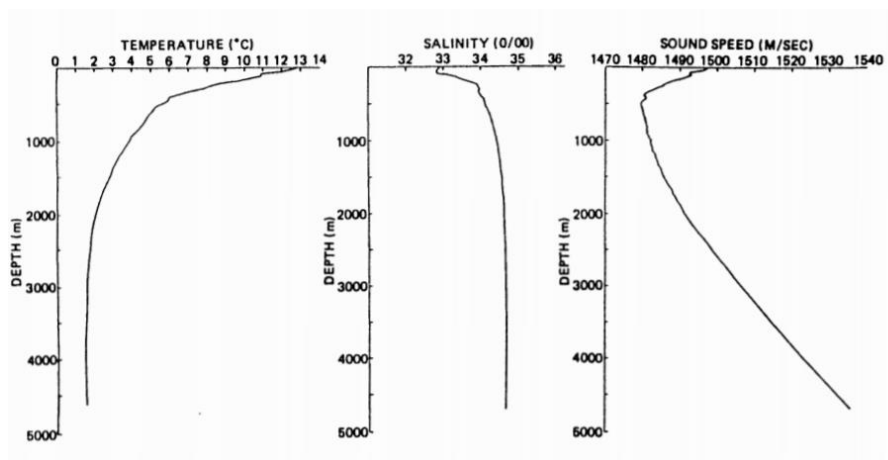


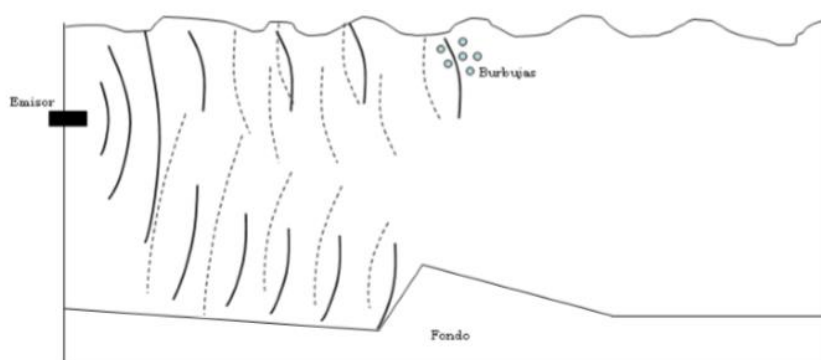
Figura 13.- Taules propietats aigua en funció de la profunditat. [15]

Com es pot observar, als primers 500 metres de profunditat, la velocitat de propagació disminueix, el motiu d'aquest fet és el canvi de temperatura, ja que al ser una variació molt ràpida incideix notablement en el resultat. A partir d'aquest punt tant la temperatura com la salinitat de l'aigua s'estabilitzen, per tant l'únic paràmetre que varia considerablement és la profunditat, quanta més profunditat i pressió hi hagi, les molècules estaran més juntes i això deriva a una velocitat major.

- Atenuació:

La atenuació és la pèrdua progressiva de l'energia per diferents fenòmens. Aquest fenomen generalment augmenta amb la freqüència del senyal i amb la distància. A continuació s'expliquen els més habituals en el cas de les ones acústiques sota un medi líquid [29]:

- Absorció: En el moment en que una ona sonora entra en contacte amb una superfície, la majoria de l'energia es reflexa, però una petita porció és absorbida pel material. Aquesta absorció pot ser més o menys significativa en funció del material en qüestió. Les ones acústiques, no en són una excepció i aquest efecte produeix la dissipació d'una part de l'energia. [29]
- Reverberació: Aquest fenomen és causat per l'energia dissipada en altres direccions com a conseqüència de l'impacte de l'ona acústica amb agents del medi així com partícules en suspensió, bombolles d'aire, etc. Com es mostra a la següent imatge [29]:



**Figura 14.- Fenomen reverberació. [29]**

- Refracció: La refracció és el canvi de direcció d'una ona al passar de forma obliqua d'un medi a un altre amb diferents densitats. Aquest efecte pot produir pèrdues del so si la comunicació s'efectua en una zona propera a la superfície, ja que una porció de l'energia canvia de medi, és a dir, passa a transmetre's per l'aire, com es mostra a la següent imatge [29]:

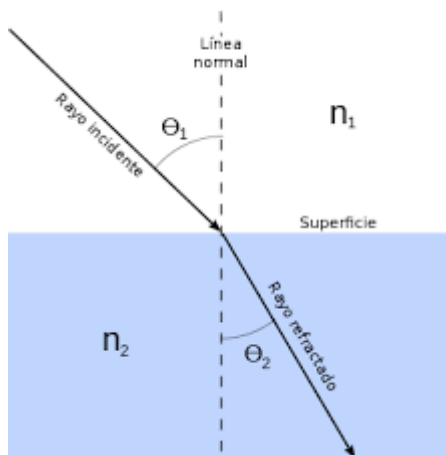


Figura 15.- Fenomen refracció. [29]

- **Expansió geomètrica:** l'expansió de l'ona es sol produir en més d'una direcció, això comporta, que conforme s'allunya de l'origen avarca una major àrea. Obeint el principi de conservació de l'energia, es pot deduir que quan més gran sigui l'àrea, serà menor l'energia per unitat de superfície. D'aquesta manera, entenent la comunicació com un emissor en el punt d'origen i un receptor situat en un dels molts punts on arriba l'ona generada, hi haurà una clara pèrdua d'energia. Es poden diferenciar dos tipus: esfèrica, on l'ona s'expandeix de forma omnidireccional, característic de aigües profundes amb pocs obstacles, en aquest cas les pèrdues són proporcionals al quadrat de la distància; cilíndrica, la radiació es contempla en un pla, característic d'aigües amb poca fondària, en aquest cas les pèrdues són proporcionals a la distància [29].
- **Soroll:** El soroll es defineix com qualsevol so, en aquest cas, que dificulta la comunicació entre emissor i receptor. En aquest cas es pot tractar d'un soroll causat per la pròpia maquinaria, el medi, la fauna, fenòmens sísmics, etc.
- **Eixamplament Doppler:** Un altre fenomen que dificulta de manera considerable la transmissió de senyals, és l'efecte Doppler. Es produeix una distorsió, tant en el emissor com el receptor del senyal en el cas que aquests no estiguin quietes, és a dir, en el cas que existeixi un moviment relatiu entre ells. També, succeeix durant la transmissió, ja que el moviment de la massa transmissora (aigua) deforma les ones. Els efectes d'aquest fenomen dificulten la transmissió durant temporals i situacions en les que l'aigua es mou de forma ràpida i brusca. La imatge a continuació ajuda a entendre d'una forma visual aquest fenomen:

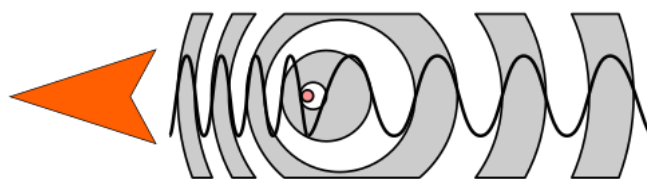


Figura 16.- Efecte Doppler. [5]

Es considera que aquest fenomen no dificultarà la comunicació sempre i quant es compleixi la equació següent [29]:

$$\frac{1}{T} \gg B$$

(17)

On  $T$  es el període del senyal i  $B$  l'eixamplament Doppler.

- Fenomen multicamí:

Les ones sonores s'emeten en un ventall d'angles consideradament gran, és a dir, en múltiples direccions. El senyal a llegir serà el que es rebi més ràpid, amb major amplitud i amb menys distorsió. Aquest senyal és el que viatja directament del emissor al receptor i s'anomena *Camí directe*. Cal tenir en compte que, fruit de tots els demés camins que es generen en l'emissor i reboten en el fons, superfície o qualsevol altre objecte, bombolla o impuresa, es rebran com a diferents ecos que dificultaran la lectura. En la següent imatge es poden observar diferents camins de l'ona des de l'emissor fins al receptor [29]:

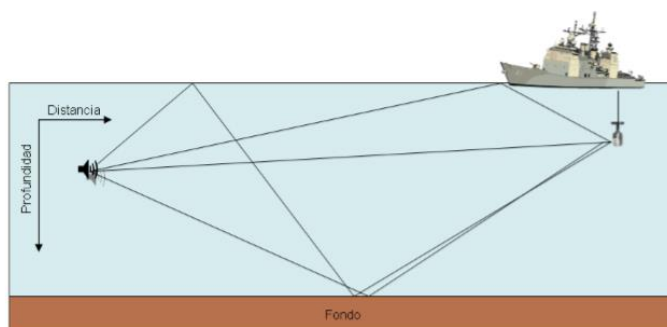


Figura 17.- Fenomen multicamí. [29]

Sent impossible la seva anul·lació, els efectes sempre existents d'aquests ecos, es podran negligir sempre que es compleixi la següent equació [29]:

$$\frac{1}{W} \gg \tau L \tag{18}$$

On  $W$  es l'amplada de banda i  $\tau L$  el retard del multicamí.

Aquest fenomen sol tenir molta més incidència en canals horitzontals, ja que en aquests casos, degut a l'efecte del fons i la superfície es troben molts més obstacles.

- **Retard:** En els protocols de comunicació, un dels paràmetres a fixar és el RTT "Round-Trip Time", aquest estableix el temps en que es tarda a enviar el missatge del emissor al receptor i aquest tornar una resposta. Fixar aquest paràmetre adequadament és important per assolir una bona eficiència en el missatge. En un medi marí, les condicions són molt canviants, això provoca que hi hagi una gran variació de la velocitat del missatge en situacions diferents, fent molt complicat l'ajust del RTT.

### 3.4. Valoració mètodes de comunicació

Com s'ha vist anteriorment, cada una d'aquestes tècniques té els seus punts forts i febles, així que en funció de la naturalesa de la comunicació resultarà més útil alguna de les tres tècniques. Degut a la naturalesa d'aquest treball i a la funció concreta que ha de realitzar l'etiqueta dissenyada ha de complir certs requeriments:

- Els estudis dels moviments dels escamarlans es duran a terme en una reserva marina de 10 km<sup>2</sup> d'extensió i 400 m de profunditat. El curt abast de les ones EM en un medi subaquàtic provoca que resulti inviable utilitzar aquesta tecnologia en aquest cas.
- Com s'ha comentat anteriorment, els escamarlans solen estar amagats en forats a terra així com en racons entre les roques, per aquest motiu en molts casos no existirà un camí directe entre l'emissor i el receptor, és important pensar en un sistema que no requereixi d'un camí directe per tal de establir la comunicació. Aquesta condició fa que la comunicació mitjançant impulsos òptics quedi descartada.

Les ones acústiques, resulten ser el mètode més adequat per aquesta aplicació, ens permeten un rang de detecció de presència de l'etiqueta ampli, facilitat per establir la comunicació amb posicions més difícils d'accedir i en aigües poc clares.

## 4. Dispositius comunicacions acústiques

Com s'ha explicat anteriorment les comunicacions acústiques són els sistemes de comunicació que utilitzen aquest fenomen per la transmissió de dades sense fil. En aquest apartat s'analitzaran les tècniques més habituals i les seves aplicacions. Finalment s'argumentarà perquè per aquest projecte el sistema d'etiqueta acústica és el que més s'ajusta a la nostra aplicació.

### 4.3. Hidròfons

Aquests dispositius són transductors de so a electricitat, en altres paraules, transformen l'energia de les ones acústiques (mecànica) en energia elèctrica. Com indica el prefix del seu nom hidro-, aquests dispositius s'utilitzen en un medi líquid, majoritàriament aigua. La majoria tenen la capacitat de fer la transducció en els dos sentits, això permet donar-li un ús tant d'emissor com de receptor.

El primer dispositiu d'aquest tipus va ser dissenyat per Reginal Fesseden l'any 1929. Motivats pel desastre del RMS titànic i amb la intenció de protegir vaixells i submarins d'accidents d'aquest tipus. Aquest primer aparell es coneix com l'oscil·lador de Fesseden (fig.18). Es tracta d'un dispositiu de ressonàcia acústica, és a dir, actua com a emissor, i al mateix temps, com a receptor dels ecos provocats pels xocs de l'ona emesa. L'estructura és bàsicament una làmina metàl·lica en contacte amb l'aigua en un costat, en l'altre s'hi troba un tub de coure, que a causa de l'efecte d'un sistema d'imants provoca una oscil·lació sobre la làmina, d'aquesta forma, aquesta vibració provoca que s'emeti l'ona a l'aigua. Aquest sistema va resultar molt eficaç, amb un rang de detecció d'obstacles fins a dos milles, tot i així, a causa de la maduració de la tecnologia i les seves grans dimensions, van provocar que es quedés obsolet, deixant pas a uns nous tipus de dispositius anomenats hidròfons. [25]

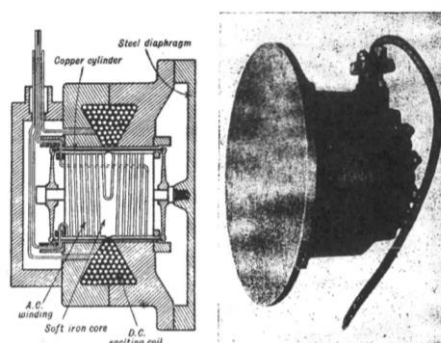


Figura 18.- Oscil·lador de Fesseden. [25]

El terme hidròfon sorgeix més tard amb la invenció d'un aparell amb la mateixa funció però utilitzant uns principis diferents. La base d'aquests són els materials piezoelèctrics.

El fenomen de la piezoelectricitat ja va ser anteriorment observat per Pierre i Jacques Curie, estudiant com actuaven diferents forces aplicades sobre el quarts. Aquest fenomen es produeix en cristalls naturals o sintètics sense un centre de simetria. L'aplicació d'un esforç de compressió o cisallament provoca una dissociació dels centres gravitatoris de les seves cargues elèctriques, i com a resultat, el material en qüestió es polaritza generant una diferència de voltatge en els seus extrems. Aquest efecte també succeeix a la inversa, és a dir, al sotmetre un cristall piezoelèctric a un voltatge, aquest pateix una deformació. En la majoria dels casos, al deixar d'aplicar el voltatge exterior per produir la deformació o l'esforç mecànic per produir el voltatge, el material torna a la seva forma i polaritat inicial, considerem que és reversible.

Aquests materials resulten molt útils per una gran varietat d'aplicacions com pot ser produir l'espurna per encendre un encenedor. Entre aquestes trobem les comunicacions subaquàtiques, on resulten especialment útils per dos principals motius:

- Com s'ha comentat anteriorment, en aquests materials, al aplicar un voltatge s'obté una deformació proporcional, i viceversa. Si el voltatge aplicat és una ona sinusoidal, el material piezoelèctric vibrarà i transmetrà aquesta energia mecànica al medi, produint així l'ona acústica. Degut a aquesta proporcionalitat entre els dos senyals, la vibració i l'elèctric, resulta una manera senzilla de generar ones sonores, i utilitzant-se com a receptor, d'interpretar-les.
- Al ser aquest efecte bidireccional, permet utilitzar aquests dispositius tant d'emissor com de receptor. El fet de poder utilitzar materials similars o inclús el mateix en les dos posicions facilita la lectura i interpretació de senyals.

L'estructura d'aquests dispositius consta d'un cristall piezoelèctric en el seu interior, aquest té cada un dels seus extrems connectat amb un dels terminals elèctrics. El piezoelèctric està encapsulat per una carcassa aïllant, aquesta és l'encarregada d'interaccionar amb el medi, és a dir, transmetre la vibració. En l'espai entre el cristall i la carcassa està ple d'un líquid, habitualment oli, amb bombolles d'aire. Aquest medi permet la lliure deformació del cristall. A la imatge a continuació es mostra l'estructura interna d'un hidròfon.



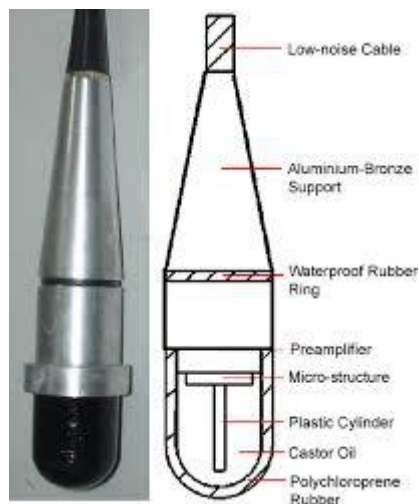


Figura 19.- Estructura hidròfon. [2]

En la majoria dels casos, els hidròfons són dispositius omnidireccionals, és a dir, tenen la capacitat d'emetre i captar ones sonores provinents de qualsevol direcció. Si s'observa el diagrama de radiació d'un hidròfon comercial (línia blava), la densitat de potència radiada en totes les direccions és pràcticament la mateixa.

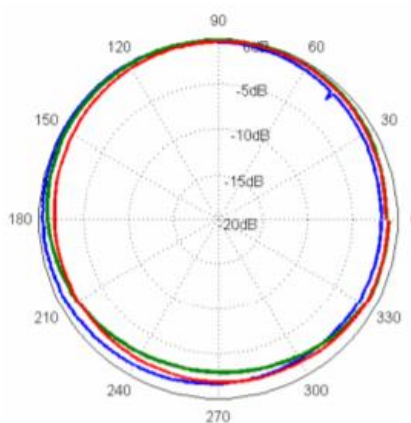


Figura 20.- Diagrama de radiació hidròfon (línia blava). [22]

En alguns casos concrets, interessa obtenir una direccionalitat en les lectures dels hidròfons. En aquest cas s'utilitza el que s'anomena un hidròfon enfocat. Aquest aparell és un hidròfon omnidireccional amb un reflector disposat de forma que dirigeixi totes les senyals a un sol punt.

#### 4.4. Mòdems acústics

Es coneix com a mòdem qualsevol dispositiu capaç de a partir d'un senyal digital obtenir un d'equivalent analògic (modulació), i a la inversa (desmodulació). Aquesta capacitat de transformar el senyal en els dos sentits permet utilitzar-los tant com a emissor com a receptor.

