



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

# Estudi sobre l'aplicabilitat de piezoelèctrics com a sensors per a la previsió del dany en impacte.

Document:

Memòria

Autor/Autora:

Ferran Urquia Sanz

Director/Directora - Codirector/Codirectora:

Ernest Bernat Masó - Lluís Ferrer

Titulació:

Doble grau en Enginyeria electrònica industrial i automàtica i Enginyeria mecànica

Convocatòria:

Tardor, 2021-2022.

TREBALL DE FI D'ESTUDIS



## Agraïments

Als tutors d'aquest treball final de grau, l'Ernest Bernat Masó i el Lluís Jorge Ferrer per l'ajut proporcionat des de la data en que vam contactar per iniciar el projecte, per les seves correccions i les seves recomanacions, per animar-me a treballar i per guiar-me en l'obtenció del resultat que finalment hem obtingut. Sense ells la realització d'aquest projecte no hagués estat possible.

A la meva família per el recolzament i la comprensió en tots els moments, tant en l'execució d'aquest treball com en tots els anys d'universitat, per contribuir a la formació d'un nou enginyer. Als meus pares Maite i Juanma, per ser el pilar fonamental, a la meva germana petita Júlia i a l'altre enginyer de casa, el meu germà Albert. Igualment a la meva parella, la Clàudia, per ser al meu costat i patir i celebrar amb mi tots aquests anys.

Als meus amics, per proporcionar els ànims desinteressats necessaris durant el projecte i els estudis, així com els bons moments que fan els difícils més assequibles

A la Universitat Politècnica de Catalunya i especialment a l'Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa per proporcionar les eines necessàries per al creixement personal.

I finalment agrair-me a mi mateix per posar una petita pedra per al meu futur, l'esforç i la dedicació tenen sempre recompensa.

## Abstract

This project will study the behavior of piezoelectric devices against impact events, with the purpose of using them as sensors to foresee the damage caused in a certain substrate by only cause of the impact on itself.

To do that, the corresponding electric circuit will be designed to generate an electric signal based on the piezoelectric response. After that, a procedure for reading this measurement through an external device will be established, concretely for the case of this project we will use a microcontroller. Besides that, the corresponding test method and test matrix will be designed, in which the sensors will be submitted to impact events placed in a specific substrate. We will try to clarify the behavior of piezoelectric sensors by exposing the substrate to different impact conditions, using diverse variables such as impact energy or impact speed among others.

Using the information provided by the testing results, and through scientific reasoning, statements and hypothesis will be made related to sensor's behavior, and we will discuss the viability of applying them as impact damage sensors.

Finally, and if applicable, new investigation lines will be purposed to continue the investigation with the intention of confirming or denying the already mentioned statements and hypothesis.

## Resum

En aquest treball, s'estudiarà el comportament de dispositius piezoelèctrics davant esdeveniments d'impacte, amb la finalitat d'utilitzar-los com a sensors per preveure el dany ocasionat en un substrat determinat per única causa de l'impacte.

Per fer-ho, es dissenyarà el pertinent circuit elèctric capaç de generar un senyal a partir de la resposta piezoelèctrica, i s'establirà un procediment de lectura d'aquest mitjançant un dispositiu, en aquest cas, un microcontrolador. A més es dissenyarà una configuració d'assaig i una matriu d'assajos, on sotmetent els sensors a impactes en un substrat determinat, es buscarà esclarir el comportament dels sensors envers diverses condicions d'impacte tenint en compte diferents variables com l'energia d'impacte o la velocitat d'impacte entre d'altres.

Amb la informació provinent dels resultats dels assajos, i mitjançant raonaments científics es faran afirmacions i hipòtesis sobre el comportament dels sensors i es raonarà la viabilitat d'aplicar-los com a sensors per a la previsió del dany en impacte.

Finalment i si escau, es proposaran noves vies per continuar la investigació amb la finalitat de confirmar o desmentir les afirmacions i hipòtesis mencionades en aquest treball.

## Declaració d'honor

Jo Ferran Urquia Sanz, declaro que el treball que s'exposa a continuació, i que pertany al meu Treball de Fi d'Estudis, es realitzat per mi en tota la seva integritat, i que ninguna part del mateix ha estat executat per altres persones sense donar-les crèdit i que totes les referències han estat citades amb claredat.

Assumeixo que la infracció d'aquesta declaració, es subjecta a les pertinents accions disciplinaries per part de la Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTECH.

Ferran Urquia Sanz

13/01/2022



## Índex

<b>ABSTRACT</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUM</b> .....	<b>I</b>
<b>DECLARACIÓ D'HONOR</b> .....	<b>II</b>
<b>ÍNDIX</b> .....	<b>III</b>
<b>ÍNDIX DE TAULES</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDIX DE FIGURES</b> .....	<b>VI</b>
<b>1. INTRODUCCIÓ</b> .....	<b>1</b>
1.1 OBJECTE.....	1
1.2 ABAST .....	2
1.3 REQUERIMENTS .....	3
1.4 JUSTIFICACIÓ .....	5
<b>2 ANTECEDENTS I/O REVISIÓ DE L'ESTAT DE LA QÜESTIÓ</b> .....	<b>6</b>
2.1 PIEZOELECTRICITAT .....	6
2.2 RESPOSTA PIEZOELÈCTRICA .....	7
2.3 DISPOSITIUS PIEZOELÈCTRICS COM A SENSORS .....	9
2.4 OBTENCIÓ DEL SENYAL .....	11
2.5 DINÀMICA D'UN IMPACTE .....	12
2.5.1 <i>Força d'impacte</i> .....	12
2.5.2 <i>Dinàmica de percussions</i> .....	13
2.6 NORMATIVES INTERNACIONALS.....	15
2.6.1 <i>Organització Internacional per a la Estandardització (ISO)</i> .....	15
2.6.2 <i>Estàndards Europeus (EN)</i> .....	15
2.6.3 <i>Societat Americana per Assajos i Materials (ASTM)</i> .....	15
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>16</b>
3.1 ETAPES DEL DISSENY.....	16
3.1.1 <i>Circuit amplificador de càrrega</i> .....	16
3.1.2 <i>Circuit d'acondicionament del senyal</i> .....	19
3.1.3 <i>Comunicació amb Arduino</i> .....	23
3.1.4 <i>Comunicació amb LabView</i> .....	29
3.2 PROCEDIMENT PER A L'ASSAIG .....	34
3.3 PLANNING D'ASSAJOS .....	36
3.4 METODOLOGIES INTERNACIONALS EXISTENTS .....	38
3.5 METODOLOGIA D'ASSAIG .....	42
3.5.1 <i>Recursos disponibles</i> .....	42
3.5.2 <i>Configuració d'assaig</i> .....	43
3.5.3 <i>Preparació de les mostres</i> .....	45
3.5.4 <i>Muntatge del sistema de lectura i adquisició</i> .....	47
3.5.5 <i>Muntatge del sistema de lectura de l'alçada de rebot</i> .....	49
3.5.6 <i>Comprovació d'equivalència entre targeta d'adquisició i Oscil·loscopi</i> .....	51
3.5.7 <i>Execució d'assaig</i> .....	53
3.6 OBTENCIÓ I POST-PROCESSAT DE DADES .....	54
<b>4 SÍNTESI DE RESULTATS</b> .....	<b>56</b>
4.1 SUMARI DE RESULTATS OBTINGUTS DE LA PART EXPERIMENTAL .....	57
4.2 EVOLUCIÓ DE LES VARIABLES OBTINGUDES DE L'IMPACTADOR PETIT .....	60
4.2.1 <i>Evolució dels voltatges pic amb l'augment de l'energia d'impacte</i> .....	61
4.2.2 <i>Evolució de l'energia del senyal amb l'augment de l'energia d'impacte</i> .....	63



4.2.3	<i>Evolució de l'alçada de rebot amb l'augment de l'energia d'impacte</i>	63
4.2.4	<i>Evolució de l'esquerda produïda amb l'augment de l'energia d'impacte</i>	65
4.3	AFFECTACIÓ DE LA VELOCITAT D'IMPACTE EN LA RESPOSTA PIEZOELÈCTRICA	66
4.4	UTILITZACIÓ DE LA MORFOLOGIA DEL SENYAL COM A FONT D'INFORMACIÓ	68
4.4.1	<i>Utilització de la morfologia del senyal per quantificar l'impacte produït</i>	69
4.4.2	<i>Utilització de la morfologia del senyal per quantificar l'esquerda generada</i>	71
4.5	AFFECTACIÓ DE LA UBICACIÓ ANTERIOR O POSTERIOR DEL PIEZOELÈCTRIC EN LA LECTURA DEL SENYAL	74
4.6	AFFECTACIÓ DE LA DISTÀNCIA DEL PIEZOELÈCTRIC AL PUNT DE IMPACTE EN LA LECTURA DEL SENYAL	77
4.7	AFFECTACIÓ D'UN IMPACTE DE GRAN ENERGIA EN LA LECTURA DEL SENYAL	79
<b>5</b>	<b>PRESSUPOST</b>	<b>83</b>
<b>6</b>	<b>ANÀLISI I VALORACIÓ DE LES IMPLICACIONS AMBIENTALS I SOCIALS</b>	<b>84</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONS</b>	<b>85</b>
<b>8</b>	<b>INVESTIGACIONS FUTURES</b>	<b>88</b>
<b>9</b>	<b>REFERÈNCIES</b>	<b>89</b>



## Índex de taules

<b>TAULA 1.</b> SELECCIÓ DE COMPONENTS AMPLIFICADOR DE CÀRREGA .....	17
<b>TAULA 2.</b> SELECCIÓ DE COMPONENTS AMPLIFICADOR SUMADOR INVERSOR .....	20
<b>TAULA 3.</b> SELECCIÓ DE COMPONENTS AMPLIFICADOR INVERSOR .....	21
<b>TAULA 4.</b> SELECCIÓ DE COMPONENTS SEGUIDOR DE TENSÍO .....	21
<b>TAULA 5.</b> PLANIFICACIÓ D'ASSAJOS.....	37
<b>TAULA 6.</b> SUMARI DE RESULTATS 1.....	57
<b>TAULA 7.</b> SUMARI DE RESULTATS 2.....	58
<b>TAULA 8.</b> SUMARI DE RESULTATS 3.....	59
<b>TAULA 9.</b> SUMARI DE RESULTATS IMPACTADOR PETIT .....	60
<b>TAULA 10.</b> ÈNERGIA DEL SENYAL EN FUNCÍO DE LA VELOCITAT D'IMPACTE. ....	66
<b>TAULA 11.</b> EVOLUCIÓ DE VARIABLES LLEGIBLES AMB DOBLE PIEZOELÈCTRIC.....	77



## Índex de figures

<b>FIGURA 1.</b> ESQUEMA EQUIVALENT D'UN SENSOR PIEZOELÈCTRIC .....	7
<b>FIGURA 2.</b> ESQUEMA EQUIVALENT SIMPLIFICAT DEL PIEZOELÈCTRIC I RESPOSTA EN FREQÜÈNCIA .....	9
<b>FIGURA 3.</b> ESQUEMA EQUIVALENT SIMPLIFICAT DEL SENSOR PIEZOELÈCTRIC CONNECTAT A L'EQUIP DE MESURA .....	9
<b>FIGURA 4.</b> MODIFICACIÓ DE LA RESPOSTA FREQÜENCIAL EN CÀRREGA .....	10
<b>FIGURA 5.</b> EQUIVALENTS ELÈCTRICS D'UN SENSOR PIEZOELÈCTRIC .....	11
<b>FIGURA 6.</b> DIAGRAMA DE BLOCS DE L'OBTENCIÓ DEL SENYAL .....	16
<b>FIGURA 7.</b> CIRCUIT AMPLIFICADOR DE CÀRREGA.....	17
<b>FIGURA 8.</b> CIRCUIT AMPLIFICADOR SUMADOR INVERSOR .....	20
<b>FIGURA 9.</b> CIRCUIT AMPLIFICADOR INVERSOR .....	20
<b>FIGURA 10.</b> CIRCUIT SEGUIDOR DE TENSÍO .....	21
<b>FIGURA 11.</b> ESQUEMA CIRCUIT CONDICIONADOR DE SENYAL .....	22
<b>FIGURA 12.</b> CIRCUIT CONDICIONADOR DE SENYAL .....	22
<b>FIGURA 13.</b> DIAGRAMA DE BLOCS ADC.....	24
<b>FIGURA 14.</b> DIAGRAMA DE BLOCS CODI ARDUINO .....	25
<b>FIGURA 15.</b> SKETCH ARDUINO PART 1 .....	26
<b>FIGURA 16.</b> SKETCH ARDUINO PART 2 .....	27
<b>FIGURA 17.</b> DIAGRAMA DE BLOCS LABVIEW .....	29
<b>FIGURA 18.</b> FRONT PANEL .....	30
<b>FIGURA 19.</b> BLOCK DIAGRAM .....	31
<b>FIGURA 20.</b> MORFOLOGIA SUBSTRAT ASTM D 7136.....	38
<b>FIGURA 21.</b> FIXACIÓ SUBSTRAT ASTM D 7136 .....	39
<b>FIGURA 22.</b> FIXACIÓ SUBSTRAT ASTM D 7136 .....	39
<b>FIGURA 23.</b> DANY SUBSTRAT ASTM D 7136 .....	40
<b>FIGURA 24.</b> DANY SUBSTRAT ASTM D 2444 .....	41
<b>FIGURA 25.</b> DANY SUBSTRAT ASTM D 2444 .....	41
<b>FIGURA 26.</b> DISPOSICIÓ VERTICAL .....	43
<b>FIGURA 27.</b> MARC D'IMPACTE .....	43
<b>FIGURA 28.</b> DIMENSIONS I PUNTS D'ANCORATGE MARC INFERIOR .....	44
<b>FIGURA 29.</b> ANIVELLAMENT VERTICAL.....	44
<b>FIGURA 30.</b> PLÀNOL SUBSTRAT .....	45
<b>FIGURA 31.</b> UBICACIÓ PIEZOELÈCTRIC I PUNT D'IMPACTE .....	45
<b>FIGURA 32.</b> PINS TL084.....	47
<b>FIGURA 33.</b> VISTA GENERAL DE LA CONFIGURACIÓ .....	48
<b>FIGURA 34.</b> PIEZOELÈCTRIC, AMPLIFICADOR DE CÀRREGA I ADQUIRIDOR .....	48
<b>FIGURA 35.</b> PAPER MIL·LIMETRAT UBICAT AL TUB .....	49
<b>FIGURA 36.</b> RESOLUCIÓ DEL PAPER MIL·LIMETRAT .....	49
<b>FIGURA 37.</b> SET-UP D'ASSAJOS .....	50
<b>FIGURA 38.</b> CONJUNT CONNECTAT PER COMPROVACIÓ .....	51
<b>FIGURA 39.</b> FONT D'ALIMENTACIÓ AMPLIFICADOR DE CÀRREGA.....	52
<b>FIGURA 40.</b> LECTURA OSCIL·LOSCOPI COMPROVACIÓ .....	52
<b>FIGURA 41.</b> LECTURA TARGETA D'ADQUISICIÓ COMPROVACIÓ.....	52
<b>FIGURA 42.</b> ESQUERDA SIMPLIFICADA .....	55
<b>FIGURA 43.</b> CONTROL DE LES VARIABLES DEL PROCÉS.....	61
<b>FIGURA 44.</b> EVOLUCIÓ DEL VOLTATGE PIC POSITIU .....	62
<b>FIGURA 45.</b> EVOLUCIÓ DEL VOLTATGE PIC NEGATIU .....	62
<b>FIGURA 46.</b> EVOLUCIÓ DE L'ENERGIA DEL SENYAL AMB VALORS INDIVIDUALS.....	63
<b>FIGURA 47.</b> EVOLUCIÓ DE L'ENERGIA DEL SENYAL I ALÇADA DE REBOT CORRESPONENT AMB VALORS MITJANS .....	64
<b>FIGURA 48.</b> EVOLUCIÓ DE L'ENERGIA DEL SENYAL I ESQUERDA CORRESPONENT AMB VALORS MITJANS .....	65