Tot i realitzar la mateixa funció es poden distingir diferents tipus de mòdems. En el present cas mereixen ser estudiats els mòdems acústics subaquàtics. Aquests consten de les següents característiques:

- El senyal analògic és de tipus acústic, és a dir, una ona sonora.
- Al utilitzar-se en un medi subaquàtic, és de vital importància que estiguin ben encapsulats per tal de evitar entrades d'aigua dins del circuit.
- Capaçs de suportar altes pressions.

Aquests aparells s'utilitzen per realitzar una gran varietat de funcions en l'àmbit de les comunicacions subaquàtiques. El motiu principal és que actualment els models comercials compten amb un ampli ventall de facilitats per la seva utilització, tant a la hora de realitzar comunicació com programant-los [27].

##### 4.4.1. Models comercials

En el mercat dels mòdems acústics hi ha un ampli ventall de fabricants com Teledyne Marine, Aquasent i EvoLogics entre d'altres, que ofereixen diversos mòdems que s'ajusten a diferents situacions i aplicacions. En aquest apartat s'analitzarà un d'ells a fons, tenint en compte els principals factors a tenir en compte en aquests dispositius, concretant en la capacitat i eficiència a la hora de transmetre dades. En la següent imatge es mostra la relació entre taxa de bits i rang d'emissió de les diferents series de mòdems del fabricant EvoLogics.

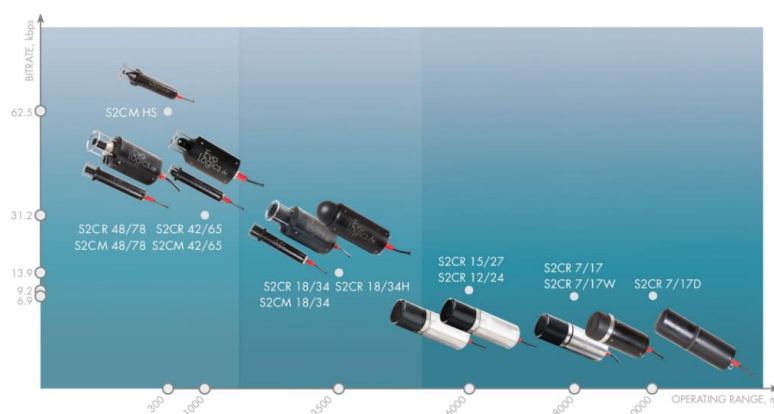


Figura 21.- Relació rang d'emissió vs. Velocitat d'emissió series EvoLogics.[38]

En el laboratori de SARTI es disposa d'un mòdem de EvoLogics de la sèrie 18/34, per això s'han escollit aquests com a objecte d'estudi. Com s'ha mostrat anteriorment la taxa de bits i el rang d'emissió segueixen una tendència inversa, i pel que fa aquests dos valors, aquest model és molt equilibrat. Emet a una velocitat de 13,9kbit/s i a uns 3.500m aproximadament. Aquest model es pot obtenir en 5 configuracions diferents, en funció de l'ús que se li vulgui donar. Per exemple, el model S2C T d'aquesta sèrie és considerablement més compacte que els demés, està dissenyat per utilitzar-se amb tasques en les que es disposa d'un espai reduït. [38]

#### 4.4.2. Casos pràctics

Un exemple és el NOAA "National Oceanic and Atmospheric Administration", una agència científica dels Estats Units que, entre d'altres activitats, es dedica a preveure tsunamis que poguessin afectar a la costa centreamericana, degut a la seva vulnerabilitat amb aquests fenòmens naturals. Aquesta predicció es fa basant-se en la informació recol·lectada per diversos sensors de pressió situats en el fons marí. Les dades recol·lectades per aquests sensors es transmeten mitjançant mòdems acústics, tant en la posició de emissor com de receptor, amb una boia situada a la superfície en la mateixa posició. A partir d'aquí aquestes dades es poden transmetre per satèl·lit a qualsevol centre d'investigació i prevenció de Tsunamis. [28]

#### 4.5. Sonar

El Sonar “Sound Navigation And Ranging” és un mètode que s'utilitza principalment per la identificació i posicionament d'objectes dins l'aigua. La tecnologia que utilitza és la mateixa que la tecnologia radar, però en lloc d'utilitzar ones EM utilitza ones sonores. Aquesta tècnica es basa en la interpretació de les ones sonores captades pel sonar. En funció de la procedència d'aquestes es poden distingir entre dos tipus de sonar diferents:

- **Sonar actiu:** En aquest cas les ones es creen artificialment amb un emissor de so. Aquest pot estar situat juntament amb el receptor (monoestàtic), o en una posició diferent (biestàtic). El funcionament d'aquests sistemes es basa en la emissió del pols acústic en un instant conegut i l' instant de recepció de l'eco generat al impactar contra alguna superfície, coneixent la velocitat del so en el medi resulta relativament fàcil calcular la distància que hi ha entre el sonar i l'objecte. Aquest mètode de localització també l'utilitzen diverses espècies animals com per exemple les balenes o els ratpenats, en el cas dels animals s'anomena ecolocalització, és per això que els sonars d'alta potència poden tenir un impacte mediambiental important al desorientar aquestes espècies amb la generació d'ones sonores similars a les que generen ells.
- **Sonar passiu:** El sonar passiu interpreta els sons emesos per agents externs, des de peixos fins a vaixells.

En qualsevol dels dos casos anteriors es pot crear una matriu de receptors, així amb la interpretació de tots els senyals rebuts es pot generar una interpretació del medi molt més acurada.

#### 4.6. Telemetria acústica

Es coneix com a telemetria a la tecnologia que permet l'adquisició de mesures de magnituds físiques de forma remota. El cas concret de la telemetria acústica, utilitza per mesurar aquestes magnituds físiques, distàncies en aquest cas, les ones sonores.

Aquesta eina s'utilitza pel seguiment de posicions en un medi subaquàtic, principalment per les avantatges que presenten les ones sonores davant de les demés mètodes de comunicació a distància.

Aquesta tecnologia es basa en la comunicació entre un petit aparell anomenat etiqueta acústica i un receptor, habitualment un hidròfon o un mòdem acústic. L'etiqueta emet de forma periòdica un pols acústic conegut o “ping”, si el receptor llegeix i reconeix aquest pols marca la presència d'aquest en el instant de temps determinat. D'aquesta forma es pot saber en quins moments l'etiqueta ha estat a prop del receptor.

Combinant diferents receptors es pot triangular el senyal rebut i així conèixer la posició exacte de l'etiqueta.

Un d'aquests sistemes de posicionament, i el que resulta més útil en aquest cas és el LBL o "Long BaseLine Acoustic Positioning System". Aquest es basa en la interpretació dels senyals llegits per receptors fixes en el fons marí. Aquesta tècnica ofereix una precisió molt alta en els seus resultats independentment de l'altura de la posició dins d'un perímetre d'actuació concret. Per aquests motius resulta la millor opció per fer el seguiment dins la reserva marina.

La telemetria acústica resulta molt útil per monitoritzar posicions de qualsevol objecte en moviment en l'aigua i principalment s'utilitza pel seguiment d'espècies marines. Simplement s'ha d'unir l'etiqueta sobre l'individu a seguir. En el cas dels peixos es solen situar a la cavitat abdominal quirúrgicament amb una petita incisió i una posterior sutura ja que els fluids del teixit de les escates no permet una bona unió amb adhesius. En el cas de l'escamarlà, es pot adherir al seu abdomen.

#### 4.6.1. Etiquetes acústiques

Hi ha moltes mides i formes diferents d'etiquetes segons l'espècie que s'està estudiant però tots funcionen de la mateixa manera. Consten de tres parts:

- Bateria: les bateries que es solen utilitzar tenen una llarga durada ja que el consum per generar el pols és molt baix, també cal tenir en compte que aquesta durada dependrà de les característiques del pols i la freqüència en que s'emeti. Poden durar fins a quatre anys.
- Electrònica: es tracta d'un petit circuit encarregat de generar una ona sinusoidal determinada cada un cert temps, aquesta serà la que al transmetre's al transductor provocarà la vibració.
- Piezoelèctric: l'element piezoelèctric és el transductor, transforma l'ona elèctrica en una vibració, és a dir, en una ona acústica.

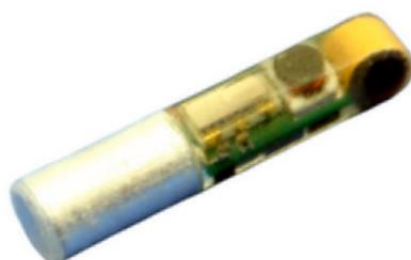


Figura 22.- Etiqueta acústica SS400.[24]

L'ona generada sempre es tracta d'un pols o "ping", però en funció del medi resulta més eficient una freqüència determinada. En un medi oceànic s'utilitzen freqüències inferiors a 100 kHz, mentre que en llacs, preses i rius s'utilitzen freqüències superiors a 200 kHz. Totes les etiquetes observades en aquest estudi ofereixen una comunicació unidireccional, és a dir, només actuen com a emissors de l'ona determinada.

#### 4.6.2. Receptors

Els receptors són hidròfons que capten els impulsos acústics del medi. Després d'interpretar aquests impulsos, si reconeix el de l'etiqueta marca l'instant de temps en el que l'ha llegit. Combinant les dades dels diferents receptors, es pot calcular la posició real del peix en l'instant en el que l'etiqueta ha generat el pols, i ajuntant diferents posicions definir la ruta seguida. Per processar aquestes dades hi ha diferents formes, MarkTags és un dels softwares més utilitzats per interpretar aquestes dades i definir les posicions i rutes.

Es diferencien dos tipus de seguiment en funció de la posició dels receptors:

- Seguiment actiu: en el cas en el que el receptor és retingut activament per un investigador.
- Seguiment passiu: el receptor està fixat en una posició específica i enregistra la presència o absència d'etiquetes en el seu voltant.

En el cas dels sistemes de receptors dels sistemes de posicionament LBL, resulten de difícil instal·lació ja que els diferents receptors s'han de situar en el fons, preferiblement sobre estructures immòbils per evitar errors en les mesures, a una distància elevada del fons per evitar els efectes dels rebots i calibrats de forma que les lectures es facin de forma correcta.

#### 4.6.3. Trajectòria telemetria acústica

En aquest apartat es farà una ullada a l'evolució de la telemetria acústica, així com una valoració de l'estat actual, comentant també les etiquetes acústiques disponibles en el mercat.

Es considera com a primers estudis d'un àmbit proper a la telemetria acústica durant els anys 70. Aquests articles tracten sobre el desenvolupament de mòdems acústics semblants als actuals, però la tecnologia no era suficientment avançada com per mitigar l'atenuació pròpia de les ones acústiques en un medi submarí. Més endavant en la mateixa dècada es va introduir l'electrònica digital en aquest àmbit, va solucionar en gran part el problema de l'atenuació i va possibilitar la correcció d'errors en els missatges. En la dècada dels 80 es va aconseguir millorar considerablement la velocitat en la transmissió amb la introducció dels senyals digitals d'alta velocitat. En la dècada dels 90 es va avançar molt tant en robustesa dels missatges com en velocitat es va arribar a assolir una comunicació estable a 90km a una velocitat de 1000 bits/s. Actualment existeixen una gran diversitat de dispositius molt avançats en aquest àmbit, cada un amb unes

proprietats diferents en funció de la comunicació que ha de realitzar, aquests són capaços de transmetre a distàncies de varies milles i amb unes velocitats inimaginables fa uns anys. En el pròxim apartat es fa la anàlisi d'una etiqueta comercial actual. [20][21]

#### 4.6.4. Estat actual del mercat

Per realitzar el seguiment d'espècies marines hi ha una gran oferta en etiquetes que es comuniquen amb ones VHF, sobretot destinades a la pesca esportiva i a la investigació. En el cas de les etiquetes acústiques no hi ha tanta oferta.

A continuació s'analitza l'etiqueta acústica SS400 del fabricant ATS, s'ha escollit com a exemple degut a les seves dimensions i la alta taxa de bits.

El model SS400 del fabricant ATS (figura 22), és l'etiqueta acústica més petita del mercat actualment, amb unes dimensions de 15 mm de longitud, 3,38 mm de diàmetre i un pes de 216mg en la seva versió més lleugera. Genera un pols modelat en un codi BPSK, aquest dura 744 milisegons i conté un missatge de 31 bits: un missatge d'inici de 7 bits, la identificació única de 16 bits i 8 bits de verificació de redundància cíclica (CRC) i emet l'ona a 156 dB. Tenint en compte el numero de bits i la durada del missatge podem concloure que la taxa de bits d'aquest dispositiu es de 41500 bits/s aproximadament. Com s'ha comentat anteriorment la durada de la bateria és inversament proporcional a la freqüència dels polsos generats, el SS400 té diverses bateries i freqüències possibles. En la següent taula s'exposa les diferents combinacions entre bateria i freqüència.[24]

Bateria	Interval (s)	Durada bateria (dies)
BR306	3	48
	5	71
	10	111
2@ 379	3	108
	5	159
	10	247
2@ 392	3	302
	5	446
	10	694

*Taula 3.- Bateria etiqueta acústica SS400. [24]*

Com s'ha comentat anteriorment, en el mercat només s'ofereixen etiquetes unidireccionals, això implica la necessitat de varis receptors per poder triangular el senyal, donat que només es pot considerar la presència d'aquest, no el rang. El cost de d'instal·lació d'aquests receptors és molt elevat, per tant és preferible l'ús d'etiquetes bidireccionals que permetin el càlcul del rang per així en lloc d'una matriu de receptors "LBL" es podria utilitzar una estructura "single-beacon", en la que només es requereix d'instal·lació d'un sol receptor.



## 5. Estudi experimental de diferents transductors piezoelèctrics

Com s'ha comentat anteriorment, l'objectiu inicial d'aquest treball era la confecció i estudi de diferents elements emissors per utilitzar-se en etiquetes acústiques, és a dir, encapsulament del piezoelèctric i estudi del sistema. Però degut a la situació provocada pel COVID no s'ha disposat del temps necessari, així que s'han realitzat aquestes proves amb sis piezoelèctrics encapsulats a disposició en el laboratori SARTI.

Els piezoelèctrics estudiats són els següents:

- Dos hidròfons comercials B&K 8103: al ser comercials es disposa d'informació sobre aquests dispositius, així que tot i conèixer el seu comportament, s'utilitzaran com a "grup control" per comprovar que els resultats obtinguts coincideixen amb els facilitats pel fabricant, i d'aquesta forma saber que els assajos s'estan efectuant correctament.
- Dos discs de la ceràmica piezoelèctrica Pz29: aquests dos discs, de dimensions diferents, s'han encapsulat en el laboratori utilitzant una silicona termoretràctil. En aquest cas es disposa d'informació del material en si però no de la interacció d'aquest amb el medi, així que es podria fer alguna hipòtesis sobre el comportament d'aquest però amb molt poca fiabilitat.
- Dos cilindres encapsulats: d'aquests dos dispositius, de mides diferents, no es disposa de cap informació ni del material piezoelèctric ni del encapsulat, per tant no podem esperar cap comportament en concret.
- Un disc encapsulat amb silicona termoretràctil: en aquest cas no es disposa de cap informació del material piezoelèctric.
- Una làmina flexible rectangular encapsulada: en aquest cas no es disposa de cap informació del material piezoelèctric.
- Un piezoelèctric rectangular rígid: en aquest cas no es disposa de cap informació del material piezoelèctric.

A la taula exposada a continuació consten les dimensions i masses dels piezoelèctrics mesurades en el laboratori.

	B&K	Disc groc	Disc ample	Disc estret	Cilindre gran	Cilindre petit	Rectangle estret	Rectangle ample
Massa (g)	11	4	3	2	31	17	<1	3
Dimensions (mm)	50, 1 $\emptyset$	3, 9 $\emptyset$	2, 12 $\emptyset$	0,5; 12 $\emptyset$	42, 21 $\emptyset$	35, 15 $\emptyset$	40x15x<0,1	18x7x1

*Taula 4.- Dimensions i masses piezoelèctrics.*

Cal tenir en compte que les dimensions dels materials piezoelèctrics afecten directament en el seu comportament. L'objectiu és trobar un equilibri entre la mida del emissor i les propietats de l'ona emesa.

Per tal de realitzar aquesta valoració, és necessari crear models dels piezoelèctrics per tal d'estudiar el seu comportament. En aquest projecte s'han estudiat les freqüències de ressonància i el SPL o "Sound Pressure Level" de cada un d'ells.

### 5.3. Freqüència de ressonància

Una de les propietats característiques de qualsevol sistema o cos és la freqüència de ressonància. Es coneix com a freqüències de ressonància aquelles en les que el cos o sistema assoleix el seu nivell màxim d'oscil·lació.

En el cas present, resulten d'especial interès, ja que si el dispositiu emissor treballant en aquestes freqüències, amb un mateix valor d'amplitud de l'ona elèctrica podem obtenir una vibració molt més àmplia i per tant emetre a més alta potència, millorant així considerablement l'eficiència del sistema.

#### 5.3.1. Assaig realitzat

Per tal de buscar les freqüències de ressonància dels piezoelèctrics analitzats en aquest treball s'ha obtingut el valor de la impedància sent sotmesos a ones de diferents freqüències. Representant aquests valors s'obté la gràfica de la impedància en funció de la freqüència, en la que apareixen pics que corresponen a les freqüències de ressonància.

Com a referència s'ha utilitzat la font [33], en la que es realitza aquest estudi de materials piezoelèctrics. La imatge a continuació mostra l'escombrat de freqüències obtingut en aquest estudi.

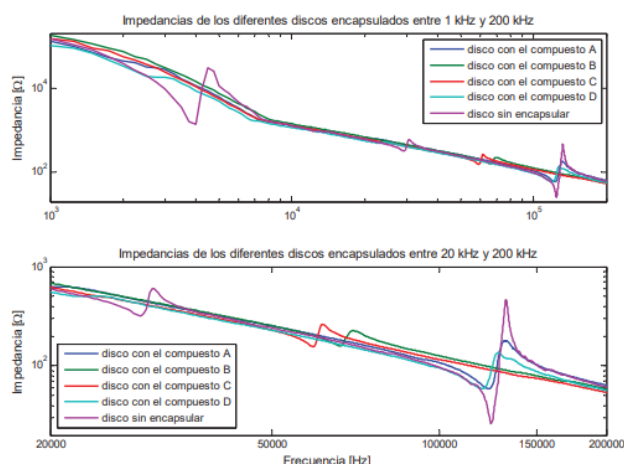


Figura 24.- Referencia gràfiques escombrat de freqüència. [33]

### 5.3.1.1. Circuit de test implementat

A la hora de buscar les freqüències de ressonància cal aplicar una ona sinusoidal al piezoelèctric i mesurar la seva resistència interna. Així que s'ha aplicat l'ona emesa pel generador de funcions GF-857 del fabricant PROMAX, s'ha mesurat la tensió eficaç en els borns del piezoelèctric llegint el canal 1 del oscil·loscopi DS1104Z+ del fabricant RIGOL i per mesurar la intensitat eficaç s'ha mesurat la tensió eficaç en els borns d'una resistència shunt de valor 10 Ω en sèrie amb el piezoelèctric. D'aquesta forma, utilitzant la llei d'ohm() podem obtenir la impedància del dispositiu.

$$R = \frac{V}{I} \tag{19}$$

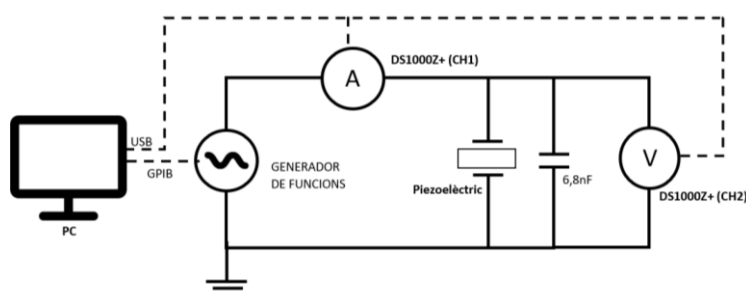
També s'ha llegit amb l'oscil·loscopi la freqüència de l'ona emesa, tot i que després dels primers assajos s'ha pogut comprovar que aquesta mesura no era fiable i s'ha començat a considerar com a correcte el valor de la freqüència entrat al generador de funcions.

Per tal d'alleujar la incidència del soroll en la mesura del voltatge de la resistència shunt s'ha posat en paral·lel a aquesta un condensador de 6,8 nF. Aquest alleuja l'efecte del soroll actuant com a filtre passa baixos amb una freqüència de tall de 2,34 MHz. Aquest valor s'ha obtingut amb la formula de càlcul de freqüències de tall de filtres passa baixos:

$$f_c = \frac{1}{2\pi * R * C}$$

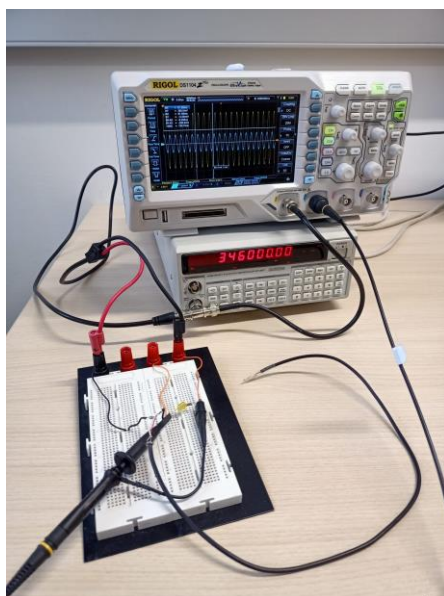
(20)

L'aspecte del circuit definitiu és com el mostrat en el següent diagrama:



*Figura 25.- Circuit definitiu sistema adquisició de dades.*

En la següent imatge apareix una foto del circuit definitiu real implementat durant un escombrat de freqüències:



*Figura 26.- Fotografia circuit definitiu.*

Per tal d'automatitzar tot aquest procés s'ha dissenyat un Virtual instrument utilitzant el software LabView, que s'encarregarà de l'ajust dels aparells, tractament de resultats i representació de dades. Aquest s'explica detalladament en el següent apartat.

### 5.3.1.2. Virtual Instrument

El software d'adquisició de dades amb l'objectiu d'obtenir la gràfica d'impedància en funció de la freqüència comentada anteriorment s'ha dissenyat amb l'entorn LabView.

#### PANELL FRONTAL

En el front panel s'hi poden distingir tres zones. En la primera (requadre 1) s'han d'entrar tots els paràmetres necessaris per executar el programa i definir l'escombrat: port USB on esta connectat l'oscil·loscopi, ubicació pel fitxer de dades generat i paràmetres de l'escombrat (Freqüència màxima, mínima i pas).

En segon lloc (requadre 2) es monitoritzen tots els paràmetres llegits per l'oscil·loscopi a temps real (Vrms piezoelèctric, Vrms Rshunt, Freqüència, Impedància, Freqüència mitja i Impedància mitja). L'objectiu és poder fer un seguiment del funcionament del programa durant la seva execució. Aquest bloc ha resultat molt útil, ja que l'execució del programa ha arribat a durar en alguns cassos més de cinc hores i així s'han pogut detectar errors sense esperar a que s'acabi d'executar.

Per últim (requadre 3), un cop ha finalitzat l'execució del programa es representa el resultat en una gràfica.

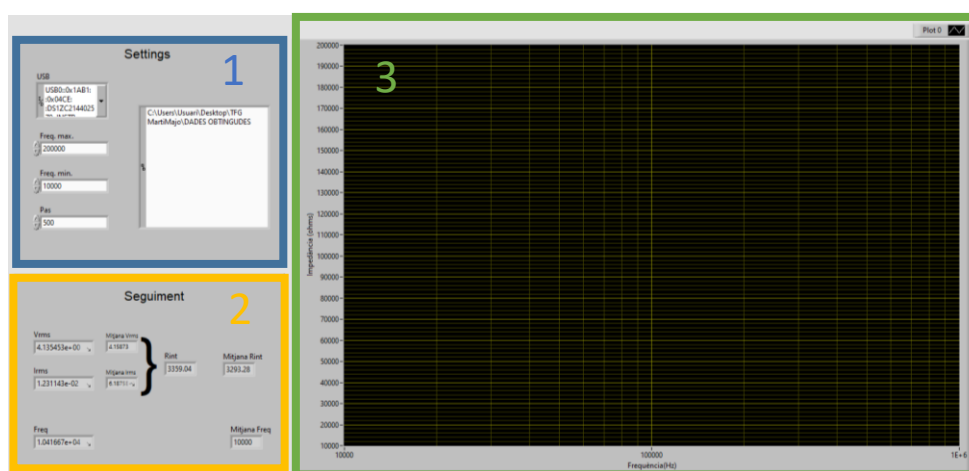


Figura 27.- Panell frontal VI escombrat de freqüències.

En aquest apartat s'explica el funcionament del VI d'adquisició de dades que realitza l'escombrat de freqüències.

En primer lloc (requadre 1), en base als paràmetres entrats en el panell frontal (Freqüència mínima, màxima i pas del mostreig), es calcula el número d'iteracions necessàries, una per cada freqüència que es vulgui considerar en el mostreig. Es calcula amb la següent equació:

$$\frac{Freq. Max - Freq. Min}{pas} = n^{\circ} \text{ mostres} \quad (21)$$

A continuació comença a executar-se el bucle For. Dins d'aquest la primera acció és el càlcul de la freqüència desitjada en funció de la iteració que s'està executant (requadre 2).

$$Freq. Min + (n^{\circ} \text{ iteració} * pas) = Freq \quad (22)$$

Un cop calculat aquest valor s'entra en una estructura seqüencial amb dos etapes.

En la primera etapa (requadre 3), s'estableix la comunicació amb el generador de funcions via GPIB. Concretament s'envia el missatge "SOUR:FREQ:SYNT X" [37], on X és el valor de la freqüència a generar.

En la segona s'estableix la comunicació amb l'oscil·loscopi via USB i es tracten mínimament les dades. En primer lloc, s'ajusta l'escala de l'oscil·loscopi (requadre 4), per tal d'obtenir valors correctes en les mesures. S'envia el missatge ":TIM:MAIN:SCAL X" [36] on X és el valor de el període, d'aquesta forma coincideix aproximadament cada divisió amb un període. Cal tenir en compte que l'oscil·loscopi no pot ajustar l'escala en tots els valors, així que aquest missatge no tindrà cap efecte en la majoria d'iteracions. Tot i el sorgiment d'aquest problema s'ha observat amb deteniment el comportament del programa durant la seva execució i sempre manté en pantalla un mínim de 10 cicles i un màxim de 15, tot i no llegir el mateix número de cicles a cada iteració com es desitjava, s'ha aconseguit mantenir una escala adequada per realitzar les mesures en qualsevol moment durant l'execució. Un cop ajustada l'escala podem distingir tres etapes molt semblants (requadre 5), en cada una d'elles es llegeix un dels tres paràmetres desitjats: Vrms Rshunt, Vrms Piezoelèctric i freqüència. Cada una d'elles comença amb un bloc que envia a l'oscil·loscopi el missatge ":MEAS:ITEM X, Y" [36] on X és el paràmetre a llegir, VRMS en el cas de el voltatge eficaç y FREQ en el cas de la freqüència; i Y és el canal a llegir, CHAN1 o CHAN2. Aquest missatge habilita la mesura del paràmetre i el canal desitjats. El segon bloc envia el missatge ":MEAS:ITEM? X, Y" [36] on X i Y són els mateixos paràmetres que abans. Aquest missatge sol·licita el missatge de tornada pel canal USB on s'envia el valor indicat. El tercer bloc atorga un temps de 250ms per realitzar la comunicació del segon bloc, ja que abans de posar-lo no disposava de temps

suficient i es superposaven els missatges. Per últim, el quart bloc llegeix la resposta enviada per l'oscil·loscopi. Després d'obtenir totes les dades de l'oscil·loscopi es calcula la intensitat eficaç amb els valors de la resistència shunt i el voltatge eficaç obtingut en aquesta, utilitzant la llei d'Ohm (19). I posteriorment s'obté la impedància (19) (requadre 6). Tota la comunicació amb l'oscil·loscopi explicada en aquest paràgraf es pot repetir tants cops com es desitgi variant la constant que defineix el número d'iteracions del bucle for que conté aquesta comunicació.

Tots els valors obtinguts s'acumulen en un vector. Al finalitzar el bucle s'eliminen el 10% corresponent als valors més elevats i el 10% corresponent als menors, per tal d'evitar errors causats per una lectura fallida, ja que en aquest cas l'oscil·loscopi envia el valor  $9.99999 \times 10^{36}$  [36]. Dels valors formant el 80% restant se'n fa la mitjana aritmètica (requadre 7).

Del bucle for corresponent a les lectures de les diferents freqüències s'obté cinc vectors amb els valors finals dels paràmetres següents:  $V_{rms}$ ,  $I_{rms}$ ,  $R_{int}$ , Freqüència generada i Freqüència llegida. Es guarden en un arxiu format .txt pel seu posterior estudi. També es genera una gràfica on es mostra la  $R_{int}$  en funció de la freqüència generada, per poder fer-se una primera idea dels resultats abans d'estudiar-los a fons (requadre 8).

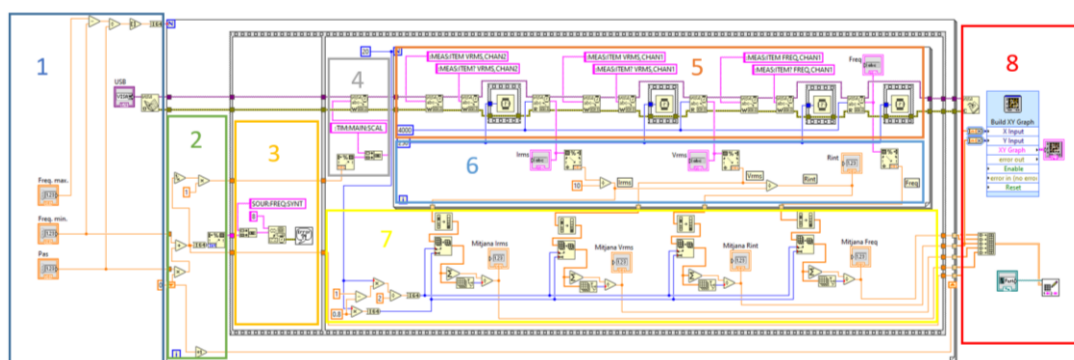


Figura 28.- Diagrama de blocs VI escorbat de freqüències.

### 5.3.2. Procediment Resultats i interpretació

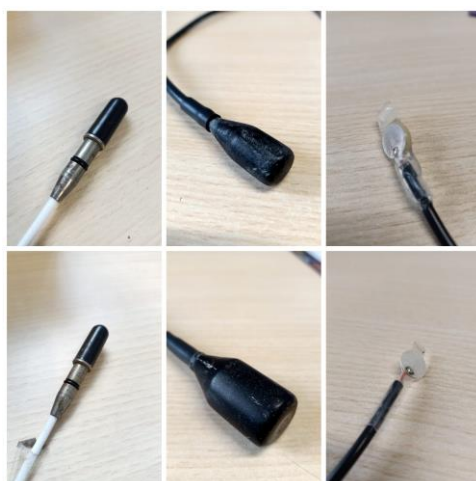
Com s'ha comentat anteriorment, la intenció inicial en aquest treball era arribar fins realitzar l'encapsulament de diferents piezoelèctrics amb diferents materials, i després d'estudiar-los extreure'n com a conclusió quina de les combinacions resulta més apta per utilitzar-se com a element emissor en una etiqueta acústica per seguir escamarlans. Degut a la pandèmia de COVID no s'ha disposat del temps necessari per realitzar l'encapsulat i tot l'estudi posterior. Com a alternativa s'ha decidit fer un assaig semblant amb diferents piezoelèctrics ja encapsulats disponibles en el laboratori, i valorar les possibilitats de cada un per utilitzar-se en el cas que ens ocupa.

Als piezoelèctrics disponibles se'ls ha anomenat de la forma següent:

- Dos hidròfons comercials B&K Type 8103: 105 i 106.
- Dos cilindres encapsulats: cilindre gran i petit.
- Dos discs aïllats amb plàstic termoretràctil: Pz29 ample i estret.

En tots els assajos es presta especial atenció al Pz29 ample, seguint les recomanacions del equip encarregat del projecte. Degut a que és el que mostra més propietats adequades per utilitzar-se com a emissor en l'etiqueta.

En la imatge a continuació es mostra en la primera columna els dos hidròfons comercials B&K, en la segona els dos cilíndrics encapsulats en el laboratori (petit i gran), i per últim els dos Pz29 (gran i petit).



*Figura 29.- Fotografies piezoelèctrics estudiats.*



A partir d'aquí s'explica el procediment seguit fins assolir el sistema d'adquisició de dades explicat anteriorment. Respecte a la primera versió hi ha diversos canvis:

- S'utilitza un cable BNC – Bananas enlloc de la sonda.
- No s'utilitza el condensador com a filtre passa baixos.
- No s'eliminen els valors majors i menors de les mesures.
- La resistència shunt utilitzada és d'un ohm.

El circuit utilitzat en aquest primer assaig és el mostrat en el següent diagrama:

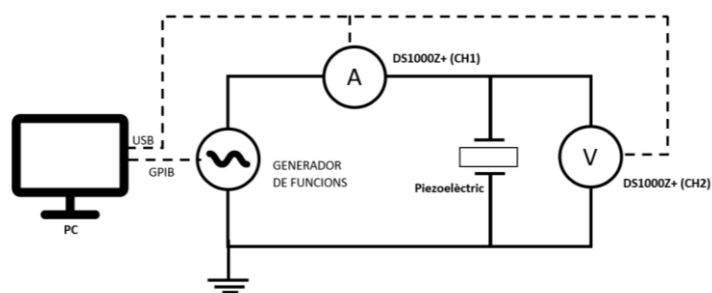


Figura 30.- Circuit primer assaig escombrat de freqüències.

Els resultats d'aquest primer assaig es poden observar en la figura 35. A continuació es mostra el resultat obtingut en l'anàlisi de la resistència interna en funció de la freqüència en el piezoelèctric Pz29 ample.

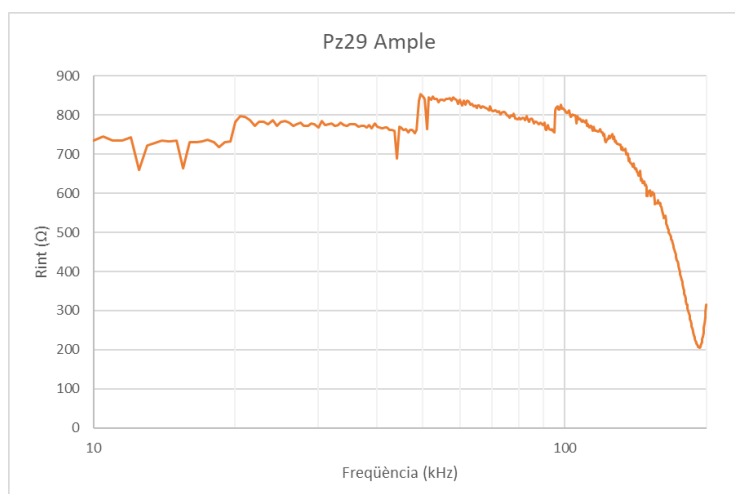


Figura 31.- Resultat primer assaig escombrat de freqüències Pz29 ample.

El que se'n pot extreure d'aquests resultats és que el VI d'adquisició de dades funciona, tot i així els resultats no es poden considerar com a concloents. En primer lloc, observant les gràfiques, només en el cas dels dos hidròfons comercials segueix una tendència com l'esperada en aquest assaig en un piezoelèctric, és a dir, una recta descendent representant els resultats en un domini logarítmic (fig. 24). Tot i poder considerar que això és causat per la poca precisió dels models encapsulats en el laboratori, hi ha molts més indicis d'errors en la lectura. La gràfica es veu altament alterada per alguna irregularitat que provoca soroll a les mesures, especialment a freqüències baixes.

Es pot observar a l'oscil·loscopi que hi ha una component de soroll molt elevat en l'ona de la intensitat, i aquest té especial incidència en freqüències baixes degut a que en aquestes el valor de la intensitat és menor, més baix inclús que el propi soroll.