<b>FIGURA 49.</b> AFECTACIÓ DE LA VELOCITAT D'IMPACTE AMB MESURES INDIVIDUALS .....	66
<b>FIGURA 50.</b> AFECTACIÓ DE LA VELOCITAT D'IMPACTE SENSE VALORS ALLUNYATS .....	67
<b>FIGURA 51.</b> COMPARACIÓ MORFOLÒGICA DE SENYALS .....	70
<b>FIGURA 52.</b> COMPARACIÓ SENYALS SENSE ESQUERDA .....	72
<b>FIGURA 53.</b> COMPARACIÓ SENYALS AMB ESQUERDA .....	73
<b>FIGURA 54.</b> EFECTE PIEZOELÈCTRIC DIRECTE .....	74
<b>FIGURA 55.</b> DISTRIBUCIÓ DE CÀRREGUES A FLEXIÓ .....	74
<b>FIGURA 56.</b> COMPARACIÓ DE UBICACIÓ DEL PIEZOELÈCTRIC ANTERIOR I POSTERIOR .....	76
<b>FIGURA 57.</b> DISPOSICIÓ DOBLE PIEZOELÈCTRIC .....	77
<b>FIGURA 58.</b> COMPARACIÓ DE L'AFECTACIÓ DE LA DISTÀNCIA DE L'IMPACTE AL PIEZOELÈCTRIC EN LA LECTURA.....	78
<b>FIGURA 59.</b> COMPARACIÓ DE SENYALS EN ENERGIA D'IMPACTE DESPROPORCIONAT .....	80
<b>FIGURA 60.</b> EVOLUCIÓ DE TOTS ELS VOLTATGES POSITIUS .....	81
<b>FIGURA 61.</b> EVOLUCIÓ DE TOTS ELS VOLTATGES NEGATIUS .....	82
<b>FIGURA 62.</b> EVOLUCIÓ DE TOTES LES ENERGIES DEL SENYAL .....	82

# 1. Introducció

## 1.1 Objecte

L'objecte d'aquest treball final de grau, es estudiar la viabilitat d'utilitzar materials piezoelèctrics, com a sensors per a la detecció d'impacte en estructures, i de manera simultània avaluar el dany ocasionat per aquest envers l'estructura.

Amb la finalitat de conèixer l'estat estructural d'un element, quan la seva inspecció no es una tasca senzilla, es vol comprovar si els materials piezoelèctrics, son capaços de generar sortides elèctriques que mostrin una relació proporcional a l'impacte al qual l'estructura ha estat sotmesa, així com amb l'estat de dany generat.

Es pretén arribar a una solució capaç de determinar el dany generat en un substrat a causa d'aplicar un impacte conegut i llegir una variable elèctrica que quantifiqui el dany ocasionat en el substrat.

Existeixen estudis on aquests materials, son utilitzats com a sensors d'impacte i on s'entreveu una relació lineal o pròxima a la linealitat entre l'impacte rebut i la seva resposta resultant. Aquesta investigació, proposa com a valor afegit qualificar de forma qualitativa i quantitativa el dany ocasionat en el substrat i relacionar-lo amb la resposta elèctrica obtinguda, i finalment valorar si es viable o no la seva aplicabilitat.

Per assolit el mencionat objectiu, es plantegen els següents objectius parcials:

- Dissenyar, executar i analitzar un procediment electrònic per obtenir de forma correcta el senyal generat per el dispositiu piezoelèctric. A més s'establirà un procediment paral·lel per a la lectura d'aquest en l'aplicació futura.
- Dissenyar, executar, analitzar i interpretar una sèrie d'assajos mecànics d'impacte amb la finalitat de clarificar el comportament dels dispositius piezoelèctric envers aquests.
- Quantificar tots els paràmetres mesurables dels assajos mecànics incloent alçada de rebot i esquerda del substrat.
- Determinar la influència de diversos paràmetres d'impacte com la velocitat d'impacte o l'energia d'impacte en la senyal generada pel piezoelèctric i més concretament en variables llegibles d'aquest senyal com són el voltatge i l'energia del senyal.
- Raonar, mitjançant una visió general dels objectius anteriors, si els dispositius son aplicables per al propòsit exposat.
- Proposar noves vies d'investigació.

El compliment de tots els objectius parcials comportarà el compliment de l'objectiu global del projecte.

## 1.2 Abast

A continuació es detallen tots els punts que es consideren l'abast que avarca aquest projecte.

- **Estudiar el funcionament dels materials piezoelèctrics.** S'analitzarà detingudament el fenomen de la piezoelectricitat aplicat a la mecànica i la electrònica. Així com el seu funcionament, les seves propietats i els seus avantatges i inconvenients, amb la finalitat d'adaptar el material i les seves propietats a l'aplicació desitjada.
- **Dissenyar una etapa de condicionament de senyal.** En base a les característiques obtingudes de l'estudi en profunditat, es dissenyarà una etapa d'acondicionament del senyal que constarà d'una amplificació de càrrega així com una possible etapa d'adaptació del rang de voltatge mitjançant amplificadors, amb la finalitat que les respostes obtingudes mostrin una relació amb la variable mecànica d'entrada al sistema.
- **Dissenyar i executar una metodologia d'assaig.** S'establirà una configuració d'assaig, on es realitzaran impactes per caiguda de pes lliure sobre un substrat determinat. Aquesta metodologia ha de permetre impactar en un rang d'energies i velocitats per poder avaluar tots els estats del substrat.
- **Dissenyar i executar un planning d'assajos representatiu.** S'establirà una matriu d'assajos on es tindran en compte paràmetres com l'energia d'impacte, la velocitat d'impacte, i temps de contacte entre d'altres amb la finalitat que les dades obtingudes ajudin a relacionar la quantitat de dany amb la resposta paramètrica obtinguda. A més es tindran en compte paràmetres característics d'un assaig com la variabilitat, la repetibilitat o les desviacions
- **Relacionar la resposta obtinguda per els piezoelèctrics amb l'impacte generat i el dany ocasionat en el substrat estudiat.** Es realitzarà un estudi en profunditat dels resultats obtinguts pels assajos, on es valorarà si existeix relació impacte - resposta així com una relació impacte - estat estructural, i si escau, de quin tipus es la relació existent.
- **Valorar i avaluar de manera objectiva la viabilitat de l'aplicació del sistema en general.** Es reflexionarà tenint en compte els resultats i les seves conclusions així com altres paràmetres (instal·lació, cost, etc) si la solució proposada es aplicable o no.

Tot i que l'aplicació final del treball es a gran escala, com es detallarà a la secció 4, en aquest treball s'utilitzaran un assaig modelat en petites dimensions, i es proposarà un pla d'escalat del disseny per a una futura aplicació si escau. No es faran assajos a gran escala.

### 1.3 Requeriments

En aquesta secció es detallen tots els requeriments que regeixen aquest treball.

- Programari a utilitzar per a la realització del treball:
  - **Microsoft office:** Per descomptat s'utilitzarà Microsoft Word per al desenvolupament de les entregues, però Microsoft Excel tindrà un paper rellevant en termes d'adquisició i processat de dades referents als assajos.
  - **LabView:** S'utilitzarà per al projecte electrònic, on un programa ens permetrà capturar el senyal transitori i d'alta freqüència que presentarà el material piezoelèctric, per tal d'avaluar la resposta i ajustar el circuit en base a això.
  - **CATMan Easy:** S'utilitzarà per a l'adquisició de dades dels assaigs experimentals d'impacte.
  - **Integrated Development Environment (IDE):** És l'entorn de programació d'Arduino i s'utilitzarà per controlar el procediment seguit per el microcontrolador utilitzat.
- Hardware disponible:
  - Targeta d'adquisició de dades HBM Quantum MX840A
  - Càmera d'alta velocitat Mikrotron MotionBlitz Cube4
  - Oscil·loscopi Tektronix TDS1002
  - Placa de proves Protoboard
  - Amplificador Operacional TL084
  - Components elèctrics del laboratori de projectes d'enginyeria electrònica
  - Multímetre Promax PD-181
  - Font de tensió FAC-662B
  - Microcontrolador tipus Arduino Due
  - Ordinador portàtil
- Els materials piezoelèctrics utilitzats per al projecte son RS Piezo Electric Transducer 15Vpp 724-3162, proporcionats per el Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria.
- Normativa i regulacions a seguir:
  - ASTM D 7136 i ASTM D 2444: Després d'un procés de consulta i contrast de material disponible, s'ha establert que la metodologia d'assaig estarà basada en dos estàndards internacionals: "*Compression after impact test*" (d'on només s'ha tingut en compte la part d'impacte) i "*Drop weight impact test*". Lògicament, s'adaptarà les normatives així com el seu procediment i material necessari al material disponible o proporcionable per el laboratori de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria de l'ESEIAAT, i el grups de recerca *CATMech* i d'electrònica.
  - En tot moment es seguiran les instruccions del **Real Decret 773/1997**, encarregat de regular l'ús i els requeriments d'Equips de Protecció Individual, ja que els assajos i gran part del desenvolupament del projecte es duren a terme en ambients potencialment perillosos com el laboratori de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria o el laboratori de Projectes d'Enginyeria Electrònica.
- Com s'esmenta en el punt anterior, el treball consta d'un alt contingut pràctic que es durà a terme als laboratoris de la universitat i on, a banda del procediment de seguretat, la responsabilitat i la bona praxis seran del tot necessaris per al correcte desenvolupament del projecte.
- Els resultats obtinguts en la part electrònica, comprendran valors utilitzables per els posteriors sistemes d'adquisició i que en cap cas podran malmetre la integritat de l'equipament ni, per descomptat, de les persones. Això dependrà de l'etapa de condicionament del senyal i per tant, serà un aspecte a tenir en compte en l'avaluació final i les conclusions.
- Els resultats obtinguts per la part mecànica, hauran d'avaluar tot el ventall d'estats estructurals del substrat, des d'un impacte que no causa dany fins a un impacte que causa la ruptura directa



del substrat. En cas contrari els resultats no seran considerats acceptables en no avaluar-se totes les fases del projecte.

- Les conclusions de cada part així com la conclusió global i la valoració, hauran de donar una resposta clara i unilateral sobre si es aplicable o no la metodologia seguida durant el projecte, per resoldre el problema plantejat a l'inici.

## 1.4 Justificació

El projecte proposat, es troba emmarcat dins d'un projecte més gran que pertany al grup de recerca CATMech de l'Escola Superior d'Enginyeria Industrial i Aeronàutica de Terrassa. En aquest projecte futur, es pretén caracteritzar l'avaluació del dany també per impacte i mitjançant materials piezoelèctrics, però en estructures de grans dimensions i d'un material concret com és el formigó.

Concretament, en passos elevats d'autopistes, les bigues que formen els ponts, es podrien recobrir amb materials sintètics com la poliurea, que dificultarien les tasques d'inspeccionat visual de l'estructura. Precisament estructures com aquestes, son sovint sotmeses a impactes generats per camions, vehicles de grans dimensions o vehicles de transport especial entre d'altres. Es per això que es planteja la possibilitat de que els materials piezoelèctrics, siguin capaços de quantificar quin ha estat l'impacte rebut per la biga, i per davant de tot, quin es l'estat estructural d'aquesta després de l'esdeveniment. Tot això amb la finalitat de poder executar una acció preventiva per evitar riscos humans i materials com la caiguda d'un pas elevat. Aquestes accions poden ser des de tallar el pas dels vehicles, fins procedir a la reparació integral d'una biga de formigó.

Com s'ha explicat amb anterioritat, el projecte gran, ha d'estar precedit per una fase d'investigació que tracti de determinar una solució funcional per a un projecte similar i representatiu a petita escala. L'execució del projecte futur, dependrà dels resultats obtinguts en aquesta primera investigació.

Aquesta investigació inicial doncs, correspon al projecte final de grau que s'exposa en aquest document.