*Figura 32.- Captura oscil·loscopi amb soroll.*

Per solucionar aquest problema s'ha decidit augmentar la Rshunt utilitzada per una de 10ohms. Aquest canvi implicarà una caiguda de tensió deu cops més gran, aquest augment de l'amplitud hauria de reduir la incidència del soroll.

També s'ha observat que per fer lectures correctes durant l'execució del programa s'ha d'anar ajustant l'escala d'aquest, ja que la primera mesura es fa amb 10kHz i l'última amb 200kHz, i si no s'està contínuament pendent d'això hi haurien problemes de lectura. Per augmentar l'autonomia del VI s'ha afegit un bloc de comunicació amb l'oscil·loscopi que ajusta l'escala horitzontal en funció de la iteració en la que es troba.

També s'ha començat a guardar tots els valors obtinguts pel sistema, no només la Rint i la freqüència, per així poder estudiar-les per separat. La motivació principal ha sigut poder tractar les mesures de la intensitat, ja que els problemes que s'estan tenint resideixen en aquesta ona.

Després d'introduir aquests canvis el VI segueix funcionant correctament i ajusta l'escala com es desitjava, tot i així el soroll segueix tenint pràcticament la mateixa incidència en el sistema.

Veient que segueixen havent els mateixos problemes s'ha decidit augmentar el número de mostres de cada mesura de 10 a 100, d'aquestes 100 s'exclouran les 10 majors i menors, i el resultat definitiu serà la mitjana aritmètica dels 80 valors restants. Aquesta acció no només aconsegueix resultats amb més exactitud, sinó que també descarta les lectures fallides que el sistema les llegeix com a  $9.99999 \times 10^{36}$  evitant així tenir que repetir alguna lectura com havia passat anteriorment.

També s'ha afegit un condensador de 6,8 nF en sèrie amb la resistència, l'objectiu d'aquest és reduir el soroll d'alta freqüència en la Rshunt. S'ha considerat que la influència d'aquest en les mesures és negligible, donat que la importància de la gràfica a la hora de trobar les freqüències de ressonància resideix en la forma, no en el valor de la resistència interna en si.

Per últim s'ha substituït el cable BNC-Bananas que s'utilitzava per fer aquesta lectura per una sonda, ja que aquestes mesuren de forma més exacta, i evites gran part del soroll generat en els cables.

Un cop introduïts tots aquests canvis la resposta obtinguda és considerablement millor, els efectes del soroll no tenen gaire incidència i la gràfica té un aspecte semblant a l'esperada (Figura 24).

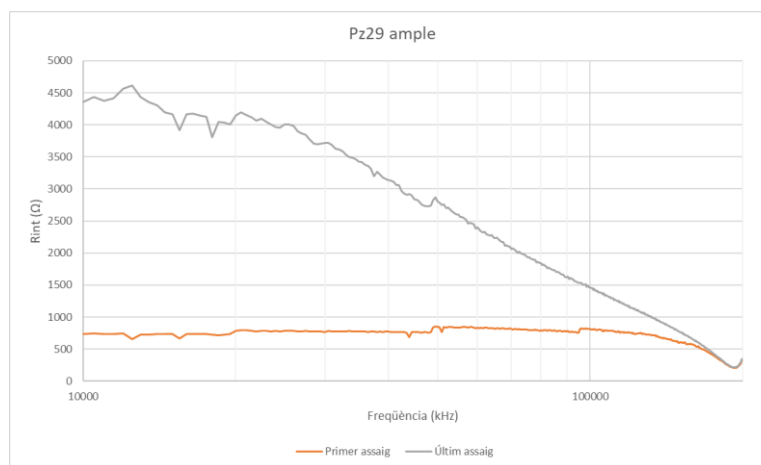
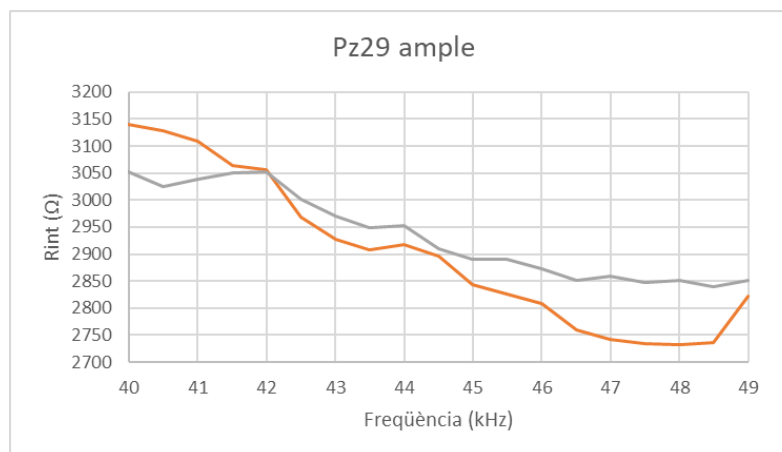


Figura 33.- Resultats primer i últim assaig escobrat de freqüències Pz29.

Tot i així, a freqüències baixes segueix sorgint la irregularitat. Tenint en compte això s'ha augmentat el numero de mostres a 1000 per mesura i s'ha provat en una petita mostra, de 40 kHz a 50 kHz amb un pas de 1000 Hz.

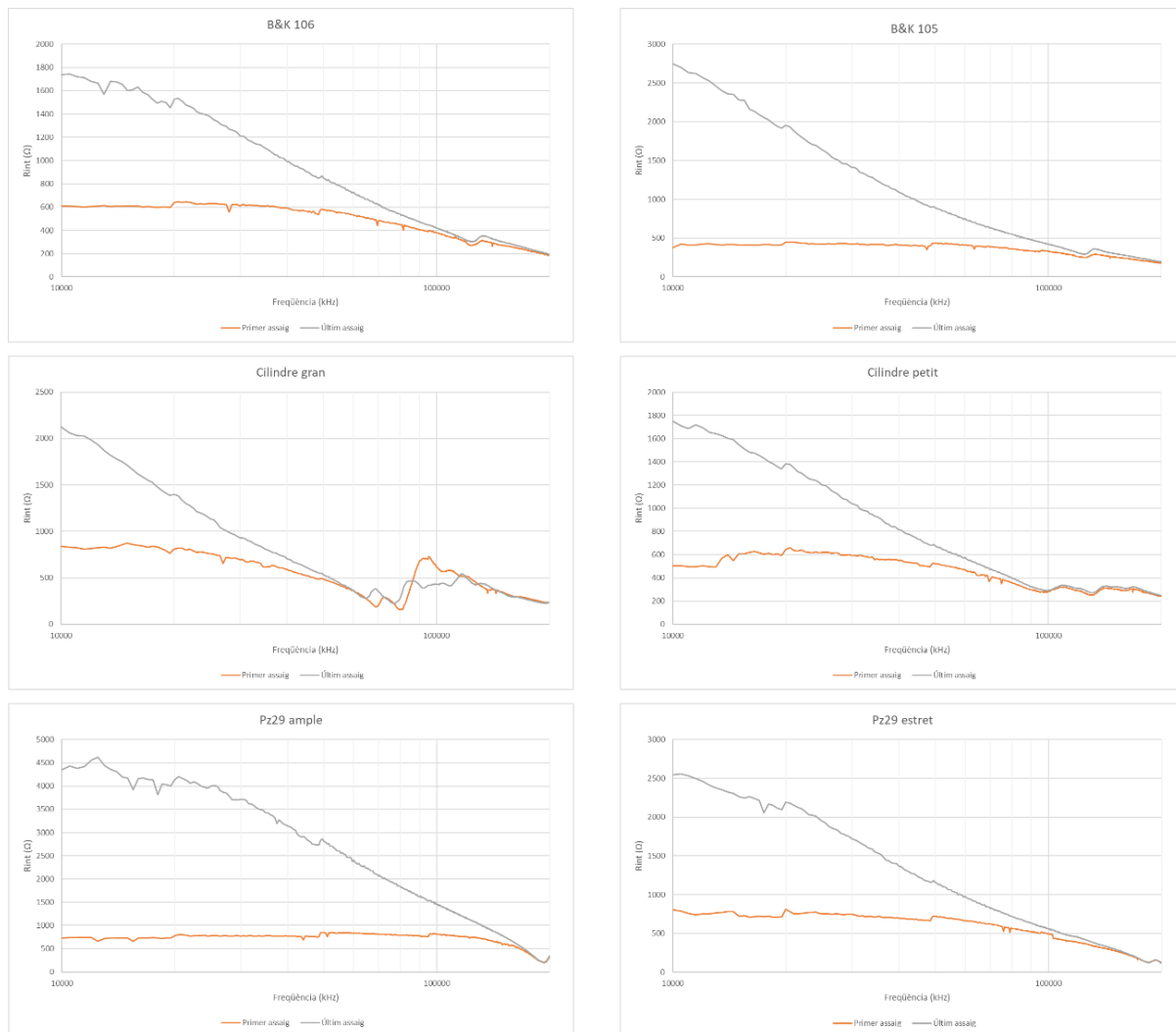


**Figura 34.-** Resultats últim assaig i assaig 1000rep. escombrat de freqüències Pz29.

Després de realitzar aquest assaig es pot observar que tot i no ser lineal, en els dos casos la gràfica segueix una mateixa tendència, això fa concloure que a freqüències baixes es perd aquesta tendència lineal degut a irregularitats en el dispositiu, i probablement en l'encapsulament.

Arribat a la conclusió que amb el sistema d'adquisició de dades muntat ja s'aconsegueixen resultats concloents es fa l'assaig definitiu. Aquest es fa mostrejant les freqüències de 10kHz a 200kHz amb un espai entre mostres de 500 Hz.

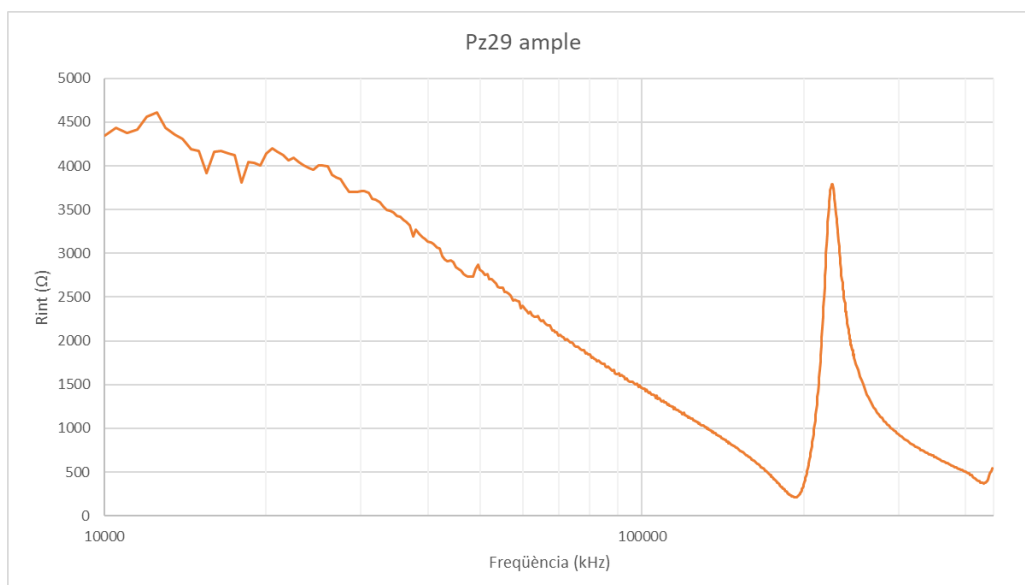
Els resultats obtinguts són els següents:



**Figura 35.- Resultats primer i últim assaig escorbat de freqüències.**

Es pot observar que tot i no tenir la mateixa forma, hi ha diversos pics que són comuns en els dos assaigs, per tant es pot considerar que no són fruit del soroll aleatori sinó que són petites ressonàncies dels piezoelèctrics.

Degut que en cap de les gràfiques s'observa cap freqüència de ressonància clara, però en la del Pz29 la resistència interna comença a pujar a prop dels 200 kHz, es decideix analitzar les freqüències que segueixen per comprovar si es el primer punt de ressonància clar i el resultat obtingut és el següent.

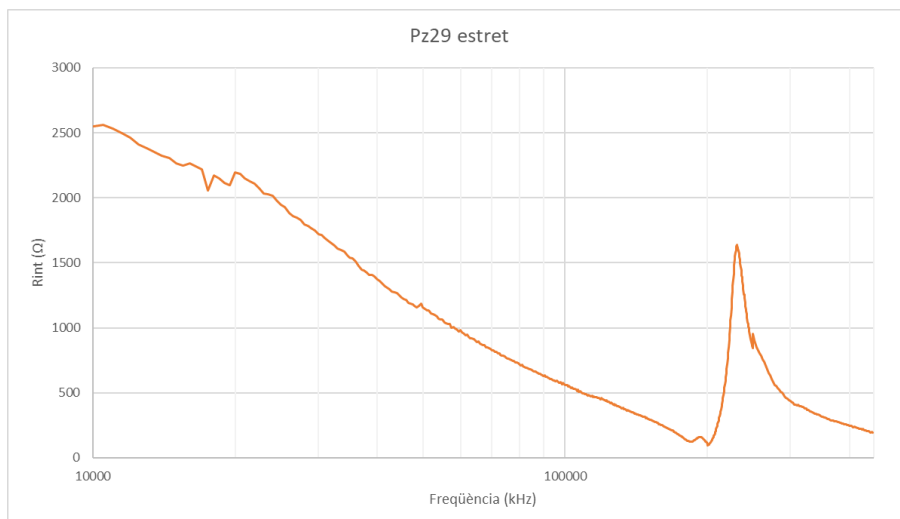


**Figura 36.-** Escorbrat de freqüències Pz29 ample (10 – 450 kHz).

En aquest cas s'ha trobat un pic de ressonància com els esperats en 226 kHz.

Aquesta freqüència no ens resulta útil per establir la comunicació ja que l'ona sonora es degradaria molt ràpid i no tindria un rang d'emissió suficient. Tot i així, buscant la freqüència de ressonància del Pz29 estret es poden comparar, i fer una hipòtesis sobre la correlació entre la freqüència de ressonància i l'amplada del disc, tenint en compte que l'única diferència entre els dos discs és l'amplada.

Per tal de contrastar la hipòtesis que la freqüència de ressonància és inversament proporcional al gruix del disc piezoelèctric, es busca la resistència interna entre 200 kHz i 450 kHz del Pz29 estret i s'obté el següent resultat.



**Figura 37.-** Escombrat de freqüències Pz29 estret (10 – 450 kHz).

En aquest cas la freqüència de ressonància és a 231kHz. Amb aquesta dada, tot i que la diferencia entre les dos ressonàncies només és de 5kHz, podem considerar que la hipòtesi és correcte.

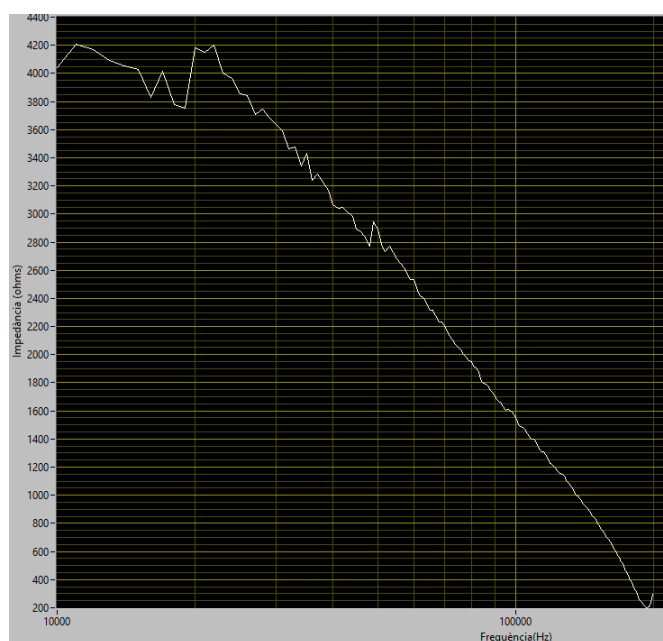
Tot i no trobar freqüències de ressonància clares en l'espectre que es consideren com a aptes per establir la comunicació en el projecte (69 a 180 kHz), es poden observar petits pics que podrien ser corresponents a petites ressonàncies.

Piezoelèctric	Freqüències de ressonància (kHz)
B&K 106	20,5 ; 50,5 ; 13,5
B&K 105	20 ; 50,5 ; 13,5
Cilindre gran	20 ; 69,5 ; 86 ; 116,5 ; 133,5
Cilindre petit	20,5 ; 50,5 ; 110,5 ; 142 ; 172
Pz29 ample	20,5 ; 49,5
Pz29 estret	20,5 ; 48,5

**Taula 5.-** Pics de ressonància.

El fet que hi hagi freqüències de ressonància comunes en tots els piezoelèctrics a 20 kHz i 50 kHz desemboca en l'atribució d'aquestes a una ressonància en el sistema d'adquisició de dades, no del propi piezoelèctric.

En primer lloc es comprovarà si la causa d'aquests pics és una ressonància en el condensador, fent un assaig al Pz29 ample sense aquest element. Per fer aquest estudi s'ha hagut de modificar el VI perquè en lloc d'eliminar el 10% de les mostres més altres elimini el 60%, el motiu és que el soroll que evita el condensador provoca moltes lectures fallides, que hauran de ser eliminades pel programa en aquest assaig. En el cas de la Rint haurà de ser a la inversa ja que és inversament proporcional a la intensitat, per tant s'haurà d'eliminar el 60% de lectures menors.



**Figura 38.-** Escombrat de freqüències Pz29 ample sense condensador.

Com es pot observar segueixen apareixent els dos pics de ressonància comuns en tots els cassos, per tant deuen estar produïts per algun altre element del sistema.

L'assaig de l'escombrat de freqüències també s'ha realitzat amb tres nous piezoelèctrics a petició del equip a càrrec del projecte. Aquests s'anomenaran disc groc, rectangle ample i rectangle estret. Els resultats obtinguts estan exposats en l'annex B. A continuació es mostra la gràfica obtinguda del rectangle ample.