## 2 Antecedents i/o revisió de l'estat de la qüestió

A continuació s'exposa un sumari dels coneixements existents actuals envers els temes principals que tractarà aquest treball.

### 2.1 Piezoelectricitat

L'efecte piezoelèctric es descobert al 1880 per Jacques i Pierre Curie, qui observen en els cristalls de quars, un fenomen que produeix una determinada càrrega elèctrica quan el cristall es sotmès a alguna deformació.

A més dels cristalls de quars, determinades substàncies naturals són capaces de mostrar un comportament similar, com la turmalina o la sal de Rochelle, però amb una càrrega elèctrica molt inferior.

Degut a això, es va començar a treballar en materials que mostressin el mateix comportament que aquests cristalls, però amb una millor resposta en termes de senyal. D'aquí se'n van obtenir el titaniat de bori, i el titaniat-circonat de plom (PZT).

Posteriorment, al voltant dels anys 60, es va descobrir l'efecte piezoelèctric en altres materials orgànics, com ossos i tendons de balenes. A l'any 1969 també s'obté el comportament piezoelèctric en polímers com el PVDF que posteriorment ha donat lloc a sensors piezoelèctrics peculiars i que han estat usats en la implementació de sistemes sonar.

En l'actualitat i després procediment de polarització de determinats materials es disposa d'un material piezoelèctric amb dos elèctrodes capaç de generar una càrrega elèctrica sobre aquests, quan s'hi aplica una força i de manera inversa una deformació en el material quan s'actua elèctricament sobre ell, ja que el procediment es **totalment reversible**.



## 2.2 Resposta piezoelèctrica

Quan sobre un material piezoelèctric hi actua una força, la suma de comportaments inercial, viscos i elàstic genera l'aparició de forces que contraresten la força  $F$ , i se'n deriva la equació 1:

$$F = m * \frac{d^2x}{dt^2} + r * \frac{dx}{dt} + sx \quad [10] \quad (1)$$

On  $m$  es la massa del cristall, el paràmetre  $r$  fa referència al coeficient de fricció,  $s$  és el coeficient elàstic, i el paràmetre  $x$  que acompanya a tots els anteriors, refereix a la deformació.

L'efecte del piezoelèctric genera una càrrega elèctrica directament proporcional a la deformació produïda i inversament proporcional a l'espessor del cristall.

$$q = \frac{k' * x}{e} \quad (2)$$

Essent  $e$ , el paràmetre relacionat amb l'espessor.

Si els terminals del dispositiu es tanquen, pot aparèixer un corrent que es proporcional a la velocitat de variació de la deformació, i que per tant doncs existint una força i una deformació constant, la corrent generada es nul·la.

$$I = K * \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

D'on  $I$ , n'és el corrent generat i  $K$  la proporció existent amb la derivada de la posició, es a dir, la velocitat. Considerant la primera i tercera equació s'obté l'equació 4:

$$F = \frac{m}{K} * \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{r}{K} * \frac{dx}{dt} + \frac{s}{K} * x \quad (4)$$

Aquesta equació té la mateixa forma que un circuit RLC i d'on per analogia s'obté el circuit elèctric que es mostra a la figura 1, que representa el circuit elèctric equivalent a un piezoelèctric.

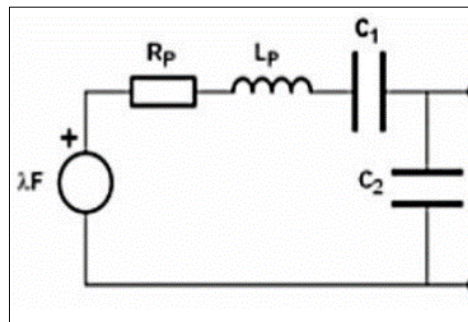


Figura 1. Esquema equivalent d'un sensor piezoelèctric [3]

L'equivalent en sèrie dels condensadors  $C_1$  i  $C_2$ , forma la capacitat pròpia del piezoelèctric, i d'altra banda, el seu equivalent en paral·lel, representa la capacitat que es veu des de l'exterior de l'exterior del piezoelèctric.

En arribar a aquest punt es generen dos inconvenients per a cada cas de força aplicada:

1. Per a casos de forces estàtiques, en mesurar una tensió sobre un sistema que disposa d'una impedància desconeguda "z", el condensador que compona el circuit piezoelèctric, provocarà que la tensió de sortida tendeixi a zero a mesura que aquest es descarrega, per tant impossibilita observar lectures de tensió per a càrregues estàtiques.

2. Per a casos amb càrregues dinàmiques com les vibracions, es generarà una tensió de sortida de forma permanent, però en aquest cas s'han de tenir en compte el tipus de càrrega ja que la presència de components reactives modificarà el comportament del sistema. (freqüència de ressonància i guany).

Analizant el comportament del sistema connectat amb una càrrega d'impedància infinita, i tenint en compte la simplificació dels condensadors s'arriba a una expressió on es presenta la freqüència de ressonància com a :

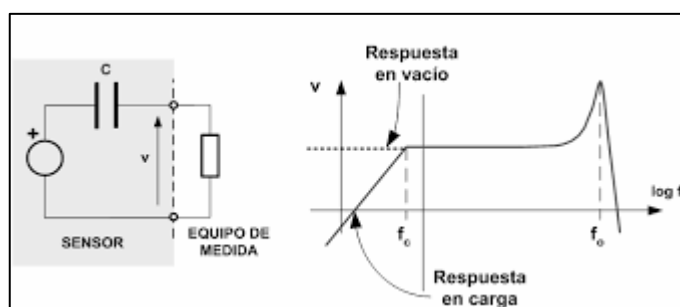
$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{m/s}} \quad (5)$$

Coneixent l'existència d'aquesta freqüència de ressonància, tot i que no ha estat possible determinar-la en aquesta investigació, es suposa que hem treballat sempre dins de la zona de treball que s'exposa a la secció 2.3.

### 2.3 Dispositius piezoelèctrics com a sensors

Els efectes de l'inductiu i la resistència es consideren menyspreables en treballar en la zona de resposta plana de la corba característica en funció de la freqüència. Per tant el sistema queda reduït a una font de tensió amb un condensador equivalent al paral·lel dels condensadors  $C_1$  i  $C_2$ .

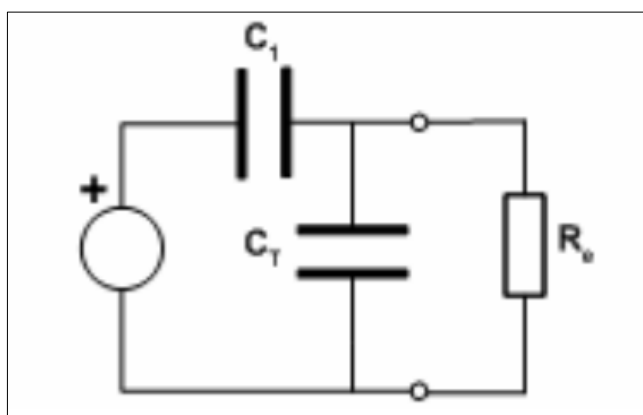
Lògicament, qualsevol sistema acoblat a la sortida del dispositiu, no posseeix impedància infinita i carregarà el circuit modificant el sistema i la seva corba de resposta, introduint un pol a baixes freqüències i una freqüència de tall inferior com es mostra a la figura 2. La freqüència de tall inferior pot reduir-se de manera considerable, però mai fins a zero, per tant el sistema no podrà llegir en règim continu i per tant es limita a mesures on la força aplicada varia.



**Figura 2.** Esquema equivalent simplificat del piezoelèctric i resposta en freqüència [10]

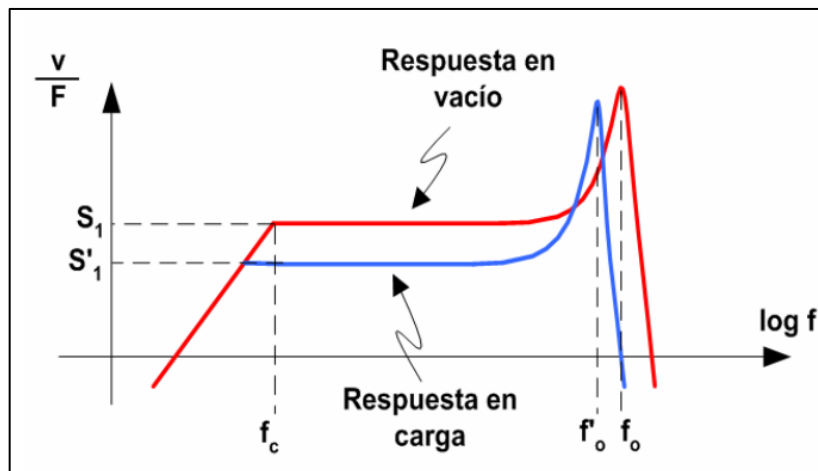
Per a mesures dinàmiques s'ha de treballar a la zona compresa entre la freqüència de tall i la freqüència de ressonància, sempre deixant uns marges envers ambdues freqüències ja que la freqüència de tall presenta un guany de -3dB i hi haurà un desfasament excitació-senyal, i la freqüència de ressonància introduiria guanys addicionals i desfasaments importants.

D'altra banda, la mesura del comportament del piezoelèctric pot portar més complicacions. La introducció del cablejat comporta l'aparició d'un sistema RLC, i l'equip de mesura acostuma a introduir una  $R_e$  i un  $C_e$  en paral·lel. Es cert que les  $R_c$  i  $L_c$  del cablejat es deprecien ja que son baixes en relació a  $R_e$  i  $L$  del sensor, aleshores el cablejat i l'equip de mesura es simplifiquen a dos condensadors  $C_c$  i  $C_e$  i una resistència  $R_e$ , tots tres en paral·lel. Finalment doncs el circuit equivalent es representaria com una font de tensió amb un condensador en sèrie propi del piezoelèctric i un condensador equivalent ( $C_c + C_e + C_2$ ) dispostat en paral·lel amb una resistència  $R_e$  pròpia de l'equip de mesura com s'observa a la figura 3.



**Figura 3.** Esquema equivalent simplificat del sensor piezoelèctric connectat a l'equip de mesura [10]

Aquest canvi en el sistema representatiu, implicarà un canvi en la corba de resposta, disminuint la freqüència de ressonància i desplaçant cap a baix la zona plana, es a dir, perdent sensibilitat, com s'observa a la figura 4.



**Figura 4.** Modificació de la resposta freqüencial en càrrega [10]

Per a un sistema de mesura conegut, el valor de sensibilitat en la zona plana es caracteritza com:

$$Sf = \frac{k}{s} * \frac{C_P}{C_T} \quad (6)$$

Essent  $Sf$  la sensibilitat del sistema,  $C_P$  el valor de la capacitat piezoelèctrica i  $C_T$  la capacitat del condensador equivalent anteriorment mencionat que correspon al paral·lel de  $C_c + C_e + C_2$ .

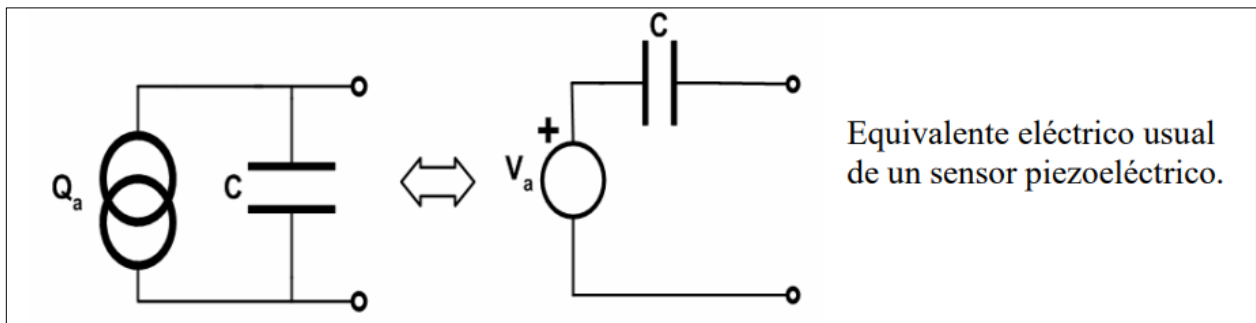
Degut a l'afectació del circuit de mesura sobre la sensibilitat, es treballarà sempre amb el mateix circuit d'acoblament i amb la mateixa llargada de fil del sensor piezoelèctric al circuit d'acondicionament de senyal.

## 2.4 Obtenció del senyal

A l'hora de ser utilitzats com a sensors, existeixen dos tipus habituals en el mercat.

- Els sensors piezoelèctrics pre-amplificats, produeixen un valor de tensió proporcional a l'excitació generada a l'entrada. El seu comportament resulta independent del connexionat exterior, ja que resistències i càrregues d'entrada a l'amplificador es mantenen sempre constants. El fabricant proporciona sensibilitat en tensió, freqüències d'ús i impedància de sortida.
- Els sensors piezoelèctrics sense amplificació, on totes les precaucions mencionades anteriorment son imprescindibles.

En molts casos, els fabricants proporcionen dades de capacitat de sortida i sensibilitat, fent ús d'un altre equivalent elèctric amb una font de corrent i un condensador on el voltatge en els seus borns representa la variable de sortida. Els dos equivalents elèctrics existents es mostren a la figura 5.



**Figura 5.** *Equivalents elèctrics d'un sensor piezoelèctric [9]*

Per a la realització d'aquest treball, utilitzarem un dispositiu piezoelèctric sense amplificar, per tant s'haurà de dissenyar el corresponent circuit d'acondicionament del senyal.

## 2.5 Dinàmica d'un impacte

Per definició un impacte es el xoc o la col·lisió entre dos objectes. Un esdeveniment d'impacte doncs, pot estar produït per la col·lisió o xoc de dos sòlids rígids, dos sòlids deformables, o un sòlid rígid i un sòlid deformable.

Si pensem doncs en la física que això genera, tant el xoc com la col·lisió son concebuts com una acceleració o desacceleració sobtada, causada per un impacte.

Per distingir correctament entre xoc i col·lisió de dos sòlids, cal conèixer que es diu xoc a l'impacte d'un sòlid en moviment envers un altre que es troba en estat de repòs, i per contra la col·lisió es l'impacte entre dos sòlids que es troben en moviment.

### 2.5.1 Força d'impacte

En l'anàlisi d'un impacte per caiguda lliure, coneixem que el balanç d'energies menystenint el fregament amb l'aire, diu que tota l'energia que te el cos quan el deixem anar, en forma d'energia potencial, es convertirà en el moment de l'impacte en energia cinètica, essent les dues fórmules corresponents les que s'exposen a les equacions 7 i 8.

$$\text{Energia potencial gravitatòria [J]} = m * g * h \quad (7)$$

On m es la massa de l'objecte mesurada en kg, g la gravetat de la terra en  $m/s^2$  i h l'alçada des de la que es deixa caure l'objecte, en unitats de metres.

$$\text{Energia cinètica [J]} = \frac{1}{2} m * v^2 \quad (8)$$

On m torna a ser la massa de l'objecte en kg, i v la velocitat d'aquest mesurada en m/s.

D'altra banda, quan es produeix una impacte, el treball realitzat per la força de l'impacte que rellenteix un objecte en moviment al llarg d'una distancia al deformar la zona de deformació, es pot expressar com:

$$W [J] = F_{promig} * s \quad (9)$$

On F es la força d'impacte mitjana durant la deformació en unitats de Newtons i s la distància de deformació, mesurada en metres.

En un impacte on l'objecte (impactador) no es deforma, l'energia dinàmica de la caiguda es converteix en treball d'impacte i per tant s'obtenen les equacions 10 i 11.

$$F_{promig} * s = m * g * h \quad (10)$$

En aquest cas, la força d'impacte pot expressar-se doncs com:

$$F_{promig} = m * g * h/s \quad (11)$$

*Per a l'execució d'aquest treball cal tenir en compte la dificultat de mesurar la distancia de deformació existent en el substrat, ja que requereix de molta precisió. Això impossibilitarà conèixer amb exactitud quina es la força d'impacte aplicada i caldrà buscar solucions alternatives com treballar amb energies i velocitats d'impacte en comptes d'utilitzar el paràmetre de la força.*

### 2.5.2 Dinàmica de percussions

En l'execució d'un impacte, hi actua una força d'alta intensitat, entre dos sòlids durant un període de temps molt curt. L'efecte d'aquest impacte es un canvi en les velocitats dels sòlids acompanyat sempre per una pèrdua d'energia en forma de calor o so i depenent del tipus de sòlids que impactin deformacions, permanents o no.

En el cas d'aquest treball, en considerar-se l'impactador un sòlid rígid o no deformable, i el substrat a impactar, un sòlid deformable, si existiran deformacions.

A aquestes forces d'alta intensitat que actuen entre els sòlids, se les anomena forces impulsives o percussionals. S'anomena **percussió** a l'impuls produït per una d'aquestes forces integrades durant el temps d'actuació, generant la expressió 12:

$$P = \int_{t_1}^{t_2} F * dt \approx F * \Delta t \quad [N * s] \quad (12)$$

On P es precisament la percussió, F la força impulsiva o percussional en unitats de Newtons i dt o  $\Delta t$ , el període de temps durant el qual actua aquesta força impulsiva, mesurat en segons.

Qualsevol situació en la qual es produeix un canvi bruscat en les velocitats sense modificar-se la posició del sòlid, es pot considerar una percussió.

La segona llei de Newton, es aplicable a les percussions, i diu que la suma de percussions es igual al canvi de quantitat de moviment que es produeix en una mateixa posició, immediatament abans i immediatament després de la percussió, segons es mostra a l'equació 13:

$$\sum P = m(V_f - V_i) \quad (13)$$

On P torna a referir a les percussions, m a la massa de l'objecte que impacta en unitats de kg, i les velocitats tant inicial com final en unitats de m/s.

Existeixen dos tipus de impactes en funció de el posicionament dels centres de masses dels cossos respecte la direcció d'impacte:

- Impactes centrals: Els centres de gravetat dels dos sòlids, es troben en la línia direccional de l'impacte.
- Impactes excèntrics: Algun dels dos sòlids, te el centres de masses fora de la línia de direcció de l'impacte.

**Per a l'execució d'aquest treball es tractarà l'impacte central ja que tant substrat com impactador tenen els seus centres de masses ubicats sobre la línia d'impacte.**

Si les velocitats de ambdós cossos es troben també sobre la línia d'impacte, es tracta d'un impacte central directe. Per contra, si un dels sòlids te la seva velocitat no dirigida sobre la d'impacte, es tractarà d'un impacte central oblic.

Considerant el sistema compost per impactador i substrat i tenint en compte que tan sols es produeixen forces impulsives normals en el contacte entre punts, la quantitat de moviment immediatament abans i immediatament després de la col·lisió serà l'exposada a l'equació 13:

$$m_A * V_{Ai} + m_B * V_{Bi} = m_A * V_{Af} + m_B * V_{Bf} \quad (13)$$

On el subíndex A i B refereixen a les masses i velocitats dels objectes A i B respectivament, igualment, f e i refereixen als instants final i inicial respectivament. Totes les unitats en kg i m/s.

Sobre la fase de deformació, existeixen dos instants de temps que es defineixen com  $t_i$ , instant en el que s'inicia la col·lisió i on no existeix deformació, i  $t_m$  que es considera el punt de deformació

màxima.

Aplicant el teorema de l'impuls sobre un dels sòlids s'obté l'expressió 14:

$$\int_{t_i}^{t_m} F_{def} * dt = m_A * V_m - m_A * V_{Ai} \quad (13)$$

Essent  $V_m$ , la velocitat del sòlid A en l'instant de màxima deformació i  $F_{def}$  la força mitjana de deformació.

Posteriorment a la deformació, apareix la fase de restitució, on els sòlids recuperen la seva deformació (a menys que existeixi una deformació permanent d'algun dels sòlids). En aquest cas, aplicant també el teorema de l'impuls obtenim:

$$\int_{t_m}^{t_f} F_{res} * dt = m_A * V_{Af} - m_A * V_m \quad (14)$$

Essent  $F_{res}$  la força mitjana de restitució i fent el subíndex f referència a l'instant final.

Coneixent la relació entre la suma dels impulsos i la quantitat de moviment per a cada fase, podem aconseguir una relació entre l'impuls de restitució i l'impuls de deformació. Aquesta relació existent s'anomena **coeficient de restitució**, i per caracteritzar-lo s'utilitza la lletra e i l'expressió 15.

$$e = \frac{\int_{t_m}^{t_f} F_{res} * dt}{\int_{t_i}^{t_m} F_{def} * dt} = \frac{V_{Af} - V_m}{V_m - V_{Ai}} \quad (15)$$

Aquesta relació es aplicable al segon sòlid també, anomenat sòlid B. I per tant eliminant  $V_m$ :

$$e = - \frac{V_{Bf} - V_{Af}}{V_{Bi} - V_{Ai}} \quad (16)$$

Aquest coeficient es útil per indicar-nos el tipus de col·lisió que ha ocorregut.

- Si  $e=0$ , es tracta d'una col·lisió plàstica, a i b acaben adherits.
- $0 < e < 1$ , col·lisió inelàstica
- $e=1$ , es tracta d'una col·lisió elàstica

Una col·lisió elàstica, es l'únic cas de col·lisió, on conserva l'energia cinètica del sistema. A la pràctica aquest tipus de col·lisió no es assolible ja que la pèrdua d'energia generarà sempre un decrement en les velocitats.

Aplicable a aquest treball, observarem casos de xoc entre un sòlid rígid i un de deformable, on existiran xocs inelàstics i xocs plàstiques.

Com s'esmenta amb anterioritat, per a aquest treball, es tractarà l'esdeveniment de xoc i no de col·lisió ja que el substrat b es troba en repòs tant abans com després de l'impacte. Així doncs l'equació característica es mostra a l'expressió 16:

$$e = - \frac{V_{Af}}{V_{Ai}} \quad (16)$$



## 2.6 Normatives Internacionals

Per definició, una norma es una especificació tècnica adoptada per un organisme de normalització reconegut segons el que estableix el Reglament (UE) N°1025/2012 sobre normalització Europea.

En l'indústria, tots els procediments, com l'execució de qualsevol assaig es troben regulats mitjançant normatives internacionals propietat de organismes molt diversos com ASTM, ISO, EN, etc.

En molts casos inclús, un mateix tipus d'assaig pot presentar regulacions diferents referents a diverses entitats, la qual cosa provoca que es considerin assajos diferents o si mes no, no comparables.

A continuació s'exposen alguns dels organismes de normalització internacionals mes reconeguts.

### 2.6.1 Organització Internacional per a la Estandardització (ISO)

La Organització Internacional per l'Estandardització (*International Organization for Standardization* o *ISO*), es una entitat internacional reguladora de normatives composta de representants de diverses organitzacions nacionals, incloent-hi més de 165 països de tot el món.

Els membres de l'organització es reuneixen de manera anual en una Assemblea General on es fixen els objectius de l'entitat.

Internament es troba dividida en 250 comitès tècnics encarregats de crear els estàndards ISO.

### 2.6.2 Estàndards Europeus (EN)

Els estàndards Europeus (EN, "*European Norm*"), són normes tècniques que es torben sota la regulació de la Unió Europea, i que son creades i mantingudes pel Comitè Europeu de l'Estandardització (CEN), el Comitè Europeu de Normalització Electrotècnica (CENELEC) i l'institut Europeu de Normes de Telecomunicacions (ETSI).

En l'actualitat, es troben dividits en categories ICS, que es divideixen en funció de la finalitat de la normativa, per exemple: 1- Terminologia i documentació, 11- Salut i tecnologia, 19- Assajos, etc.

La secció rellevant principal per aquest treball, es la número 19 i es torba dividida en:

- 19.020: Condicions d'assaig i procediments en general.
- 19.040: Assajos ambientals
- 19.060: Assajos mecànics
- 19.080: Assajos elèctrics i electrònics.
- 19.100: Assajos no destructius.
- 19.120: Anàlisi de tamany de partícules.

A les seccions 19.020, 19.060 i 19.080 es poden trobar documents rellevants reguladors de característiques que poden ser aplicables a l'ús d'aquest treball.

### 2.6.3 Societat Americana per Assajos i Materials (ASTM)

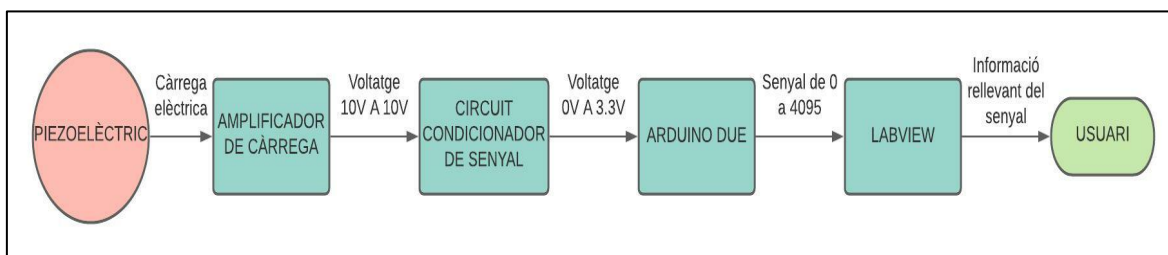
La societat americana per assajos i materials (*American Society for Testing and Materials* o *ASTM International*), es una de les organitzacions internacionals de desenvolupament de normes mes grans del mon, i reuneix productors, usuaris, consumidors de tot el món per crear normatives de consens voluntàries. A dia d'avui n'existeixen mes de 12.000.

El procés de creació de normes ASTM es obert, el que permet que tant individus com governs participin directament i com a iguals en una decisió consensuada.

Aquestes normes son utilitzades mundialment i abasten àrees tals com metalls, pintures, plàstics, tèxtils, petroli, construcció, energia, medi ambient, productes per a consumidors, dispositius i serveis mèdics i productes electrònics.

### 3 Metodologia

En aquest apartat, es detallen tots els procediments seguits per arribar a la obtenció del resultat desitjat. Com s'exposa a l'apartat anterior, la primera fase del projecte es dissenyar un circuit elèctric capaç de convertir la càrrega elèctrica generada pel piezoelèctric en tensió. Posteriorment tractarem aquesta tensió per poder-la introduir al microcontrolador Arduino, d'on extraurem el senyal que ens interessa, i finalment mitjançant LabView, extraurem la informació rellevant per ser visualitzada a través d'un ordinador. A la figura 6 s'exposa un diagrama de flux de tot el procés.



**Figura 6.** Diagrama de blocs de l'obtenció del senyal

En aquesta secció també es detallarà el procediment seguit a l'hora de realitzar els assajos corresponents a la fase experimental del projecte així com la seva justificació.

També s'inclourà el procediment seguit per obtenir els resultats dels assajos, doncs no s'utilitza el procediment final exposat a la figura 6, ja que en durant la fase d'assaig aquest procediment encara no estava desenvolupat, i per tant l'extracció de dades ha seguit una altra metodologia.