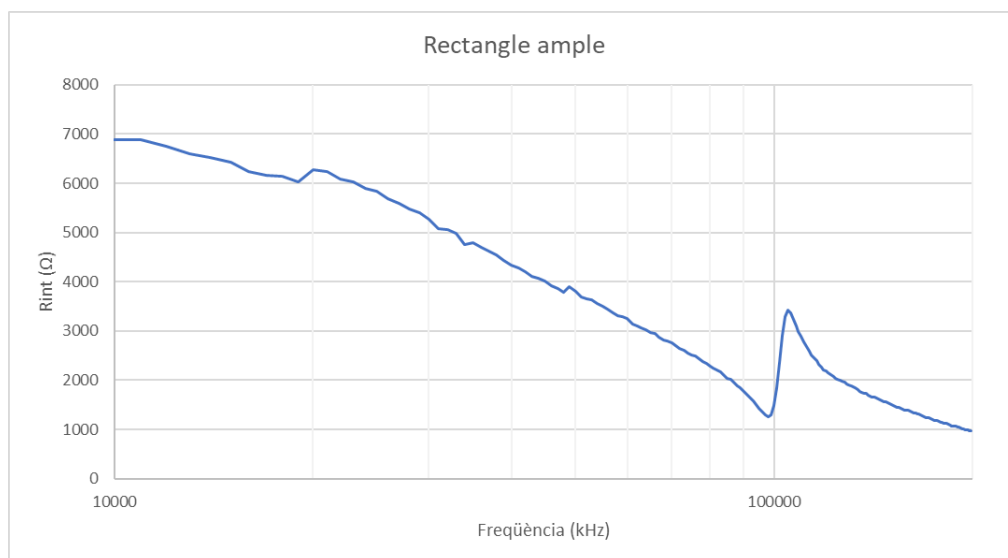


Figura 39.- Escombrat de freqüències rectangle ample.

En els casos de el rectangle estret i el disc groc s'han obtingut resultats molt semblants a la resta de piezoelèctrics, és a dir, la recta descendent sense cap freqüència de ressonància clara. En el cas del rectangle ample s'observa una freqüència de ressonància clara a 103kHz.

### 5.3.3. Conclusions freqüències de ressonància

Com a valoració final d'aquest apartat podem concloure que en tots els casos menys el rectangle ample no obtenim cap freqüència de ressonància i per tant no podem extreure'n a quines freqüències el sistema serà més eficient. En el cas del rectangle ample s'ha trobat un pic de ressonància a 103kHz, per tant a la hora de calcular el SPL, aquesta freqüència es tindrà en especial consideració.

## 5.4. Sound Pressure Level

Un cop trobat el comportament de cada un dels piezoelèctrics en funció de la freqüència, l'estudi segueix amb l'observació de la seva interacció amb el medi líquid. El SPL o Sound Pressure Level mesura la intensitat d'un so basant-se en la pressió generada per aquest.

Per tal de valorar de forma més acurada els piezoelèctrics es requeriria l'obtenció d'un diagrama de radiació (Fig.21) per tal de conèixer la intensitat de l'emissió en diferents direccions. En aquest projecte no s'ha disposat del temps necessari per realitzar aquest assaig, així que s'obtindrà aquesta mesura d'una sola direcció dels piezoelèctrics que presenten millors propietats per utilitzar-se com a emissor de l'etiqueta acústica pel seguiment d'escamarlans.

### 5.4.1. Assaig realitzat

Per realitzar aquesta mesura es situa l'emissor dins de l'aigua i se li aplica una ona d'una amplitud i freqüència determinada. En el cas de que n'hi hagin, resulten d'especial interès les freqüències de ressonància obtingudes en l'apartat anterior degut a la seva major eficiència. A continuació, es mesura el voltatge eficaç obtingut en un hidròfon situat a mig metre de distància, aquest assaig s'hauria de realitzar a un metre de distància, però les dimensions del aquari disponible en el laboratori no ens ho permet.

Un cop obtinguda aquesta dada es pot calcular el SPL aplicant la següent formula [26]:

$$SPL = 20 \log_{10} Vr + TL - Sr - Gr \quad (23)$$

On Vr és el voltatge eficaç obtingut en l'hidròfon receptor, TL és la pèrdua en la transmissió en dB, Sr és la sensibilitat del hidròfon receptor i Gr el guany del sistema d'adquisició de dades. En el cas d'aquest assaig s'han considerat nul·les les pèrdues en la transmissió, s'han obtingut els valors de la sensibilitat del hidròfon de la font [34] i donat que no s'ha utilitzat cap sonda ni amplificador el valor del guany és unitari.

#### 5.4.1.1. Circuit de test implementat

En aquest cas el generador de funcions anirà connectat en primer lloc al canal 1 del oscil·loscopi per assegurar que l'ona generada és la desitjada, i a la vegada al piezoelèctric estudiat, és a dir, al que en aquest cas actua com a emissor. En el canal 2 de l'oscil·loscopi hi haurà connectat l'hidròfon B&K. Tant l'emissor com el receptor estaran dins la peixera de dimensions 80x35x40 cm, subjectats en una barra metàl·lica a mig metre de distància entre ells. Aquesta barra forma part d'una estructura que permet situar els dos elements a la mateixa altura, en la direcció desitjada i a la distància mitja entre el fons i la superfície. En les següents imatges es pot observar tot el sistema:



Figura 40.- Circuit SPL.

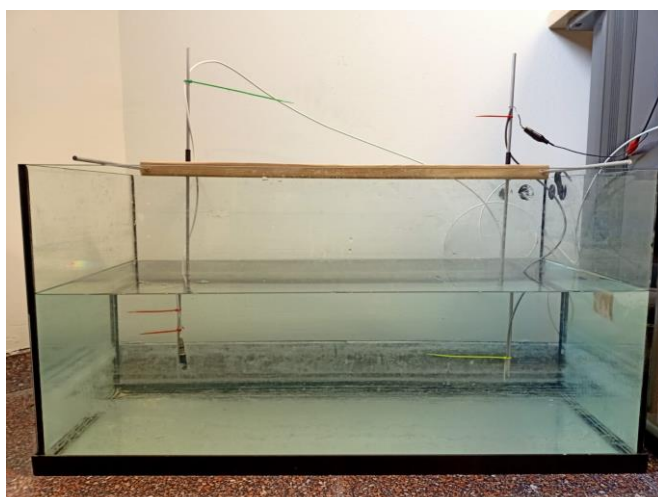


Figura 41.- Circuit SPL (peixera).

### 5.4.1.2. Virtual Instrument

En aquest cas s'ha utilitzat un VI per generar el pols, però l'obtenció del SPL s'ha fet de forma manual mostra a mostra.

A continuació s'explica breument el VI dissenyat juntament amb el company de laboratori Carlos Lorenzo per obtenir el pols.

En la primera etapa de l'estructura seqüencial (requadre 1) s'ajusten els valors desitjats de freqüència i amplitud, en aquest cas 0, perquè comenci a generar polsos des de la primera iteració. Aquesta acció es realitza enviant al generador de funcions els missatges "SOUR:FREQ:SYNT X" [37] on X és el valor de la freqüència en Hz i "SOUR:AMPL:LEV X" [37] on X és el valor del voltatge pic a pic.

La segona etapa conté un bucle while, i aquest dins conté una segona estructura seqüencial. La primera etapa (requadre 2), equival a pressionar el botó single enviant al oscil·loscopi el missatge ":SING", per així llegir l'ona en el moment que es generi el pols. En la segona etapa (requadre 3), s'ajusta l'amplitud del pols enviant al generador de funcions el missatge "SOUR:AMPL:LEV 10" [37]. També s'ajusta la durada del pols variant la constant connectada amb el cronòmetre, aquest valor és el temps en ms. En la tercera etapa (requadre 4) es realitzen dos accions simultàniament, en primer lloc s'ajusta l'amplitud a 0V enviant el missatge "SOUR:AMPL:LEV 0" [37]. Paral·lelament es llegeix el valor màxim obtingut per l'oscil·loscopi enviant a aquest els següents missatges: "MEAS:ITEM VMAX,CHAN2" [36] per llegir el valor màxim, "MEAS:ITEM? VMAX,CHAN2" [36] per que envii aquest valor pel port USB, el bloc a continuació defineix el temps a passar entre polsos, per últim es llegeix el valor del voltatge màxim llegit per l'oscil·loscopi.

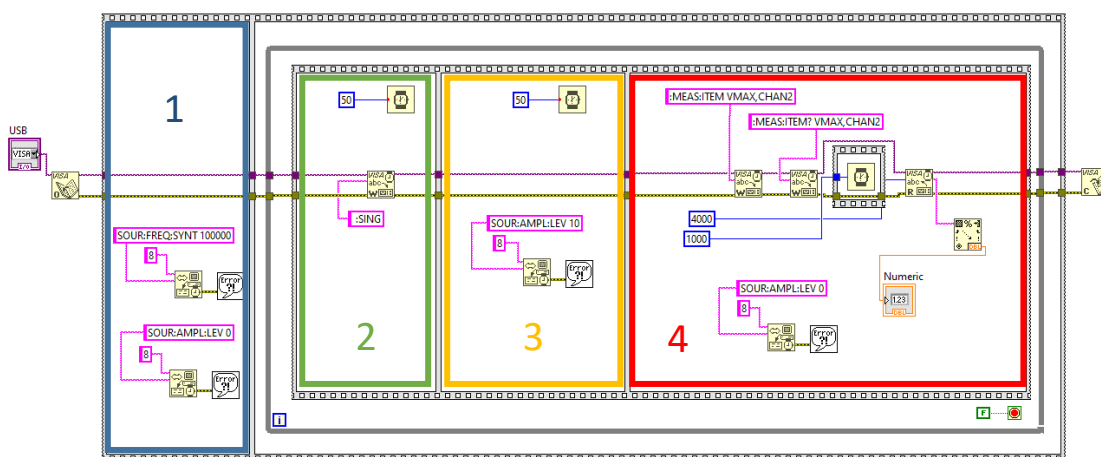


Figura 42.- VI SPL.

## 5.4.2. Procediment Resultats i Interpretació

El primer assaig s'ha realitzat amb el piezoelèctric rectangle ample, donat que té una freqüència de ressonància dins de l'espectre definit com a possible per realitzar la comunicació (69-180kHz). S'ha utilitzat el generador de funcions Gf-857 del fabricant PROMAX per generar el pols. El pols en qüestió és d'una amplitud de 5 V, el màxim output del generador de funcions, i la durada és de 50 ms. Per tal de reduir els errors deguts als rebots interessa que aquest pols sigui el més curt possible, tot i que s'han aconseguit polsos de fins a 20 ms, s'ha observat que 50ms és la durada mínima en la que aquests polsos es generen de forma regular i sense variacions en cap dels paràmetres que el defineixen. S'ha mesurat el valor màxim de voltatge en l'hidròfon receptor (B&K) sense tenir en compte els transitoris del principi i final del pols, aquesta mesura s'ha realitzat manualment amb el cursor, ja que el valor indicat per l'oscil·loscopi està situat en els transitoris del pols, com es pot observar en les captures del oscil·loscopi exposades a continuació.

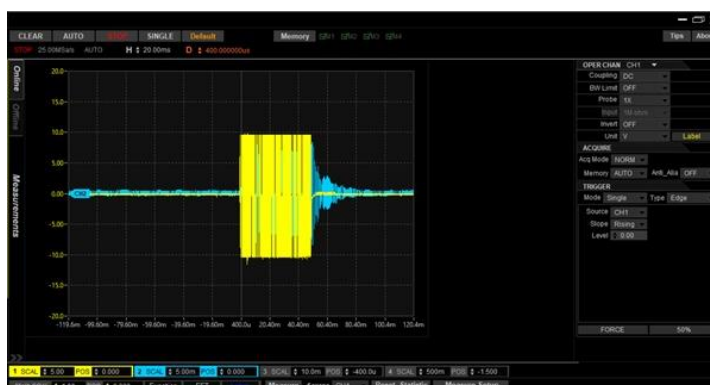


Figura 43.- Captura oscil·loscopi, aspecte pols.



Figura 44.- Captura oscil·loscopi, aspecte recepció.

Aquest valor màxim s'ha dividit entre l'arrel de dos per obtenir el voltatge eficaç, i amb aquest valor, el de la sensibilitat del hidròfon receptor, el del guany del sistema i considerant les pèrdues en la transmissió 0dB, s'ha calculat el valor del SPL (23). S'han valorat les freqüències següents: 40, 50, 60, 95, 105 i 115 kHz. Els tres primers casos resulten d'especial interès per coordinar l'emissió de senyals amb la freqüència de funcionament del microcontrolador, els altres tres s'han fet per observar el comportament dins de la freqüència de ressonància del piezoelèctric. A continuació s'ha realitzat el mateix assaig amb el piezoelèctric disc ample. L'elecció d'aquests dos piezoelèctrics s'ha fet tenint en compte que són els dos que presenten millors propietats per utilitzar-se com a emissors en l'etiqueta.

Els valors de la sensibilitat del hidròfon B&K s'han obtingut del datasheet d'aquest [34] realitzant una regressió lineal. Es mostren a la següent taula:

Freqüència (kHz)	Sensibilitat (dB re V/Pa)
40	-212.7
50	-213
60	-212.9
95	-211.6
105	-210.8
115	-210.3

*Taula 6.- Sensibilitats B&K.*

Els resultats obtinguts són els següents:

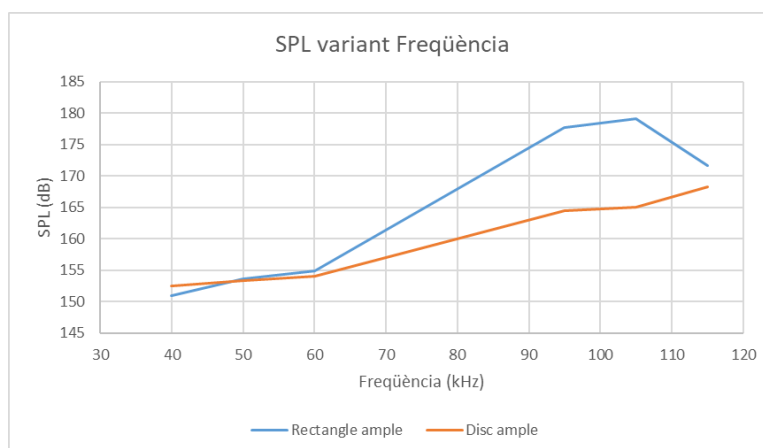


Figura 45.- Resultats SPL en funció de la freqüència.

En primer lloc es pot observar una clara eficiència superior dins dels valors propers a la freqüència de ressonància del rectangle ample especialment en el valor exacte del pic de ressonància.

També es pot observar, més fàcilment a les mesures preses al disc ample, degut a que aquest no té freqüències de ressonància en l'espectre analitzat, que a mesura que la freqüència augmenta el valor del voltatge va creixent.

L'assaig s'ha tornat a repetir, aquest cop amb la freqüència fixa a 50 kHz i variant l'amplitud de l'ona emesa. Els resultats obtinguts són els següents:

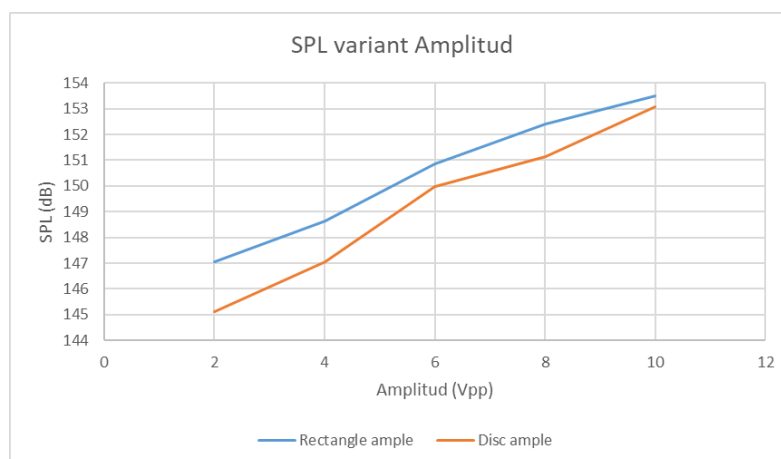


Figura 46.- Resultats SPL en funció de l'amplitud.

Com es pot observar el SPL avança linealment amb l'amplitud de l'ona emesa, d'aquesta gràfica també es pot extreure que la comunicació amb el piezoelèctric Rectangle ample, te valors del SPL més alts, per tant la comunicació amb aquest resulta més eficient.

### 5.4.3. Conclusions SPL

Com a conseqüència de que aquest assaig s'hagi realitzat dins d'una peixera, on la incidència dels rebots és molt alta, i a una distancia de mig metre en lloc d'un no ens permet considerar aquests valors de SPL com a correctes. Tot i així, en podem extreure conclusions sobre les tendències d'aquest valor en els dos piezoelèctrics analitzats.

La primera conclusió és que, com s'observa perfectament en la gràfica del SPL en funció de la freqüència del disc ample, sense la presencia d'una ressonància el valor del SPL augmenta linealment amb la freqüència.

La segona conclusió a la que s'ha arribat és que en els espectres freqüencials propers a una freqüència de ressonància i en especial el pic, el valor del SPL és molt superior, per tant la comunicació serà molt més eficient.

Per últim també s'ha conclòs del assaig en el que hem variat l'amplitud que el SPL augmenta linealment amb el valor de l'amplitud de l'ona emesa.



## 6. Valoració piezoelèctrics estudiats

En base als resultats obtinguts en aquest treball no es pot considerar una elecció clara sobre quin dels emissors objecte d'estudi és el millor candidat per formar part de l'etiqueta acústica per seguir escamarlans. Per tal d'extreure aquesta conclusió seria necessari mesurar el SPL sense l'efecte dels rebots, i que aquest no fos mono direccional, sinó un diagrama de radiació del emissor.

Tot i així es farà una valoració de quins punts forts i fluixos presenten:

En primer lloc, degut a la seva massa, els dos piezoelèctrics cilíndrics encapsulats al laboratori no s'ajusten a les necessitats. El pes mig d'un escamarlà ronda els 50 g [8] així que en cap cas se li podria adherir cap d'aquests dos dispositius, de 17 i 31 g, sense modificar la seva mobilitat i activitat. També es considera massa elevat la massa del hidròfon B&K, i a banda d'això les dimensions d'aquest també podrien afectar a l'activitat del individu estudiat.