#### 3.1 Etapes del disseny

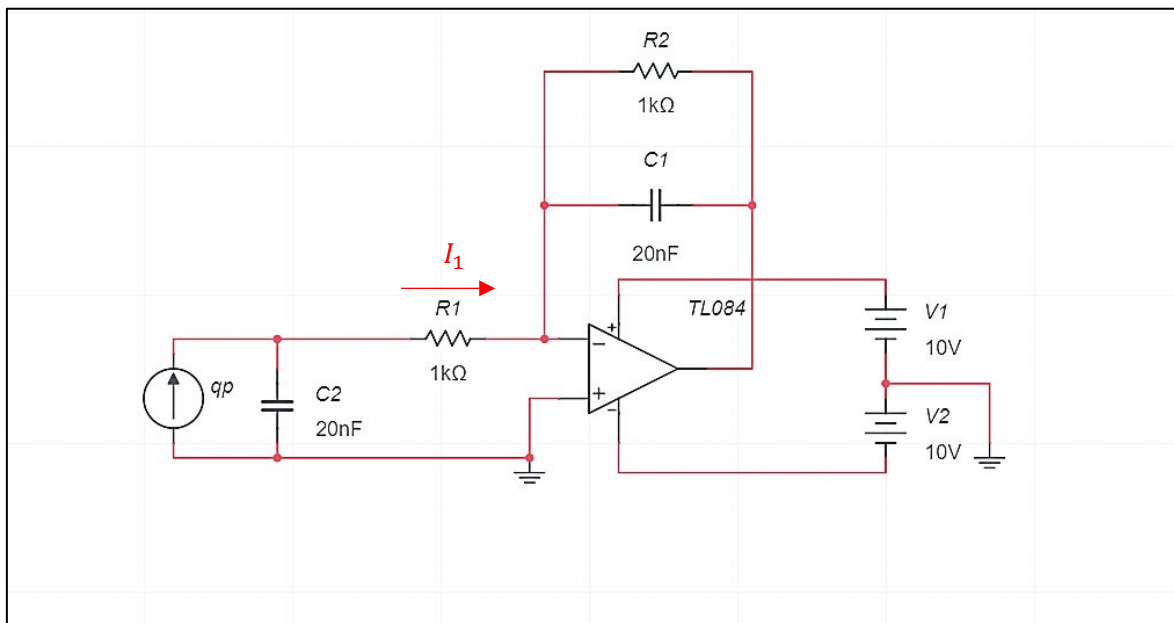
En aquest apartat s'exposen totes les parts que conformen el disseny del circuit electrònic que s'encarregarà de tractar la resposta piezoelèctrica des del moment de l'impacte fins la lectura final del voltatge generat mitjançant LabView.

##### 3.1.1 Circuit amplificador de càrrega

Com s'exposa a la secció 2.2.2, es necessària la utilització d'un circuit amplificador de càrrega que proporcioni una tensió de sortida equivalent a la càrrega generada per el dispositiu piezoelèctric.

Aquest circuit està format per un amplificador operacional en configuració d'inversor, on s'utilitzaran dues resistències R1 i R2 i un condensador C1. En la configuració que s'exposa a la figura 7, i amb els components seleccionats visibles a la taula 1.

- La resistència R1 te la funció de limitar el corrent a l'entrada de l'amplificador operacional. Com la sortida del dispositiu piezoelèctric es connecta directament al terminal inversor de l'amplificador operacional, cal utilitzar un element resistiu que sigui capaç de limitar el corrent que entra a l'amplificador per no fer-lo malbé. S'ha fet servir una resistència amb un valor de 1kΩ.
- La funció de la R2 es proporcionar estabilitat davant corrent contínua. Aquesta resistència ha de ser incorporada en paral·lel al condensador, ja que degut el corrent de polarització de l'amplificador operacional, o corrent de bias () carregaria el condensador, provocant així que l'amplificador es saturés, com s'explica a la secció 2.4, a causa de la integració d'errors. La resistència R2 doncs, es fa servir com a ruta de descàrrega d'aquest corrent.
- El condensador C1 es col·locarà en paral·lel amb R2, i es d'on extraurem la tensió de sortida coneixent l'anàlisi de l'amplificador que es mostra a continuació.



**Figura 7.** Circuit amplificador de càrrega

Component	Tipus
Sensor piezoelèctric	RS PRO 724-3162
Amplificador Operacional	TL084
R1	1K
R2	1K
C1	17nF

**Taula 1.** Selecció de components amplificador de càrrega

Com en tots els amplificadors en configuració d'inversor, la tensió de sortida es equivalent a la tensió en tot el feedback amb signe negatiu,  $V_{OUT} = -V_{FEEDBACK}$ . Per al nostre cas concret, on hi trobem el condensador de feedback en paral·lel amb la resistència de feedback, el voltatge en aquest tram serà doncs el producte de la intensitat que hi circula per el valor de la impedància equivalent al parel·lel que es mostra a l'equació 17:

$$V_{out} = -I_1 * \frac{\frac{R_2}{C_1 s}}{R_2 * \frac{1}{C_1 s}} \quad (17)$$

Essent  $I_1$  el corrent que circula a través de la resistència d'entrada a l'operacional  $R_1$ , i  $R_2$  i  $C_1$  la resistència i el condensador de feedback respectivament.

Operant s'obté la simplificació que es mostra a la equació 18:

$$V_{out} = -I_1 * \frac{R_2}{R_f * C_1 s + 1} \quad (18)$$

Per determinar el valor del corrent que circula a través de la resistència d'entrada  $R_1$ , cal observar que la càrrega elèctrica creada per el piezoelèctric, es dividirà entre el condensador característic del piezoelèctric  $C_p$  i la resistència  $R_1$ , creant així un divisor de corrent la fórmula del qual seria:

$$I_1 = qp * \frac{\frac{1}{Cps}}{R_1 + \frac{1}{Cps}} \quad (19)$$

Essent  $qp$  la càrrega elèctrica generada per el propi piezoelèctric.

Simplificant l'equació 19, obtindrem:

$$I_1 = qp * \frac{1}{R_1 * Cps + 1} \quad (20)$$

Substituint l'equació 20 a l'equació 18, podem assegurar que:

$$V_{out} = -qp * \frac{1}{R_1 * Cps + 1} * \frac{R_2}{R_2 * C_1s + 1} \quad (21)$$

Una vegada arribats a aquesta igualtat, sabem que per la selecció de components, les resistències de feedback i d'entrada tenen el mateix valor  $R_1 = R_2$ , i que el condensador propi del piezoelèctric que ve definit per el fabricant i el condensador de feedback tenen també valors iguals,  $C_1 = C_2$ . Així doncs l'equació 21 es simplifica donant lloc a la següent:

$$V_{out} = -qp * \frac{R_2}{(R_2 * C_2s + 1)^2} \quad (22)$$

La funció de transferència exposada a la equació 22, es la característica d'un filtre passa baixos, que en el nostre cas també farà la funció de filtre antialiàsing.

L'aliàsing es un fenomen que ocorre quan un senyal continu es mostrejat a una freqüència inferior a la del propi senyal. Concretament, per que no es produeixi Aliàsing, seguint el teorema de Nyquist, cal obtenir un mínim de 2 mostres de senyal per a cada període de mostreig del mateix, o dit d'una altra manera, cal obtenir les dades a una freqüència de mostreig, com a mínim dues vegades superior a la freqüència màxima del senyal.

Així doncs i tornant a la nostra funció de transferència, observem que el propi circuit amplificador de càrrega, fa la funció de filtre contra l'aliàsing ja que no deixarà passar les freqüències més altes del senyal. Concretament les superiors a la freqüència de tall.

Aquesta freqüència de tall per definició, es:

$$F_{tall} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (23)$$

La lletra  $\tau$  es la constant de temps de la funció de transferència en segons, i es defineix com el producte de R per C, en el nostre cas doncs.

$$\tau = R_2 * C_2 = 1k\Omega * 20nF = 0,00002s \quad (24)$$

Tornant doncs a la equació 23, la freqüència de tall del filtre antialiàsing serà:

$$F_{tall} = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi * 0,00002} = 7,957kHz \quad (25)$$

Per al procés de captació de dades provinents del piezoelèctric, s'ha utilitzat una freqüència de mostreig de 19,2 kHz. Tenint en compte el teorema de Nyquist anteriorment exposat, hem d'evitar freqüències presents en el senyal que excedeixin la meitat de la freqüència de mostreig, es a dir 9,6.

Així doncs, confirmem que el circuit amplificador de càrrega, farà també la funció de filtre antialiàsing atenuant les freqüències més altes del senyal, les quals provocarien lectures errònies.

### 3.1.2 Circuit d'acondicionament del senyal

En aquesta etapa, posteriorment a la lectura d'un voltatge o senyal mitjançant l'amplificador de càrrega, la lectura es condicionarà en funció del sistema mitjançant el qual obtindrem i processarem les dades, i posteriorment les enviarem a un ordinador.

Per executar aquesta etapa d'obtenció de les dades, s'ha escollit fer ús d'un microcontrolador tipus Arduino, més concretament un model Arduino Due, per els següents motius:

- Disponibilitat per part del grup d'electrònica.
- Baix cost.
- Plataforma oberta.
- Alta intuïbilitat i àmplia utilització en l'àmbit industrial.
- Llenguatge de programació d'alt nivell.
- Elevat número d'entrades i sortides.
- Freqüència d'operació de 84 MHz, podent obtenir major velocitat de processat, molt necessària per a aquesta aplicació.

Tenint en compte que l'alimentació de l'amplificador operacional utilitzat a l'amplificador de càrrega es de  $\pm 10V$ , aquest serà l'output màxim del circuit amplificador de càrrega.

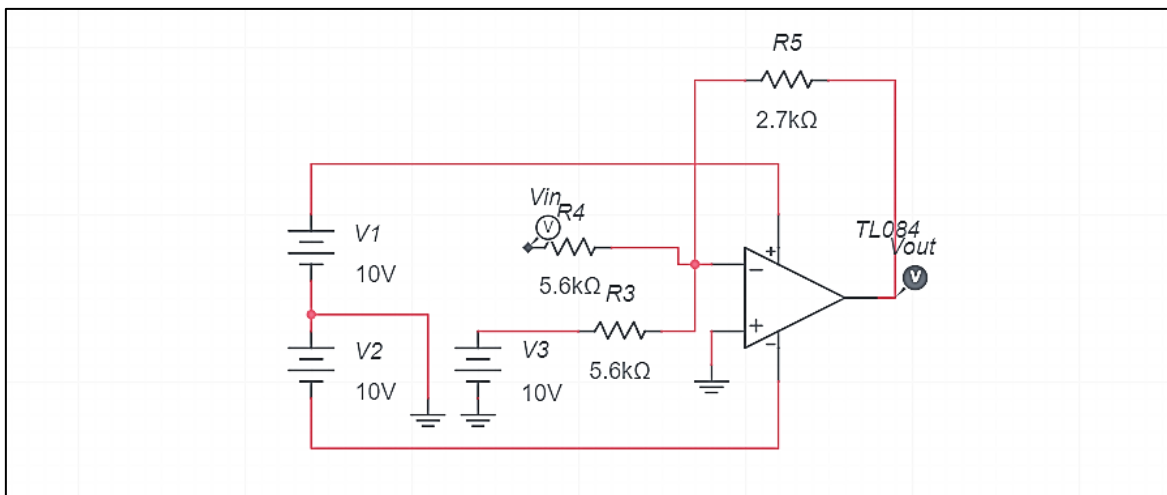
Coneixem que l'entrada de l'Arduino Due ha d'estar compresa entre 0 i 3.3V, per tant les etapes de condicionament de senyal han de ser:

- Una primera etapa on es sumarà un off-set de 10V, per eliminar la lectura negativa, i obtenir una sortida compresa de 0 a 20V. A mes es fixarà el guany de l'amplificador a 0.5, de tal manera que la sortida final d'aquesta etapa anirà de 0 a -10V. Coneixent les característiques d'un **amplificador sumador inversor** el voltatge de sortida es mostra a l'equació 26:

$$V_{out} = \frac{-R_f}{R_i} * (V1 + V2) \quad (26)$$

Volem que el guany en llaç tancat sigui igual a 0.5, per tant sabem que una resistència tindrà un valor el doble de l'altra. Després de revisar les resistències disponibles al laboratori, les seleccionades han estat: 2,7k $\Omega$  i 5,6k $\Omega$ , que son les que més s'aproximen a aquest guany de 0,5.

A la figura 8 i la taula 2 es mostren les característiques de l'esquema del circuit utilitzat.



**Figura 8.** Circuit amplificador sumador inversor

Component	Tipus
R <sub>1</sub>	5,6kΩ
R <sub>2</sub>	5,6kΩ
R <sub>f</sub>	2,7kΩ
Amplificador Operacional	TL084

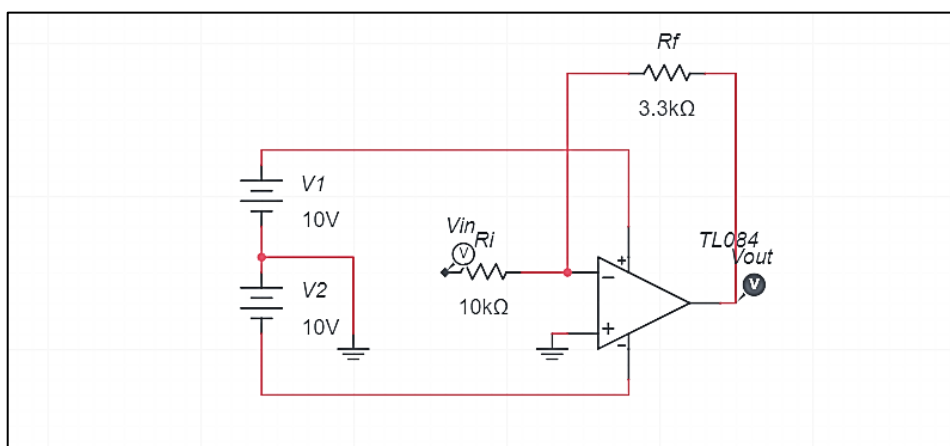
**Taula 2.** Selecció de components amplificador sumador inversor

- Posteriorment s'utilitzarà un circuit **amplificador inversor** per convertir la tensió compresa entre 0 i -10V fins a la tensió desitjada, compresa entre 0 i 3.3V. Coneixent les característiques d'un amplificador inversor el seu voltatge de sortida guarda la relació exposada a l'equació 27:

$$V_{out} = \frac{-R_f}{R_i} * V_i \quad (27)$$

Volem que el guany en llaç tancat sigui igual a 0.33, per tant fixant el valor de R<sub>i</sub> a 10kΩ, R<sub>f</sub> haurà de ser de 3.3kΩ.