Per raons físiques els demés piezoelèctrics no presenten impediments importants, i per tant tots ells haurien de ser objecte d'estudi en la continuació d'aquest treball. Tot i així basant-nos en els valors del escombrat de freqüències i del SPL podem treure algunes hipòtesis sobre les seves eficiències.

Basant-nos en la llei de conservació de l'energia i negligint les pèrdues, és a dir considerant que la totalitat de l'energia elèctrica es transforma en el transductor en energia mecànica. Podem relacionar la resistència interna amb l'energia mecànica.

$$E_{mecànica} = E_{elèctrica} = P * t = \frac{V^2}{R} * t$$

(24)

Tot i aquesta fórmula ser molt genèrica, demostra que, tot i haver molts altres factors de més pes que influeixen en l'emissió, l'energia mecànica en aquest cas segueix una tendència inversa a la resistència interna. Això també es confirma observant les gràfiques de la resistència interna i la del SPL.

Per últim s'ha de prendre en consideració el pic de ressonància de l'emissor rectangle ample, ja que com s'ha comprovat en l'assaig del SPL, emet ones d'una amplitud al voltant de deu cops superior, per tant tot indica que si el missatge es pogués emetre a aquesta freqüència, el sistema seria molt més òptim i permetria una durabilitat de les bateries molt superiors.



## 7. Anàlisi de l'impacte ambiental

Per tal de realitzar una valoració de l'impacte ambiental generat per aquest projecte s'analitzarà des de dos punts de vista diferents.

En primer lloc és necessària una menció a la contaminació acústica subaquàtica. L'ús d'ones sonores en el mar en molts casos poden ser confosos per espècies que usen la ecolocalització o simplement ones sonores per comunicar-se entre ells. Això provoca la seva desorientació i en alguns casos els pot inclús provocar la mort, com és el cas de cetacis que al interpretar missatges emesos per sonars com a propis acaben encallats en les platges. En alguns cassos s'utilitzen impulsos acústics que resulten desagradables pels mamífers que habiten en el mar per allunyar-los de zones on, principalment per presència de pesquers, corren perill. Aquestes ones s'emeten a 195dB. Les ones emeses per l'etiqueta objectiu d'aquest treball emet en el cas més desfavorable en aquest aspecte ones del ordre de 10dB, per tant podem concloure que no tindrà una gran incidència en l'activitat d'aquestes espècies. [32]

Tot i que sigui difícil de valorar, sense cap dubte, l'emissió d'aquestes ones pot tenir un impacte sobre les espècies marines de la zona, tot i així, en el context en el que l'emissió d'aquestes ones té com a objectiu la investigació destinada a la conservació de les pròpies espècies s'ha de prendre en consideració si aquest impacte val la pena.

Un altre aspecte a tenir en compte és els materials que formen l'etiqueta, ja que en cas de que aquesta es perdés durant la seva utilització seria molt difícil de recuperar. El material piezoelèctric (ceràmic) no resulta nociu, la part que es podria considerar contaminant en cas de pèrdua de l'etiqueta seria el encapsulat de plàstic.

Respecte a la resta de components de l'etiqueta, al no tenir el disseny ni els components a utilitzar, no podem fer una valoració acurada, tot i així, podem comentar que tots els elements hauran de obeir les restriccions de la normativa RoHS.



## Conclusions

Aquest apartat conté les valoracions finals del treball, tant a nivell d'execució, resultats i aprenentatge.

El primer problema que planteja aquest treball és l'elecció d'un mètode de comunicació sense fil per tal de realitzar el seguiment passiu d'escamarlans en el seu habitat natural. Fruit de la recerca d'informació s'ha conclòs que la tecnologia d'etiquetes és la que més s'ajusta per realitzar aquest estudi i concretant més, les etiquetes acústiques, donat les avantatges d'aquestes ones davant dels seus principals competidors (ones electromagnètiques i impulsos òptics). La realització d'aquest estudi ha servit no només per escollir el mètode de comunicació, sinó també per conèixer amb profunditat el tema estudiat i la seva actualitat.

En segon lloc, i un cop escollit que el mètode més eficient són les etiquetes acústiques, s'ha realitzat l'estudi de diferents materials piezoelèctrics per estudiar el seu comportament. Aquest estudi no ha seguit el transcurs que s'esperava i no s'ha pogut acabar el treball obtenint un dels piezoelèctrics com a millor opció per utilitzar-se com a emissor de l'etiqueta acústica per seguir escamarlans. Tot i així el treball s'ha anat adaptant a les circumstàncies i això ha donat peu a obtenir unes altres conclusions sobre el comportament dels materials piezoelèctrics i unes hipòtesis sòlides sobre les possibilitats de cada un d'ells.

Durant la recerca de les freqüències de ressonància, tot i obtenir en la gràfica de resistència interna en funció de la freqüència una recta descendent, com mostraven estudis anteriors en assajos semblants, no constaven pics de ressonància clars, dins de les freqüències considerades com a vàlides per realitzar la comunicació. Aquest motiu ens va conduir a observar el comportament a freqüències més altes i es va veure que les primeres ressonàncies eren a freqüències en les que realitzar la comunicació era inviable, degut a la ràpida degradació que patirien les ones, que derivaria en un rang d'emissió molt baix. El fet de tenir a disposició dos discs piezoelèctrics només diferenciats per la seva amplada ens permet comparar les dos freqüències de ressonància i concloure que l'amplada del disc i les freqüències en les que hi ha ressonàncies segueixen tendències inverses. I generalitzant, que una mida del material piezoelèctric superior, incideix en obtenir freqüències de ressonància més baixes. Referent a la valoració dels piezoelèctrics aquest estudi ens mostra que únicament un dels materials estudiats té una ressonància dins del espectre de freqüències valorats com a possibles per realitzar l'emissió (69-180 kHz).

De l'estudi del SPL confirmem les hipòtesis fetes sobre el comportament dels piezoelèctrics en base a les dos variables que defineixen l'ona:

- En primer lloc, a mesura que s'augmenta la freqüència, la resistència interna va baixant i el valor del SPL augmenta.
- En segon lloc, en els espectres propers a freqüències de ressonància els valors tant de la resistència interna com del SPL augmenten de forma considerable, sobretot en el valor del pic de la ressonància.
- Per últim, s'ha observat que el SPL augmenta linealment amb el creixement de l'amplitud de l'ona emesa.

D'aquest treball no es pot treure unes conclusions definitives sobre quin dels piezoelèctrics estudiats presenta millors condicions per utilitzar-se en l'etiqueta acústica. Tot i així, en base als paràmetres estudiats, s'ha fet una valoració de quins piezoelèctrics mostren propietats més favorables per ser escollits i així definir-los com a emissors d'especial interès a la hora de seguir amb aquest estudi. Per altra banda també s'han descartat alguns dels candidats ja que per motius físics, no és viable posar-los en una etiqueta per seguir escamarlans.

Per fer l'elecció definitiva del piezoelèctric seria necessari obtenir uns resultats fiables del SPL realitzant l'assaig amb un material absorbent d'ones a les parets de l'aquari, si amb aquestes condicions tampoc funcionés, s'hauria de fer en un espai més ampli en el que els rebots no afectessin de manera tant significativa als resultats.

Com a valoració final del treball considero que ha sigut molt enriquidor a nivell acadèmic i personal. Tot i no haver assolit els objectius definits al començar-lo, el transcurs del treball i els resultats obtinguts m'han conduït a fer una recerca més ampla, i així entendre els motius pels que no he obtingut els resultats esperats.

Més enllà de l'àmbit tècnic i acadèmic, aquesta experiència m'ha servit per conèixer més de prop el món de les investigacions oceàniques, concretament el seguiment d'espècies marines. Això em fa estar molt agraït ja que per primer cop he pogut ajuntar el meu amor pel mar i el meu interès pels estudis tècnics.

## Pressupost i/o Anàlisi Econòmica

En aquest apartat s'exposa el cost del projecte, dividit en cinc parts diferents:

- Elements emissors.
- Equip utilitzat.
- Software.
- Recerca.
- Execució.

S'ha de tenir en compte que aquest pressupost es fa tenint en compte tots els costos com a únics d'aquest projecte, és a dir, com si tots els equips utilitzats s'haguessin obtingut únicament per realitzar aquest estudi. També s'ha de tenir en compte que no tots els materials obtinguts s'han utilitzat, ja que en alguns cassos s'han comprat més unitats que les que s'han necessitat.

En aquesta primera taula s'exposen els preus dels materials utilitzats per la confecció de l'element emissor. En alguns casos no s'ha pogut obtenir, donat a que el encapsulat dels piezoelèctrics no s'ha realitzat en aquest projecte, en aquests casos s'ha aproximat el preu en base a la recerca de materials similars.

<b>Elements emissors</b>			
<b>Descripció</b>	<b>Unitats</b>	<b>Preu unitari</b>	<b>Cost</b>
Disc ample Pz29	5	0 €	0 €
Disc estret Pz29	3	0 €	0 €
Disc groc	1	0 €	0 €
Cilindre gran	1	21,31 €	21,31 €
Cilindre petit	1	21,31 €	21,31 €
B&K 8103	2	2525,05 €	5050,11 €
Rectangle ample	1	21,31 €	21,31 €
Rectangle estret	1	0 €	0 €
Material encapsulament cilindres	1	15 €	15 €
Silicona termoretràctil	1	5 €	5 €
Rollo cable 0,5mm	1	4,65 €	4,65 €
<b>Total</b>	-	-	<b>5138,69 €</b>

*Taula 7.- Pressupost (elements emissors).*



En aquesta segona taula es mostra el preu de tots els equips de laboratori utilitzats durant el projecte.

Equip			
Descripció	Unitats	Preu unitari	Cost
Oscil·loscopi RIGOL DS1104z+	1	553,58 €	553,58 €
Generador de funcions PROMAX GF-857	1	642,51 €	642,51 €
Sonda BNC	1	6,85 €	6,85 €
Cable BNC - bananas	2	6,20 €	12,40 €
Cable BNC - BNC	1	3,23 €	3,23 €
Cable BNC - cocodrils	1	1,9 €	1,9 €
Protoboard	1	9,10 €	9,10 €
Peixera	1	38,29 €	38,28 €
Suport estudi SPL	1	0 €	0 €
Resistència 10Ω	10	0,1 €	1 €
Resistència 1Ω	10	0,1 €	1 €
Condensador 6,8nF	1	0,15 €	0,15 €
Brides	1	1 €	1 €
<b>Total</b>	-	-	<b>1151 €</b>

Taula 8.- Pressupost (Equips).

En la taula a continuació es mostren els preus de les diverses llicències de programes utilitzats durant la realització del projecte.

<b>Software</b>			
<b>Descripció</b>	<b>Unitats</b>	<b>Preu unitari</b>	<b>Cost</b>
Llicència Office 360 personal	1	69 €	69 €
Llicència LabView Base	1	406 €/any	406 €
Llicència UltraSigma	1	0 €	0 €
Llicència UltraScope	1	0 €	0 €
<b>Total</b>	-	-	<b>475 €</b>

*Taula 9.- Pressupost (Software).*

la taula a continuació s'exposen les hores invertides en cada un dels estadis de la realització del treball a nivell teòric.

Recerca			
Descripció	Unitats	Preu unitari	Cost
Contextualització treball	40	8 €/h	320 €
Familiarització LabView	30	8 €/h	240 €
Disseny VI escombrat de freqüències	70	8 €/h	560 €
SPL	10	8 €/h	80 €
Confecció memòria	300	8 €/h	2400 €
Total	470	8 €/h	3600 €

Taula 10.- Pressupost (Recerca).

En la taula a continuació s'exposen les hores invertides en l'execució dels programes dissenyats, en el cas de l'escombrat de freqüències el preu/h és més baix donat que el procés està totalment automatitzat.

Execució			
Descripció	Unitats	Preu unitari	Cost
Escombrat de freqüències	300	2 €/h	600
SPL	40	8 €/h	320
Total	340	-	920 €/h

*Taula 11.- Pressupost (execució).*

Amb la suma de tots els valors totals de les taules anteriors s'obté el cost final del projecte.

Descripció	Cost
Elements emissors	5138,69 €
Equip	1151 €
Software	475 €
Recerca	3600 €
Execució	920 €
Total	11.284,69 €

*Taula 12.- Pressupost total.*

El cost final del treball ha sigut **onze mil dos-cents vuitanta-quatre amb seixanta-nou** euros.

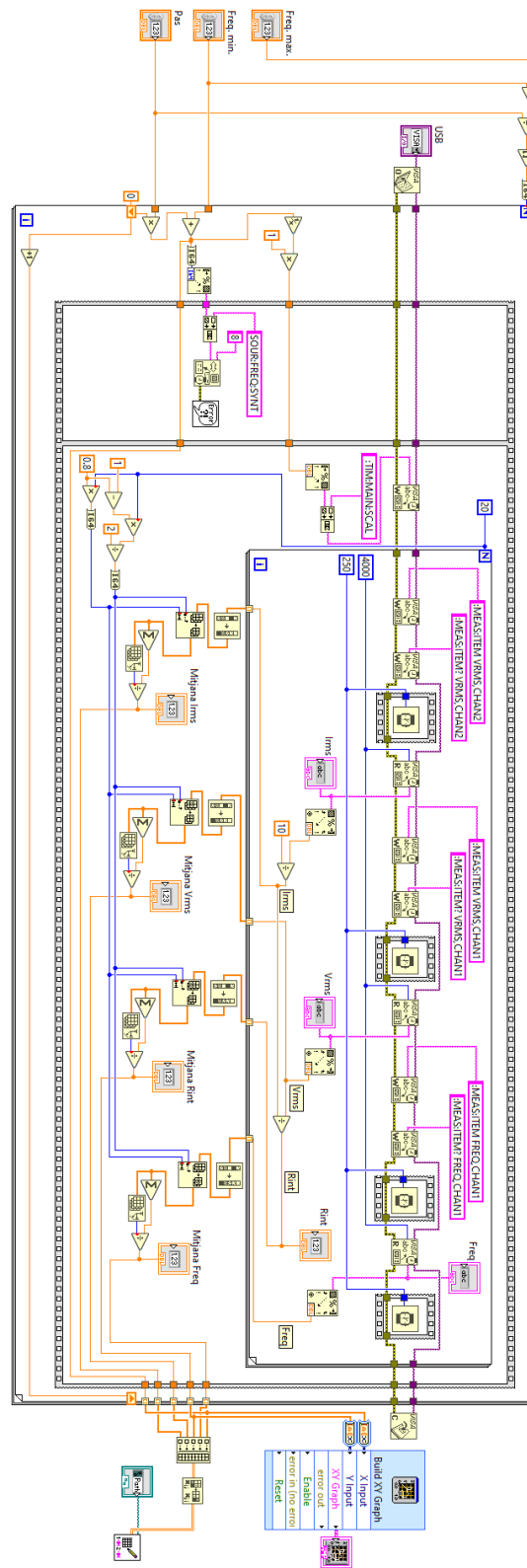
## Bibliografia

- [1] Suay, J. Radiocomunicaciones. Treball acadèmic, Universitat Politècnica de València, 2002.
- [2] Imatge hidròfon: <https://n9.cl/zb7sj>
- [3] Smolyaninov, I; Balzano, Q; Davis, C; Young, D. *Surface Wave-Based Underwater Radio Communication*. Article, University of Maryland, 2018. DOI: [10.1109/LAWP.2018.2880008](https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2880008)
- [4] Fernández, D. Caracterización de hidrófonos de bajo coste y su aplicación en estudios bioacuáticos. Treball final de màster, Universitat Politècnica de Valencia, 2015.
- [5] Imatge efecte Doppler: <https://n9.cl/y7lci>
- [6] Artero, C; Noguerras, M; Dañobetita, J; Mànuel, A. Data communication and control Systems implementation in the OBSEA. Article, Universitat Politècnica de Catalunya, SARTI, 2009.
- [7] Martín, A. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. Presentació, Universidad de Ovideo.
- [8] Wikipedia (cigala): [https://es.wikipedia.org/wiki/Nephrops\\_norvegicus](https://es.wikipedia.org/wiki/Nephrops_norvegicus)
- [9] LabView user manual: <https://www.ni.com/pdf/manuals/320999e.pdf>
- [10] Lanbo Liu, Shengli Zhou, Jun-Hong Cui. Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks. Article, University of Connecticut, 2008.
- [11] Stojanovic, M. Underwater Acoustic Communication. Informe tècnic, Northeastern University, Electrical and Computer Engineering Department, 2015.
- [12] Características eléctricas de la superficie de la Tierra – Union Internacional de Telecomunicaciones, 1992.
- [13] Sendra, S. Comunicaciones inalámbricas subacuáticas a 2,4 GHz para la transmisión de datos con altas tasas de transferencia. Treball final de grau, Universitat Politècnica de Valencia, 2011.
- [14] Balanis, C. *Advanced engineering electromagnetics*. 2ª edició. Arizona: Wiley, 1989. ISBN 9780470589489.
- [15] Buckingham, M. Ocean-acoustic propagation models. *J. Acoustique*: 223-287, University of Southampton, Institute of Sound and Vibration Research, 1992.

- [16] Formulari. Speed of Sound in Sea-Water. Teddington, National Physical Laboratory.
- [17] Hernández, C; Enriquez, E; Ketchum, J; Melo, A. M. Article, Horizontal and vertical movements of the common dolphins (*Coryphaena hippurus*) in La Paz Bay, Mexico. Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste, 2015.
- [18] Saldaña, M. Acoustic System Development for Neutrino Underwater Detectors. Tesi doctoral, Universitat Politècnica de Valencia, 2017.
- [19] Stojanovic, M; Beaujean, P. *Springer Handbook of Ocean Engineering*. New York: Springer International Publishing. ISBN 9783319166483
- [20] Kilfoyle, D. Article. The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000.
- [21] Akyildiz, I; Pompili, D; Melodia, T. State-of-the-Art in Protocol Research for Underwater Acoustic Sensor Networks. Article, Georgia Institute of Technology, 2006.
- [22] Mantouka, A; Felisberto, P; Santos, P; Zabel, F; Salerio, M; Jesus, S; Sebastiao, L. Development and Testing of a Dual Accelerometer Vector Sensor for UAV Acoustic Surveys. Article, University of Algarve, Laboratory for Robotics and Engineering Systems, 2017.
- [23] Acoustic Tag Usage Discussion:  
[https://www.nwcouncil.org/sites/default/files/notes\\_acoustic.pdf](https://www.nwcouncil.org/sites/default/files/notes_acoustic.pdf)
- [24] ATS. Datasheet etiqueta acústica SS400. 2019.
- [25] Rolt, K. Article. The Fessenden oscillator: History, electroacoustic model, and performance estimate. Massachusetts Institute of Technology, Department of Ocean Engineering, 1994.
- [26] Huidong, L; Deng, Z; Carlson, Y. Design Parameters of a Miniaturized Piezoelectric Underwater Acoustic Transmitter. Article, Pacific Northwest National Laboratory, Energy and Environment Directorate, 2012.
- [27] Sánchez, A. Sistema de comunicación acústica para redes de sensores inalámbricas subacuáticas en aguas someras. Tesi doctoral, Universitat Politècnica de València, 2013.
- [28] Pàgina web N.O.A.A. <https://www.noaa.gov/>

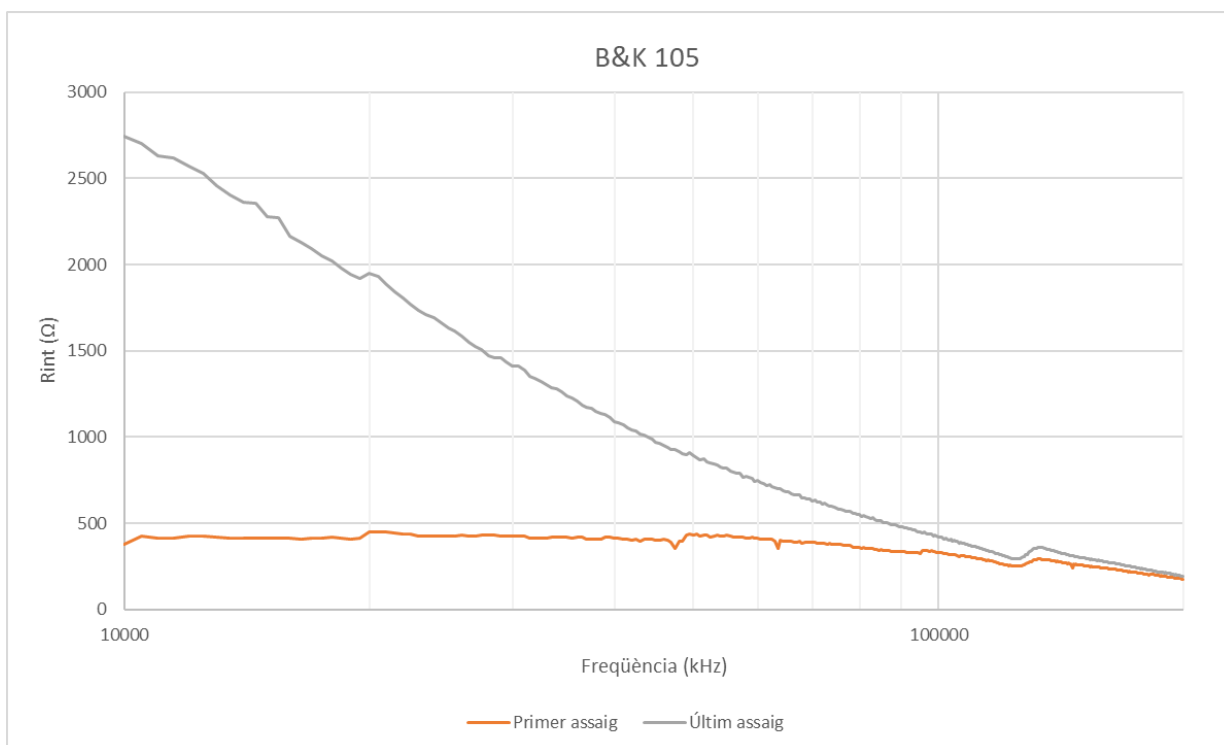
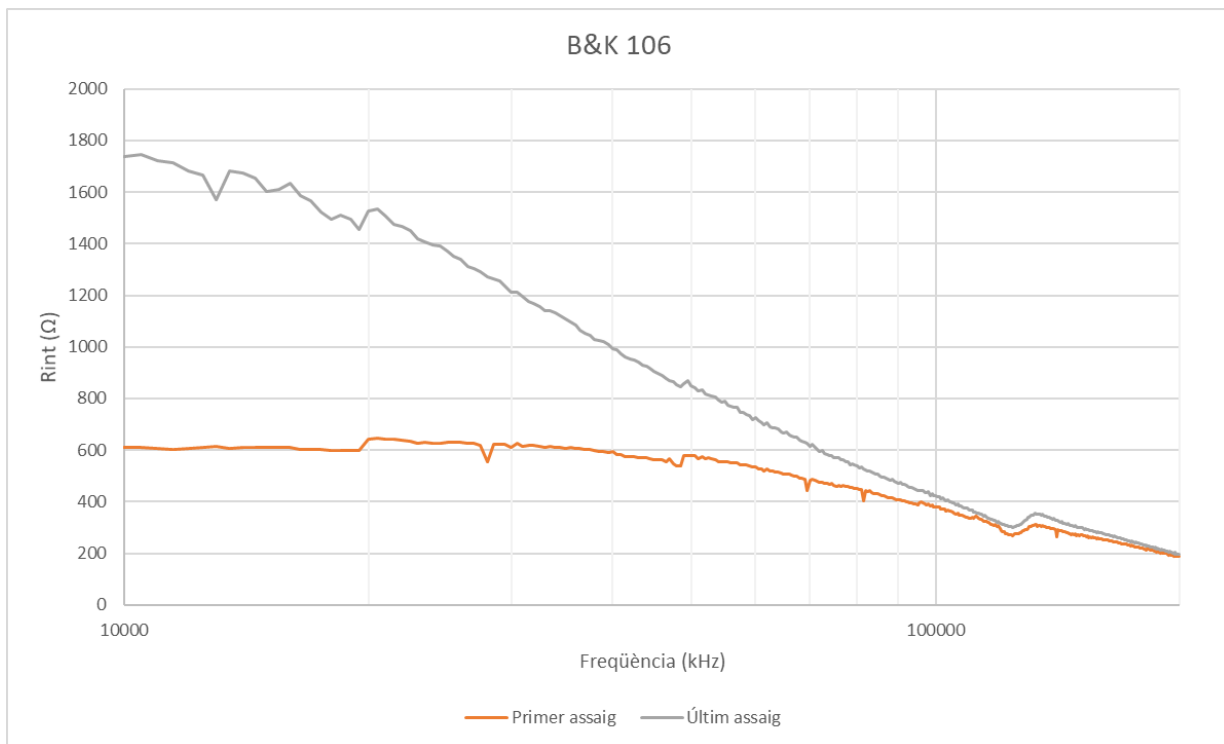
- [29] Aparicio, J; García, E; Jiménez, A; Álvarez, F; Ureña, J. Modelos de propagación de Señales Acústicas en Entornos Subacuáticos. Informe tècnic, Universidad de Extremadura, departamento de Ing. Eléctrica, Electrónica y Automática, 2010.
- [30] Navarro, J; Baptista, J. Reservas marinas de interés pesquero como herramienta de gestión para recuperar pesquerías icónicas del Mediterráneo: el caso de la cigala *Nephrops Norvegicus*. Memoria científico-tècnica, Espanya, 2017.
- [31] Ordoñez, P. Estudio del comportamiento de una cerámica piezoeléctrica mediante elementos finitos. Treball final de Màster, Universitat Politècnica de Valencia, 2011.
- [32] Aguilar, N. Documento técnico sobre impactos y mitigación de la contaminación acústica marina. Informe tècnic, Madrid, 2012. NIPO: 280-12-232-2
- [33] Sarria, D. Sistemas inalámbricos para la monitorización continua del comportamiento de especies marinas. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, departament d'Enginyeria Electrònica, Vilanova i la Geltrú, 2014.
- [34] Brüel & Kjaer. B&K Type 8103 datasheet.
- [35] Pàgina web meggitt. <https://www.meggittferroperm.com>
- [36] RIGOL. DS1000Z Programming Guide.
- [37] PROMAX. GF-857 Programming Guide.
- [38] Pàgina web EvoLogics. <https://evologics.de/>
- [39] Imatge BPSK: <https://n9.cl/d1ht>
- [40] Imatge BASK: <https://www.watelectronics.com/what-is-an-amplitude-shift-keying-working-and-applications/>
- [41] Imatge BFSK: [https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency-shift\\_keying](https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency-shift_keying)
- [42] Imatge Chirp: <https://en.wikipedia.org/wiki/Chirp>

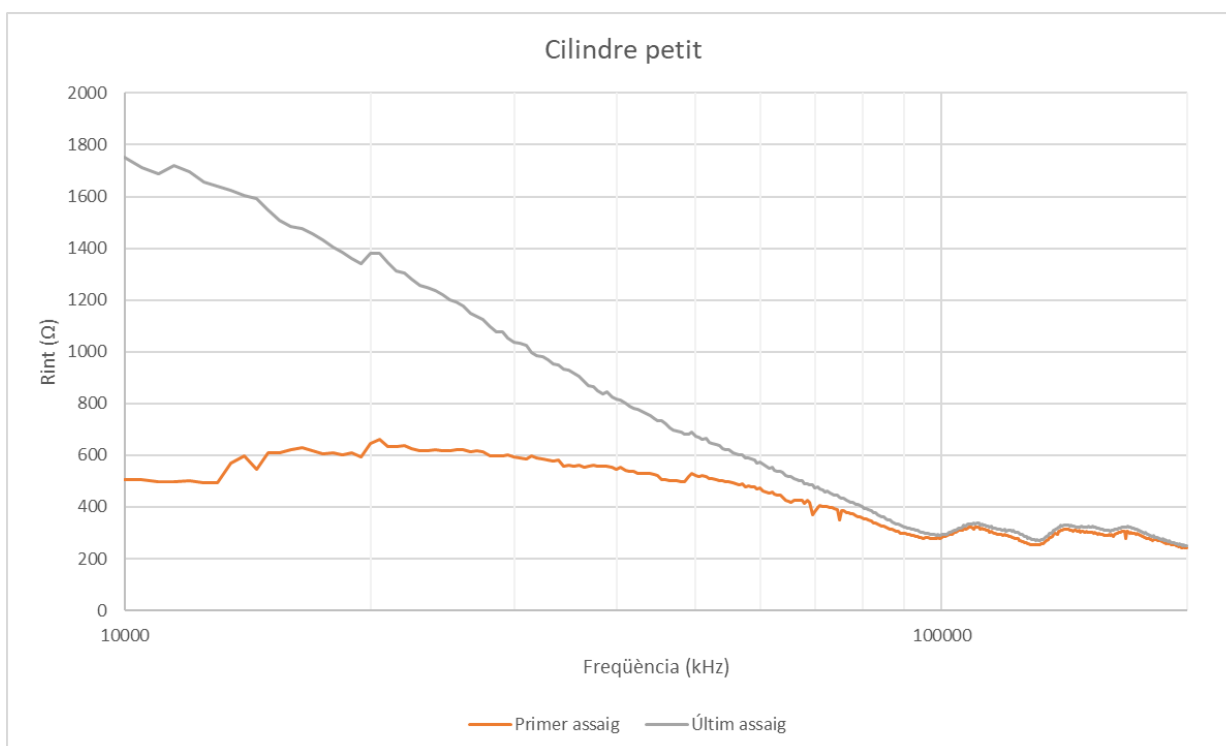
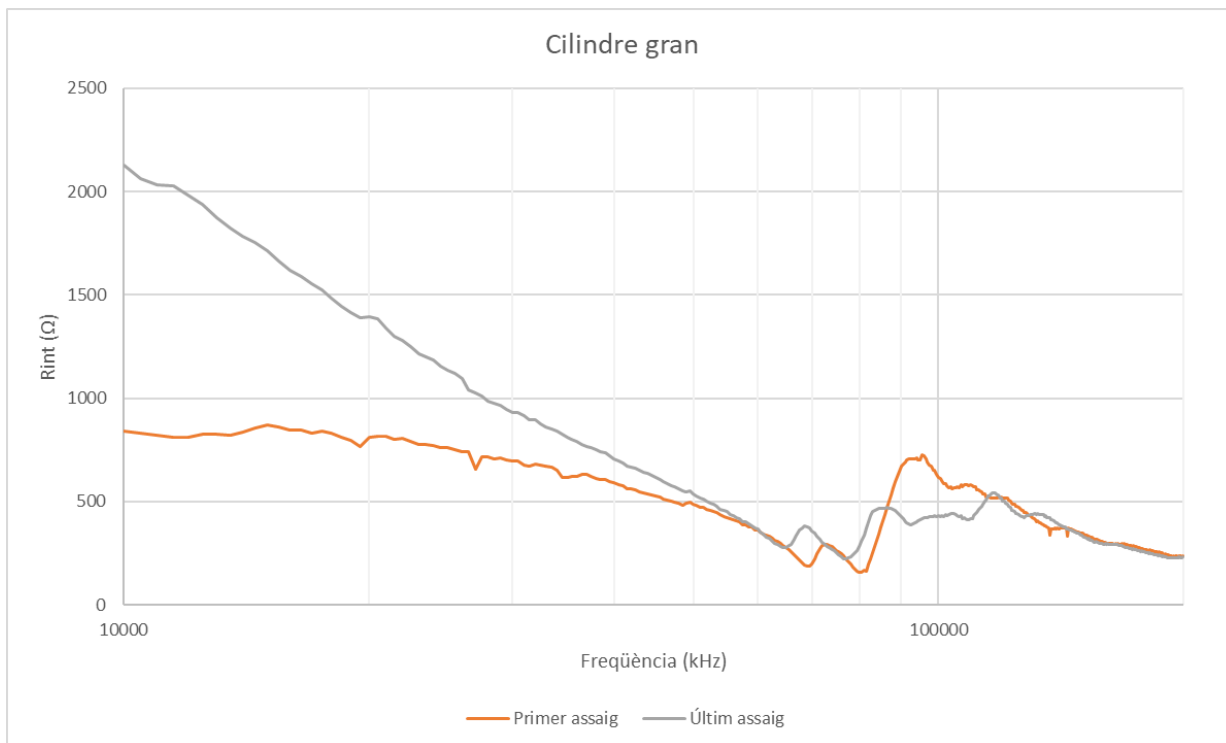
# Annex A (Diagrama de blocs VI escombrat de freqüències)

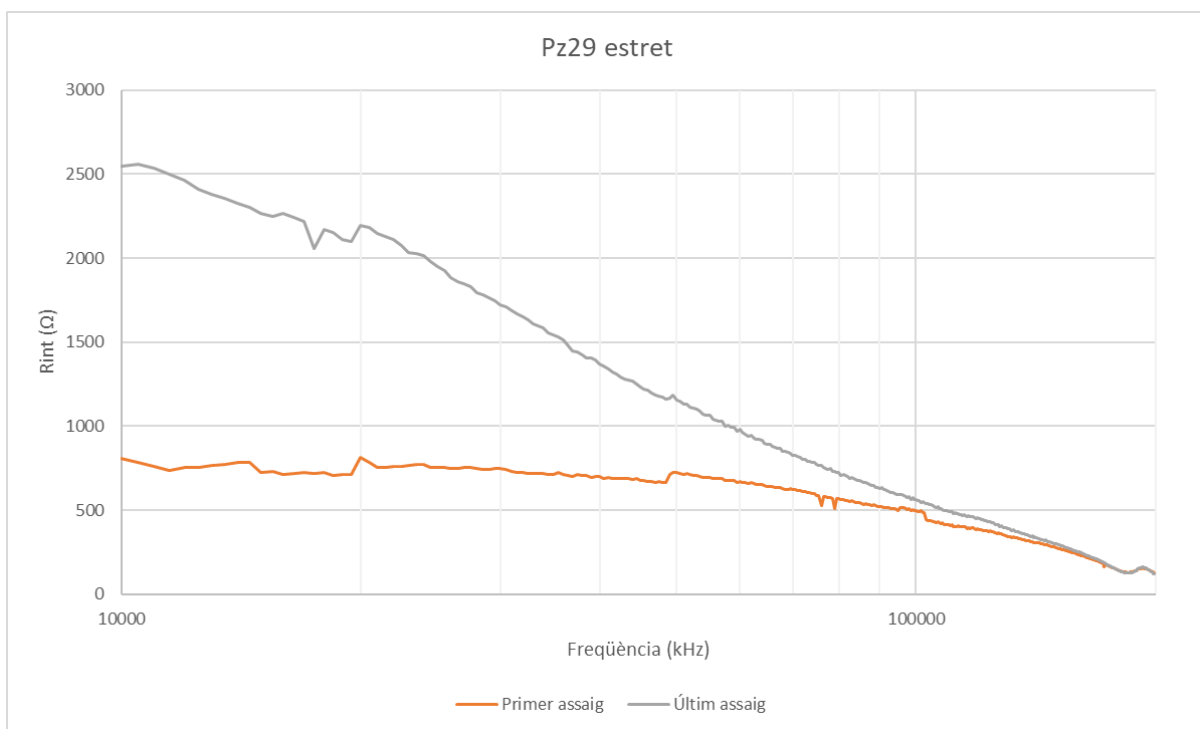
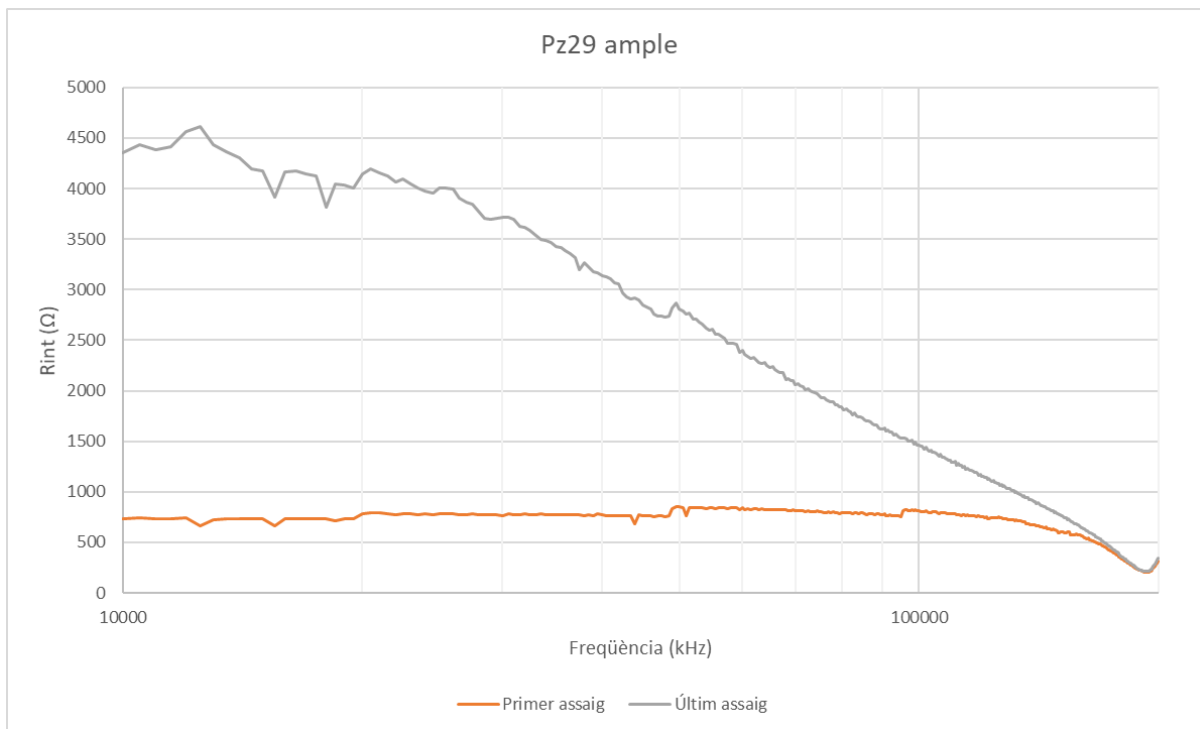