A la figura 9 i la taula 3 es mostren les característiques de l'esquema del circuit utilitzat.

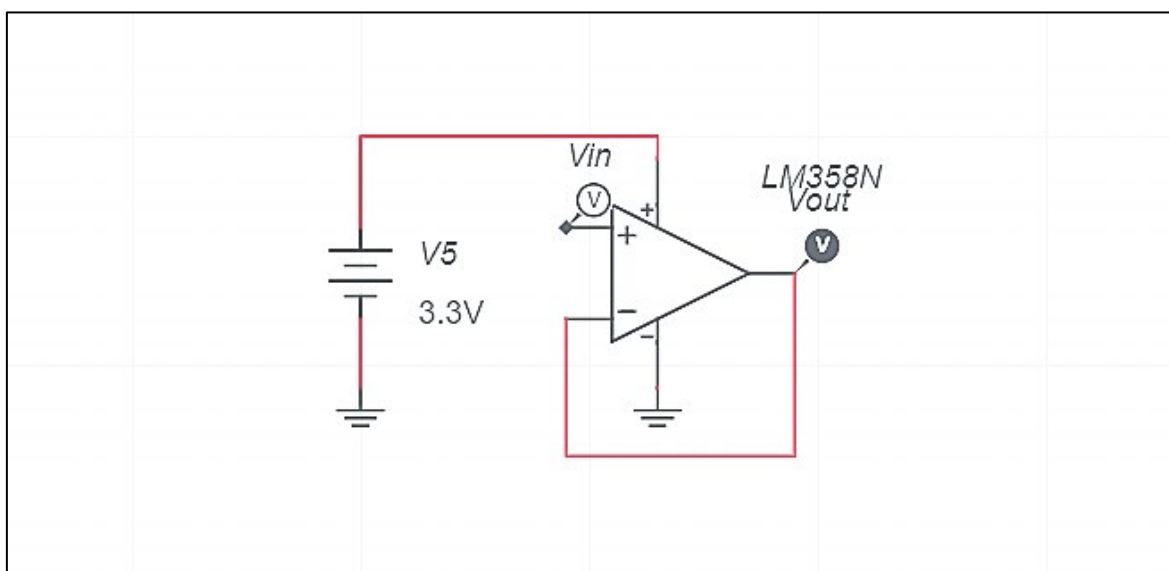


**Figura 9.** Circuit amplificador inversor

Component	Tipus
$R_i$	10 k $\Omega$
$R_f$	3.3 k $\Omega$
Amplificador Operacional	TL084

**Taula 3.** Selecció de components amplificador inversor

- Finalment, per motius de seguretat, afegirem un **seguidor de tensió**, amb un amplificador operacional alimentat entre 0 i 3.3V, per assegurar-nos de que en cap cas la tensió proporcionada a l'Arduino serà superior a 3.3V, cas en el qual es podria fer malbé. A la figura 10 i la taula 4 es mostren les característiques de l'esquema del circuit utilitzat.

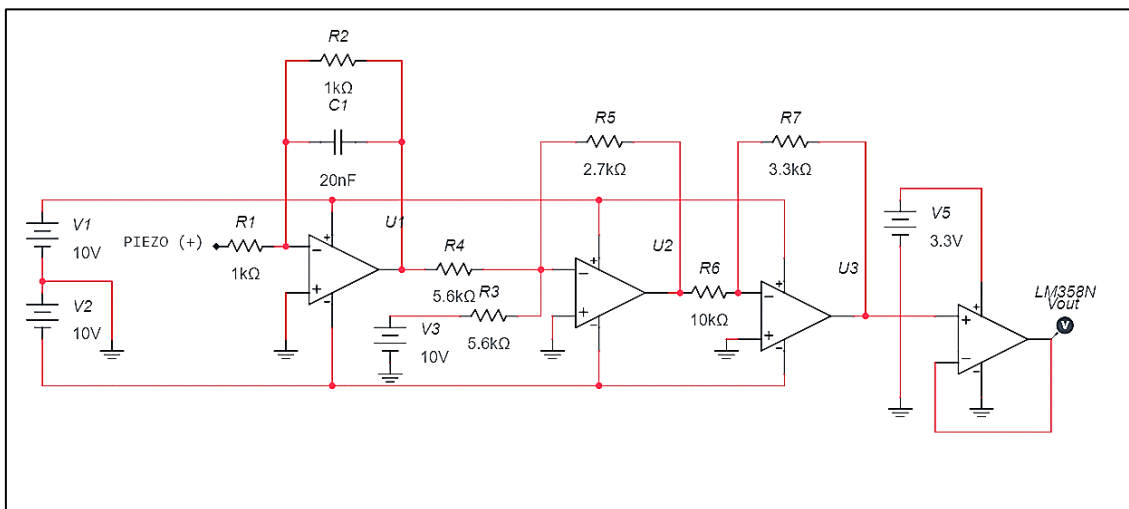


**Figura 10.** Circuit seguidor de tensió

Component	Tipus
Amplificador Operacional	LM358N

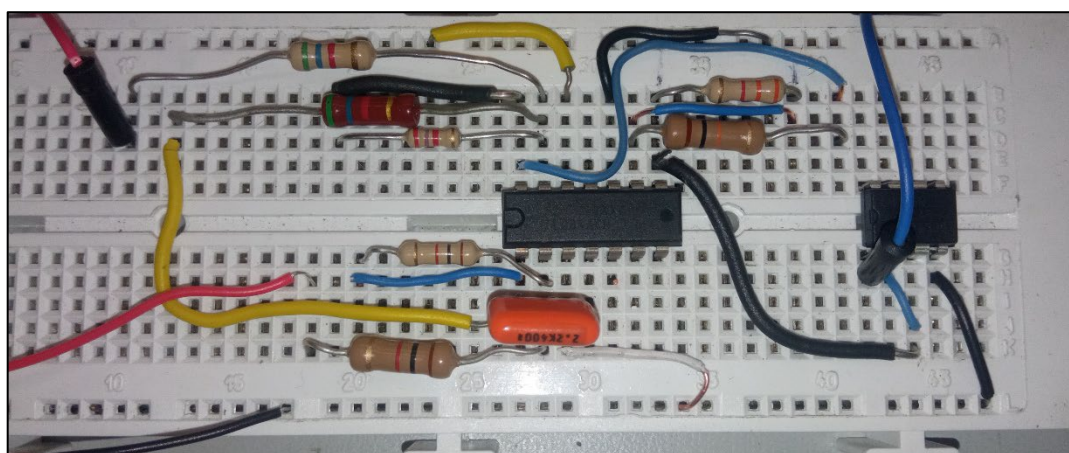
**Taula 4.** Selecció de components seguidor de tensió

Així doncs, el circuit elèctric complet amb l'amplificador de càrrega i el condicionament de senyal es el que s'exposa a la figura 11.



**Figura 11.** Esquema circuit condicionador de senyal

I a la figura 12, es mostra l'aspecte del circuit muntat sobre la placa protoboard.



**Figura 12.** Circuit condicionador de senyal



### 3.1.3 Comunicació amb Arduino

Com a qualsevol sistema de control o sensor que monitoritzi algun esdeveniment, en aquest cas un impacte, posteriorment a l'obtenció d'un valor que volem transmetre, existeix sempre una fase de comunicació amb un ordinador, amb un PLC, amb un sistema d'emmagatzematge, etc.

En aquest cas la intenció es transmetre el valor de tensió obtingut, sempre que sigui necessari, a través d'un microcontrolador, fins a un ordinador. On es realitzarà el corresponent tractament de dades.

Per a aquest projecte, s'ha utilitzat un microcontrolador tipus Arduino Due. Aquest compta amb diferents entrades i sortides tant analògiques com digitals, una font de tensió de 5V i un port per comunicar-se via sèrie (USB) amb un ordinador, entre molts altres components.

Tenint en compte les funcions realitzables per l'Arduino i la finalitat del nostre projecte, els passos a seguir per al microcontrolador seran els següents:

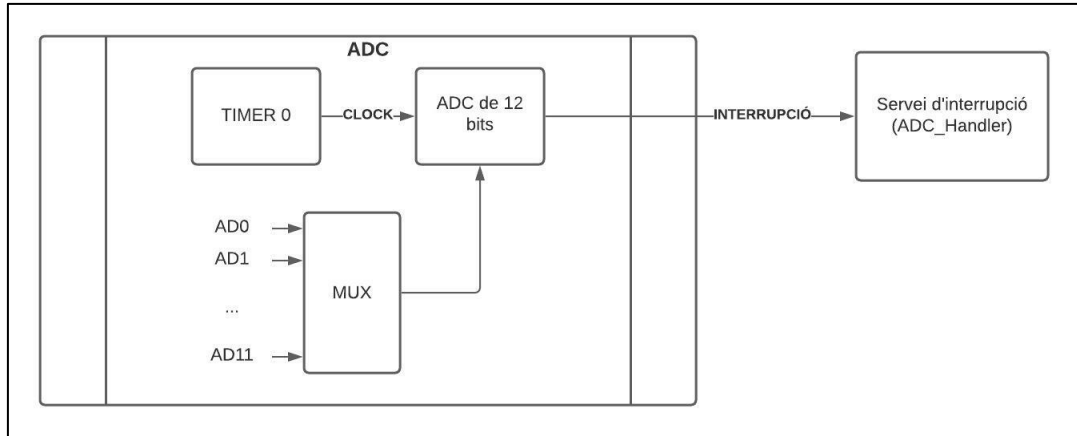
1. Lectura constant d'una variable d'entrada analògica, la qual serà la sortida del nostre circuit elèctric, compresa entre 0 - 3.3V.
2. Avaluació d'aquesta senyal: Si la senyal de lectura no excedeix un valor lliandar, el sistema entendrà que no existeix impacte, i per tant el valor no es transmetrà a l'ordinador. Aquest valor lliandar, després d'observar les lectures obtingudes durant la fase experimental, es fixarà a 0.3V, ja que posteriorment a l'impacte, s'acostumen a crear petites vibracions en el substrat capaces de generar tensions que properes als 0.25V, que no volem llegir.
3. Si el valor d'aquesta lectura excedeix el lliandar fixat, s'enviaran totes les mostres llegibles durant un període de 0.02 segons a l'ordinador via port sèrie per ser processades.

A la figura 14 es mostra un diagrama de blocs que representa el flux d'informació del programa que incorporarem al nostre microcontrolador Arduino Due. I a les figures 15 i 16 es mostra l'*sketch* utilitzat.

El programa utilitzat, ha estat pensat amb la finalitat d'optimitzar al màxim els cicles de rellotge necessaris per a la execució de l'script, ja que d'això en depèn la velocitat d'execució i conseqüentment la freqüència de mostreig assolible amb la qual es transmetran les dades.

Per optimitzar la freqüència d'execució, s'han tingut en compte les següents consideracions:

- No s'utilitza la funció *AnalogRead()* d'Arduino per a obtenir el valor de la variable analògica d'entrada d'un determinat pin. El temps d'execució d'aquesta funció pre-definida es de 13 cicles de rellotge, i a més executar-la dins del cicle *void* de l'script d'Arduino, condiciona la freqüència de lectura a la freqüència en la qual s'executa el *loop*. Això pot conduir-nos a inconsistències en la freqüència de mostreig que falsejarien la lectura obtinguda. En el seu lloc, s'ha fet ús d'interrupcions, que s'executen quan ha acabat de realitzar-se la conversió analògica-digital periòdicament i a un temps determinat, això proporciona una exactitud no assolible de cap altre manera. Seguint aquest procediment, la interrupció tan sols ocupa els cicles de rellotge corresponents a la captura de la dada mitjançant una variable, i la posada en memòria o no d'aquesta, ja que quan s'entra a la rutina d'interrupció, la conversió ja esta feta. L'inici de la conversió es realitza a una freqüència determinada que es programa mitjançant el *TIMER 0* i amb el final de la conversió es produeix la interrupció. El procés esquematitzat es mostra a la figura 13.



**Figura 13.** Diagrama de blocs ADC

- Es coneix que la funció *SerialPrintln()* es la que presenta una duració mes llarga, i també que la interrupció s'habilita una vegada finalitza la conversió, i ha de ser el mes breu possible. Així doncs dins la interrupció s'envia el valor ja convertit a una posició determinada de memòria, i no es dins la interrupció sinó al cicle *void loop*, on s'envia la dada pel port sèrie. Per tant, la que no estarà fixada es la freqüència d'enviament de dades, que no te una rellevància clau.

El hardware necessari per aquesta fase es un microcontrolador Arduino Due, amb el seu cable de connexió (micro USB - USB), un ordinador i el software Arduino per a la introducció d'un programa capaç d'executar els passos exposats anteriorment.

A continuació s'exposa el programa utilitzat, i un diagrama del funcionament d'aquest.