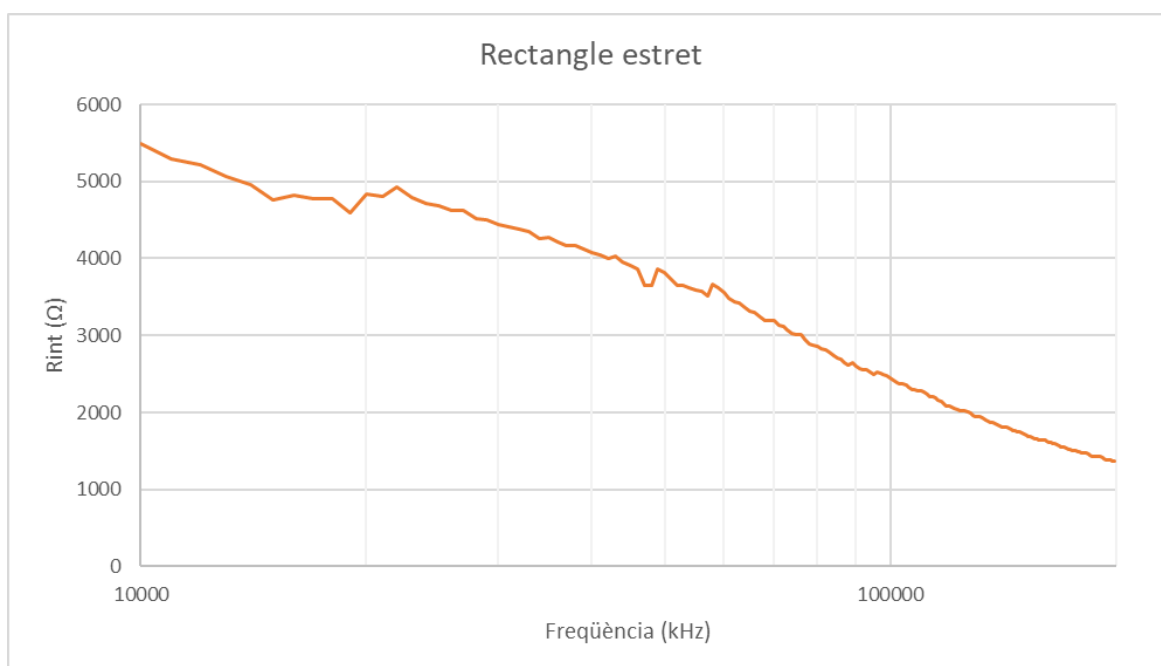
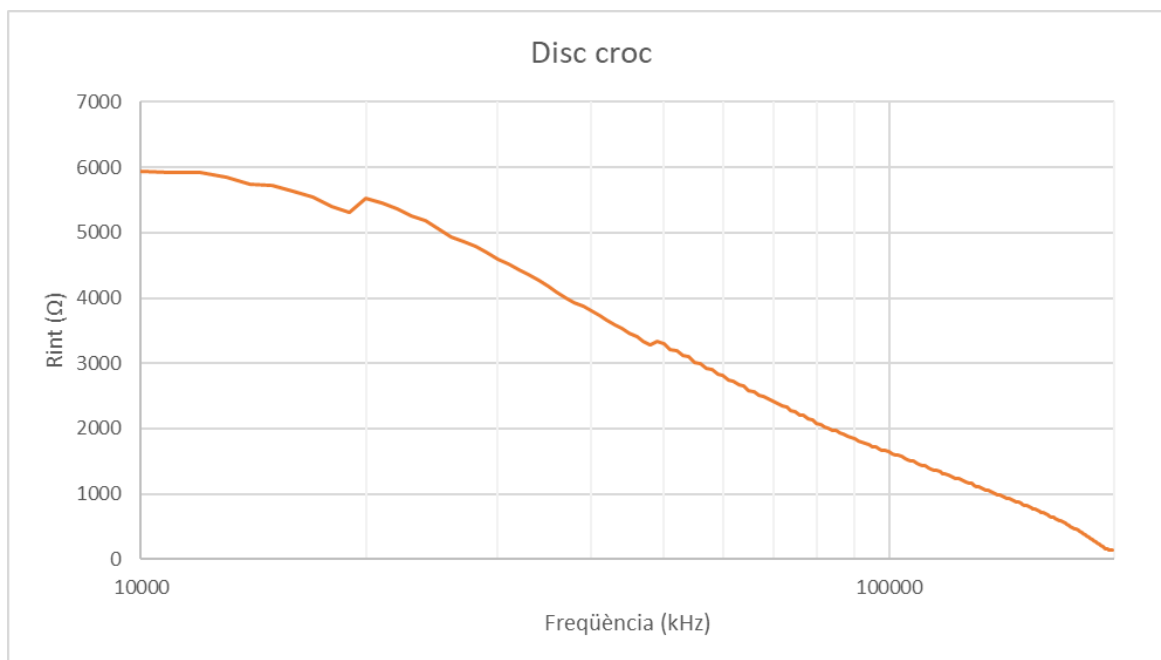


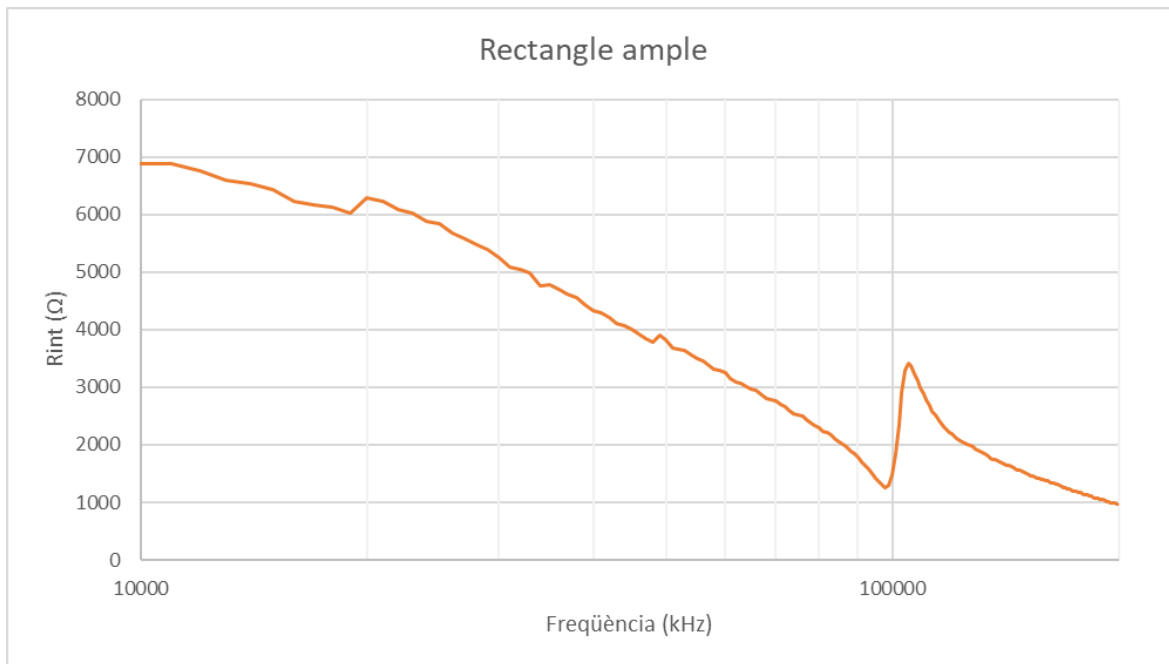
## Annex B (Representacions obtingudes Rint. vs. Freq.)

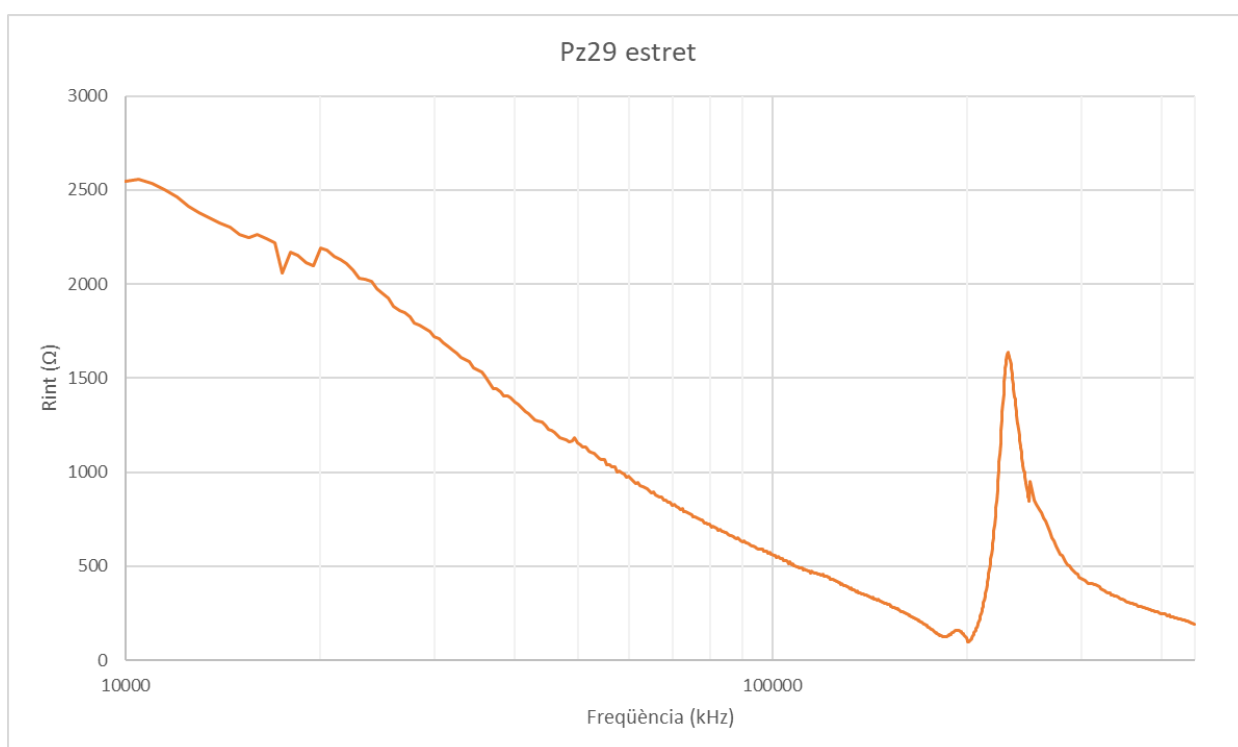
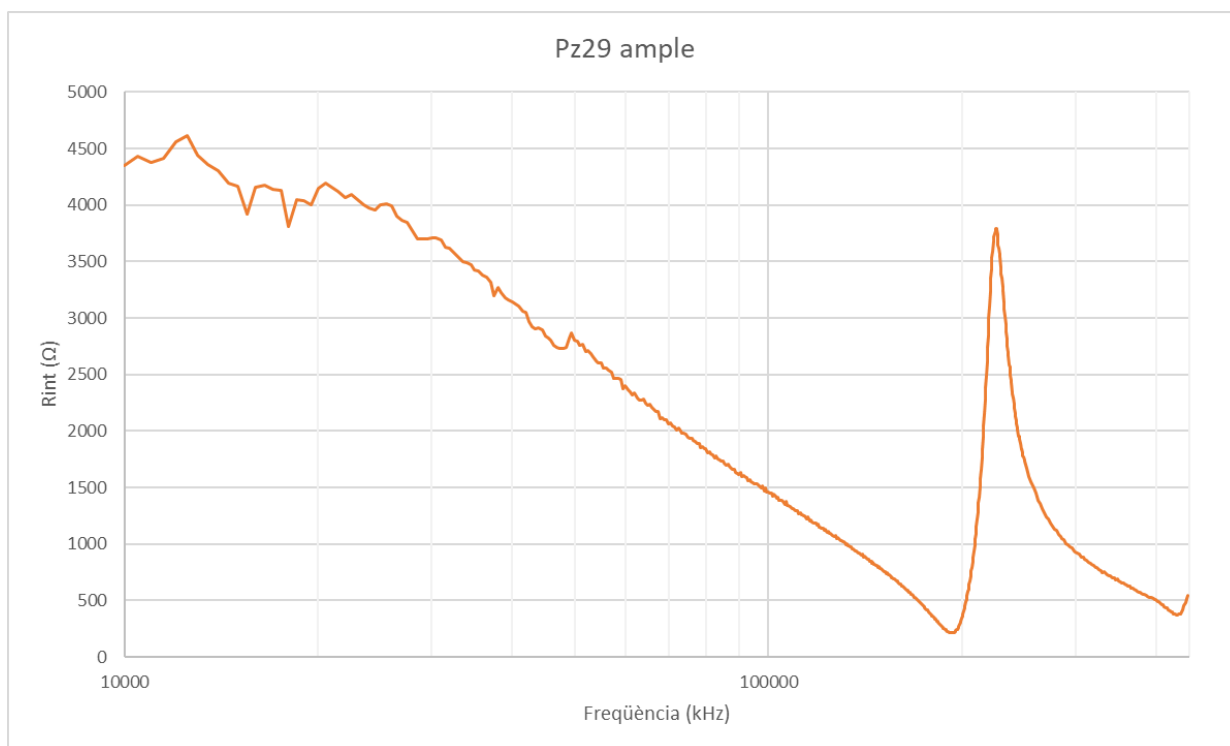




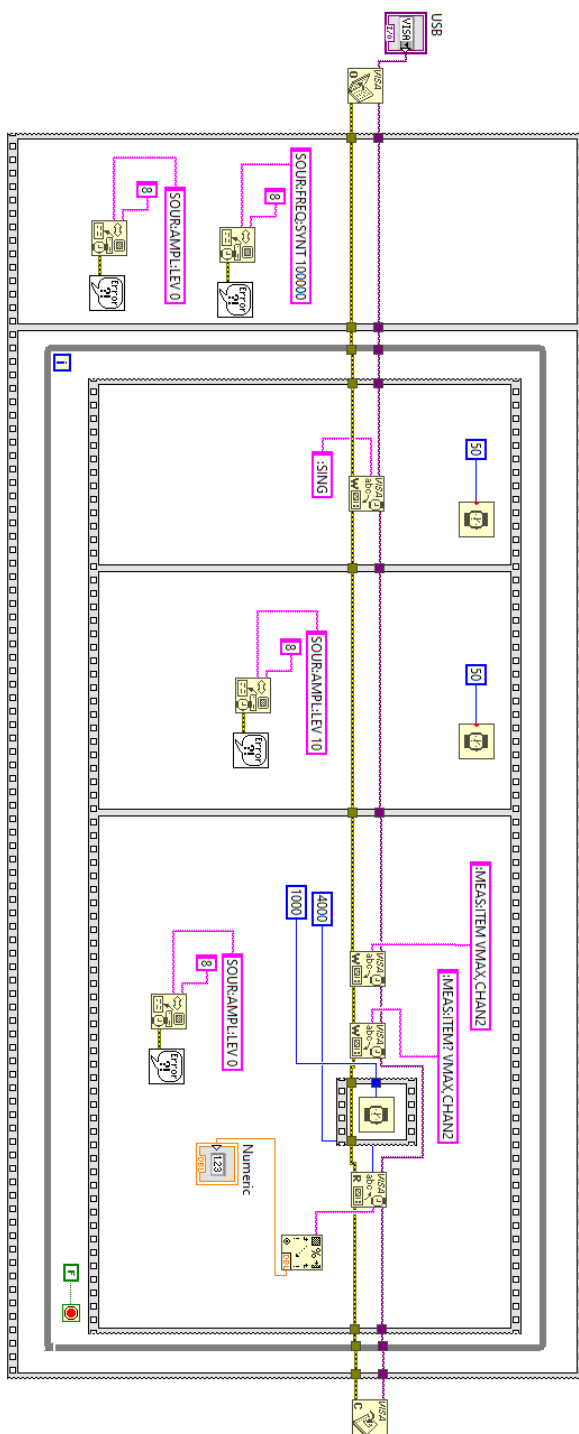








# Annex C (VI SPL)



## Annex D (Representacions obtingudes SPL)