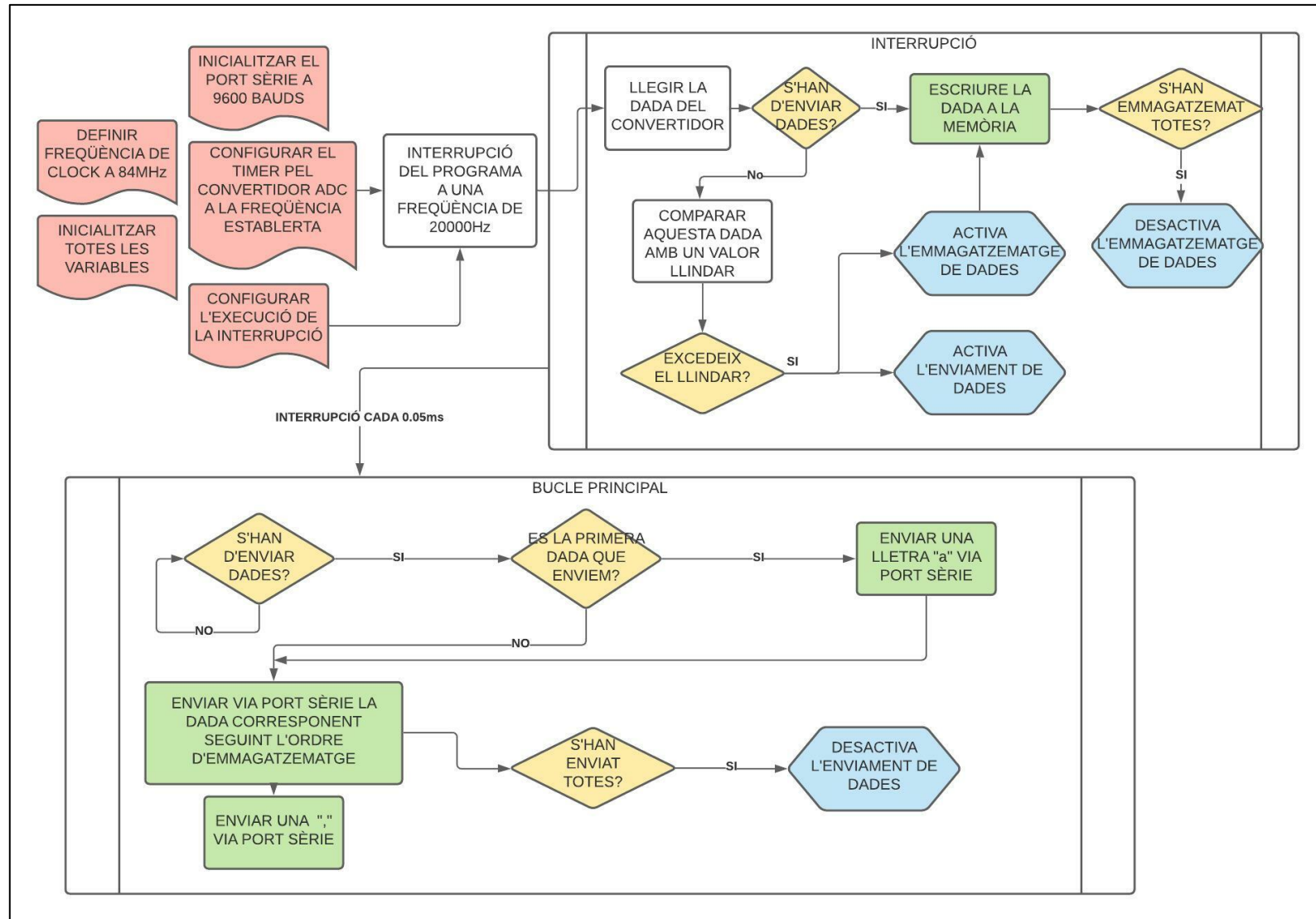


Figura 14. Diagrama de blocs codi Arduino

```

ADC_Interrupcio_v2 §
#define f_clock 84000000 // 84 MHz.
int LectPot=0; // Variable per guardar la lectura del potenciòmetre.
int frecuencia=20000; // Llegirem a una freqüència de 20kHz, mes de 10 vegades per sota de la freqüència màxima
int event=0; // S'ha d'introduir dades al buffer
int event2=0; // S'ha d'enviar dades pel port sèrie
int dades[400]; // Memòria de dades, llegim una freqüència de 20khz, 1/20000= 0.00005s es el període. I volem mesurar
// el voltatge durant un període de 0.02s per tant 0.02/0.00005= 400 mostres.
int punter=0; // Posició de la memòria a on emmagatzemo dades
int punter2=0; // Posició de la memòria d'on extrec les dades

void setup()
{
  Serial.begin (9600) ; // Obrir port serie a 9600 bits per segon.
  adc_setup (); // Funció per configurar l'ADC.

  /*-----CONFIGURACIÓ TIMER 0 CANAL 0 PER EL CLOCK DE L'ADC-----*/
  pmc_set_writeprotect(false); //Habilitar l'escriptura de registres.
  pmc_enable_periph_clk (ID_TC0) ; // Habilitar clock
  TcChannel * t = &(TC0->TC_CHANNEL)[0] ;/* Punter *t que apunta a la direcció de memòria del registre TC0 canal 0.*/
  t->TC_CCR = TC_CCR_CLKDIS ; // Deshabilitar TIMER per configurar.
  t->TC_IDR = 0xFFFFFFFF ; // Deshabilitar tote les interrupcions.
  t->TC_SR ; // Llegir el Timer per primera vegada.
  t->TC_CMR = TC_CMR_TCCLKS_TIMER_CLOCK4;// TIMER_CLOCK4: 656.250 KHz.
  TC_CMR_WAVE | // Mode waveform: Generació d'una ona quadrada o pulsos repetits
  TC_CMR_WAVSEL_UP_RC | // Mode comptador ascendent.
  TC_CMR_ACPA_CLEAR | TC_CMR_ACPC_CLEAR | // Netejar registres.
  TC_CMR_BCPB_CLEAR | TC_CMR_BCPC_CLEAR ; // Netejar registres.

  /*--ESTABLIR COMPTE CORRESPONDENT AMB LA FREQÜÈNCIA DESSITJADA--*/
  t->TC_RC = (f_clock/128)/frecuencia; //Guardar cuenta en registro RC.
  t->TC_RA = ((f_clock/128)/frecuencia)/2; /* El registre RA es necessari per generar una senyal quadrada (clock) per
  l'ADC. Per això es configura a la meitat de la freqüència dessitjada. */

  t->TC_CMR = (t->TC_CMR & 0xFFF0FFFF) | TC_CMR_ACPA_SET |
  TC_CMR_ACPC_CLEAR ; // Establir RC com Reset y RA com SET
  t->TC_CCR = TC_CCR_CLKEN | TC_CCR_SWTRG ;// Rehabilitar TIMER
  t->TC_IER = TC_IER_CPCS; /* Habilitar el comparador del registre RC.*/
  t->TC_IDR = 0xEF; /* Hibilitar els registres diferents a RC.*/
}
/*-----CONFIGURACIÓ DE L'ADC: PIN A11-> Arduino ; AD13->SAM3X8E-----*/

void adc_setup ()
{
  NVIC_EnableIRQ (ADC_IRQn) ; // Habilitar el servei d'interrupció.
  ADC->ADC_IDR = 0xFFFFFFFF ; // Habilitar totes les interrupcions.
  ADC->ADC_IER = 0x2000 ; /*0x2000 = 0010 0000 0000 0000. Habilitar interrupció de final de conversió del canal AD13.*/
}

```

Figura 15. Sketch Arduino part 1

```

ADC->ADC_CHDR = 0xFFFF ; // Deshabilitar tots els canals.
ADC->ADC_CHER = 0x2000 ; /* 0010 0000 0000 0000 habilitar el canal AD13 corresponent amb el pin A11 de l'Arduino.*/
ADC->ADC_CGR = 0x15555555 ; // Posar els guanys de conversió a 1.
ADC->ADC_COR = 0x00000000 ; // Posar l'offset del convertidor a 0.
ADC->ADC_MR = (ADC->ADC_MR & 0xFFFFFFF0) | ADC_MR_TRGSEL_ADC_TRIG1 |
ADC_MR_TRGEN ; //TRIG1: Utilitzar canal 0 del TIMER 0 com clock de l'ADC.
}
/*-----RUTINA D'INTERRUPCIÓ DE L'ADC-----*/
|
void ADC_Handler (void) /* Salta a aquesta rutina, quan es te el valor convertiti ha pasat el temps configurat pel TIMER 0 CANAL 0*/
{
if (ADC_ISR_EOC13) // Assegurar-se de que s'ha convertit la dada
{
LectPot = *(ADC->ADC_CDR+13) ; // Emmagatzemar la tensió d'entrada al canal A11
if ((LectPot>=2420 || LectPot>= 1676) && event==0){ // Quan el piezo llegeixi un 0V, la sortida serà 2048, volem un rang de no lectura de 0.3V (372 en decimal)
// per tant el rang +0.3 i -0.3 serà 2048+372 i 2048-372, es a dir 2420 i 1676
punter=0; // Ubiquem el punter d'emmagatzematge de dades a la posició inicial, no caldria però ens assegurem
event = 1; // S'han d'emmagatzemar dades
event2 = 1; // S'han d'enviar dades
}
if (event==1){
dades[punter]=LectPot; // S'emmagatzema el valor del canal 11 a la memoria, posició punter
punter++; // Incrementar valor del punter per emmagatzemar la següent dada a la següent posicio de memoria
}
if(punter>=400){ // Si ja hem emmagatzemat 1000 dades
event = 2; // Hem acabat d'emmagatzemar dades
punter=0; // Ubiquem el punter d'emmagatzematge de dades a la posició inicial
}}}

void loop() {
if (event2==1){
Serial.print('a');
event2=2; // S'han d'enviar dades
punter2=0; // Ubiquem el punter d'enviament de dades
}

if (event2==2){ // Si hem d'iniciar l'enviament de dades
Serial.print(dades[punter2]); // Enviar la dada del buffer dades ubicada a la posició punter2
Serial.print(',');
punter2++; // Incrementar el valor del punter
}

if(punter2 >= 400){ // Si ja hem enviat 400 dades
event2 = 0; // Ha acabat l'esdeveniment
}}

```

**Figura 16.** Sketch Arduino part 2

Per verificar el correcte funcionament del nostre sistema a una freqüència d'adquisició de dades de 20000Hz, s'ha comprovat quina es la freqüència màxima a la qual la placa Arduino es capaç de realitzar l'adquisició de les dades per tal de comprovar que treballarem a una freqüència prou baixa com per poder completar també la fase d'enviament d'aquestes per al port sèrie.

Degut a que l'adquisició de les dades, i la conseqüent posada en memòria d'aquestes, s'executa única i exclusivament a la interrupció, el que hem fet ha estat commutar el valor d'una variable al final de cada interrupció, de manera que ens assegurem que el valor ha estat adquirit, posat en memòria i hem arribat al final de la interrupció.

Mitjançant un oscil·loscopi digital, hem llegit la velocitat de commutació d'aquesta variable, a la qual hem assignat una sortida digital, en aquest cas el led de la placa Arduino. D'aquesta manera obtindrem la velocitat d'execució de les interrupcions del programa, que es el mateix que dir, la freqüència màxima a la qual l'Arduino es capaç de realitzar les conversions i la posada en memòria de la entrada analògica.

El resultat ha estat una freqüència màxima de 300kHz. Com treballarem a una velocitat de 20kHz, assegurem que entre interrupció i interrupció, hi haurà temps suficient per executar el bucle *main* del programa, on s'enviaran les dades mitjançant el port sèrie cap a l'ordinador.

### 3.1.4 Comunicació amb LabView

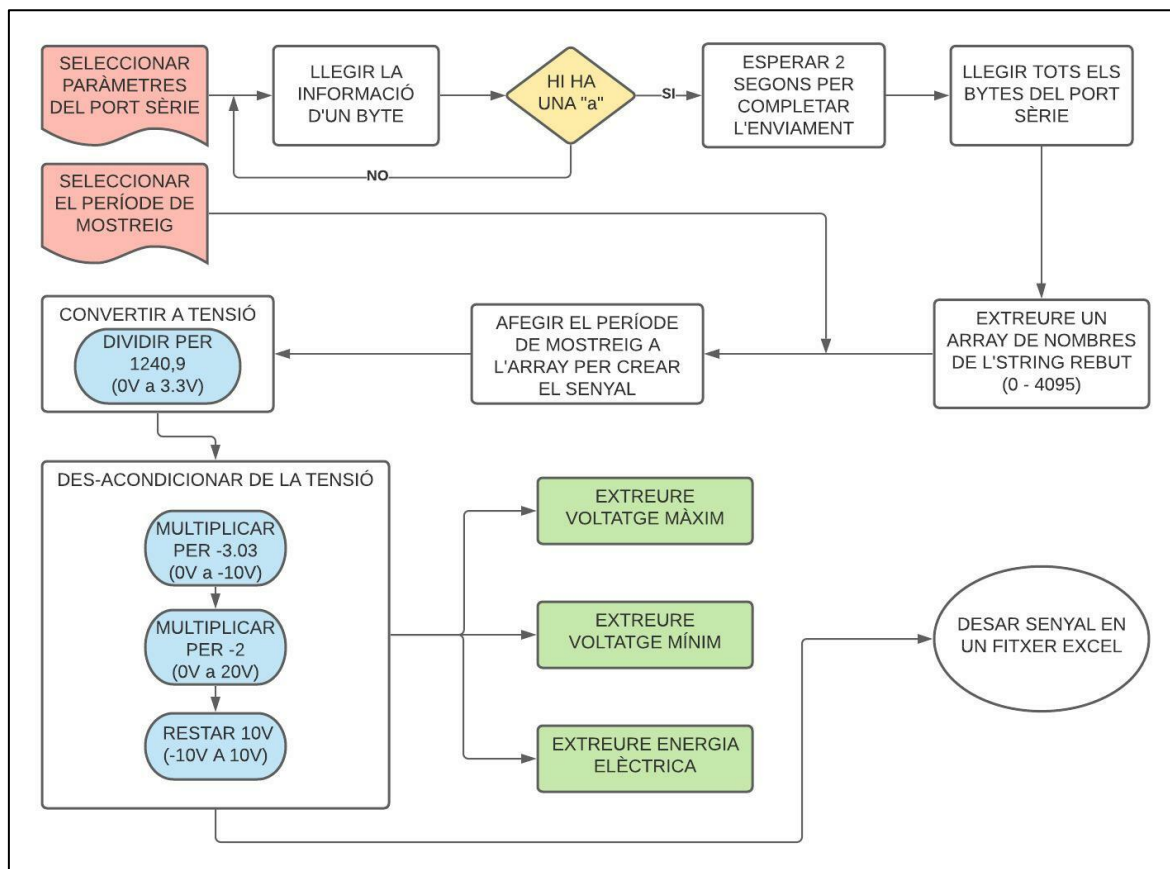
L'última etapa de l'adquisició de dades, es la lectura d'aquestes a l'ordinador i el corresponent post-tractament. Com podria ser graficar el voltatge obtingut en funció del temps, integrar el senyal i quantificar el dany de l'estructura en funció del valor de la integral, o infinitat d'opcions possibles.

Per executar aquesta última etapa, s'ha decidit utilitzar el software LabView, ja que es molt habitual en l'àmbit industrial, altament intuïtiu i amb una interfície d'usuari molt simplificada que presenta unes prestacions altament compatibles amb les sol·licitacions d'aquest projecte.

Tenint en compte les funcions realitzables per LabView i les necessitats del projecte, les tasques a realitzar son:

1. Connexió del programa amb el port sèrie i conseqüentment amb l'Arduino.
2. Lectura dels valors rebuts via port sèrie.
3. Tractament i exposició dels valors obtinguts via display en forma de gràfica Voltatge-Temps.
4. Extracció de paràmetres rellevants com Voltatges màxim i mínim, energia del senyal o espectre de transformada de Fourier si escau. *En el desenvolupament d'aquest treball no s'ha estudiat la Transformada ràpida de Fourier del senyal, però s'ha introduït al programa LabView perquè es considera útil per investigacions futures.*
5. Com a última funció si el temps ho permet, s'establirà un patró per relacionar la gràfica Voltatge-Temps amb el dany ocasionat al substrat i es mostrarà per pantalla un indicador que avaluarà l'estat final del substrat posterior a l'impacte.

A la figura 17 es mostra un diagrama de flux que representa l'execució lògica del programa utilitzat.



**Figura 17.** Diagrama de blocs LabView

A les figures 18 i 19 s'exposa el programa utilitzat i la interfície d'usuari.

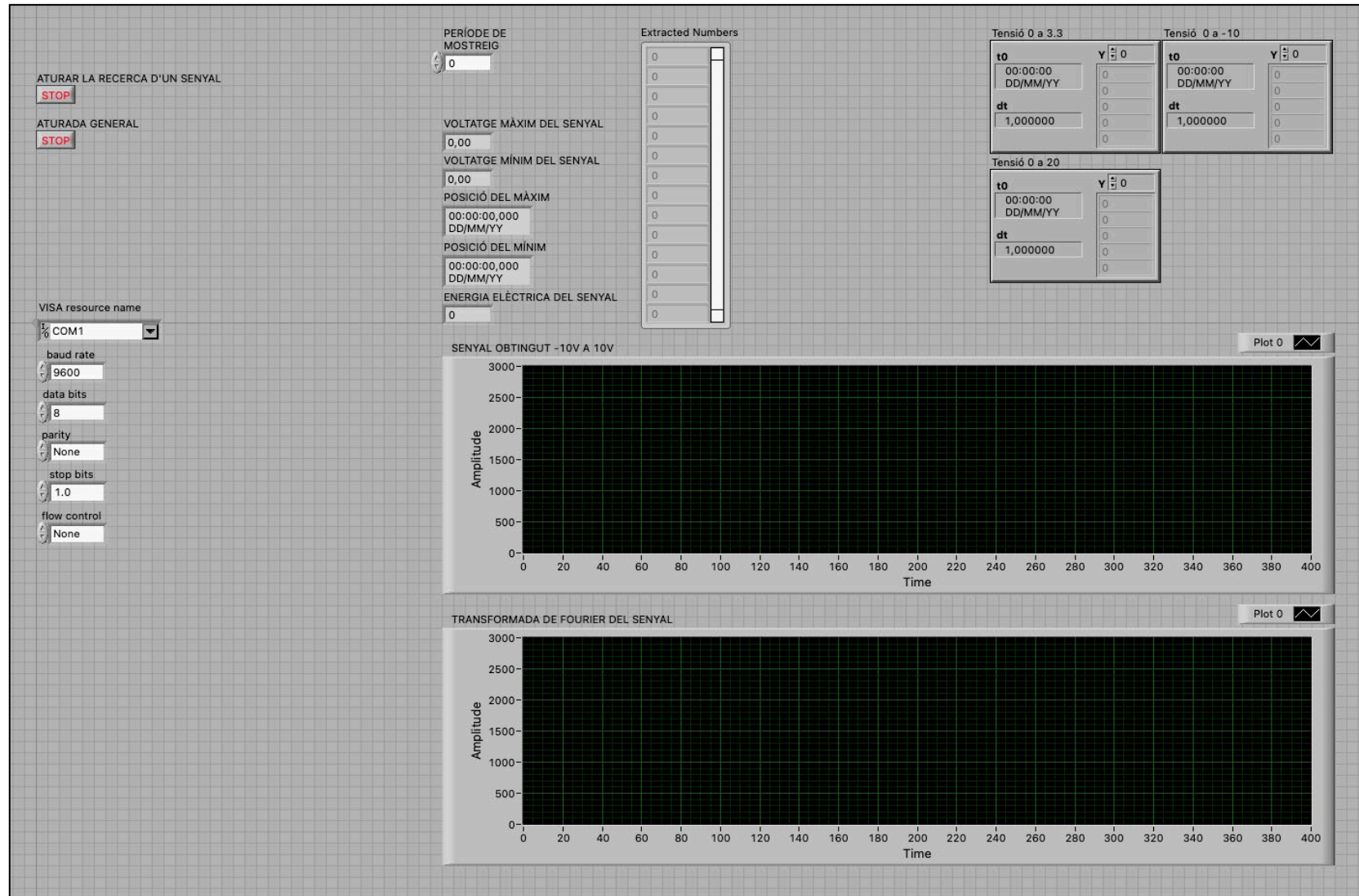


Figura 18. Front Panel



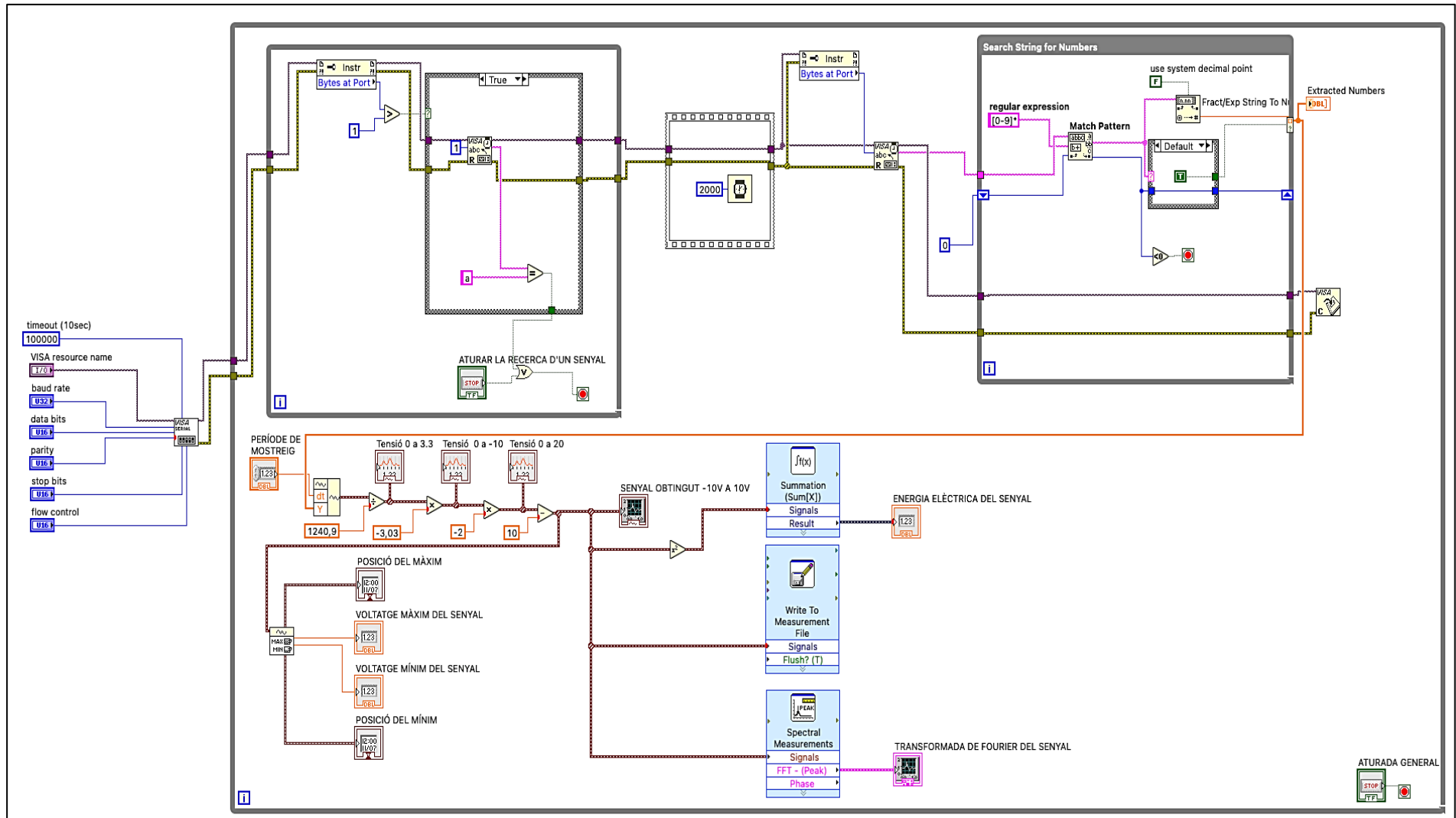


Figura 19. Block Diagram

El primer pas del nostre programa, es la selecció de característiques del port sèrie per el qual es realitza la comunicació Arduino - LabView. Aquesta selecció es du a terme fora del bucle on s'executa la resta del programa ja que es quelcom constant i tan sols s'ha de seleccionar una vegada.

Aquestes característiques son quin canal de port sèrie es farà servir (COM1, COM2, etc.), la velocitat d'enviament de bytes per el port sèrie o *Baud Rate*, el número de bits, si s'utilitza bit de paritat i de quin tipus, si s'utilitzen bits d'*stop* i quants, i quin tipus de control de flux es fa servir si escau. Totes les característiques a seleccionar son l'input del bloc configurador, del qual s'extreuen dos outputs, el primer el que conté la informació del port sèrie, de color morat, i un segon situat a la part inferior que conté la informació de l'error obtingut si escau.

Una vegada establerta correctament la comunicació, s'entra en un primer bucle, el bucle general de funcionament, la funció del qual es precisament extreure la informació total de l'impacte i finalment mostrar gràfica, etc. Dins d'aquest bucle general de funcionament, entrarem ara en el primer dels bucles parcials. Aquest s'encarregarà d'analitzar un per un els bytes que arriben per el port sèrie, amb la funció de detectar una lletra "a", que es precisament el caràcter que hem utilitzat per indicar que hi ha hagut un impacte i que conseqüentment s'inicia una comunicació.

Per fer-ho, primerament s'inspecciona el número de bytes que arriben per el port sèrie, amb la funció "*bytes at port*" i sempre i quant, hi hagi més d'un, dins d'una funció "*case*", es llegeixen els bytes un per un amb la funció "*VISA Read*". L'output d'aquesta funció es compara amb la lletra "a", i quan el resultat d'aquesta comparació es vertader vol dir que ha arribat una "a" pel port sèrie i que procedirem a la lectura, sortirem del bucle i avancem a la següent acció.

A continuació, deixarem el programa en espera durant 2 segons amb la funció "*wait*", ja que sabem que la comunicació s'inicia al arribar la "a" i per tant hem de deixar un temps (més que suficient) per que s'acabi l'enviament de dades.

Després d'haver finalitzat l'enviament de totes les dades a traves del port sèrie, es realitzarà la lectura de tots els bytes que es trobin al port sèrie. De nou es la funció "*Bytes at port*" la que proporciona el número de bytes que han arribat a la funció "*Visa READ*" per executar la lectura completa de tots els bytes del port.

Aquesta lectura, emmagatzema tots els valors en un buffer que es pot veure en color rosa. Aquest buffer però, es un *string* que contindrà comes i que haurem de convertir a valors numèrics separats un per un. Per fer-ho farem ús del bloc "*Match Pattern*" que com el seu nom indica, compara els valors de la cadena amb un patró per extreure ,precisament el caràcters que coincideixin. En aquest cas es compara amb els números del 0 al 9 i per tant obtindrem com a resposta un *string* amb els valors obtinguts pel port sèrie encadenats. Posteriorment farem ús del bloc "*Fract/exp String to Number*" per extreure aquests números d'un en un de l'*string* i obtenir així un *array* de valors.

Aquest *array*, però, no serà el valor de tensió que hem rebut pel piezoelèctric. L'Arduino ens està enviant el valor obtingut per el convertidor del que disposa, que es de 12 bits i per tant, haurem obtingut valors compresos entre 0 i 4095. Aquests valors doncs es corresponen a 0 i 3.3V respectivament, i hauran de ser convertits amb operacions per obtenir la correcta proporció que existeix.

Si volem que la tensió màxima que es 3,3V, estigui representada per els màxim 4095 valors que podem obtenir del convertidor i mostrar pel port sèrie, aleshores:  $4095 / 3,3 = 1240,9$ . Dividint els valors enters quantificats pel convertidor de 12 bits entre 1240.9, obtindrem la tensió en el rang proporcionat per l'Arduino.

Una vegada arribats a aquest punt, tenim tot l'*array* de valors que ens ha transmès l'Arduino disponible en voltatge. Però aquest voltatge correspon a un rang 0 - 3.3V, que es l'utilitzat per introduir a l'Arduino degut que aquest es el llinar que accepta el microcontrolador. Si volem obtenir el voltatge generat per el nostre piezoelèctric, mes correctament per el circuit amplificador de

càrrega, hauréem de realitzar el camí seguit en la fase de condicionament del senyal en ordre invers. Es a dir primerament multiplicar el circuit per un guany de 3 (a l'etapa de condicionament hem utilitzat un guany de 0.33) per obtenir una tensió en un rang 0 - 10V. I finalment multiplicar-lo per un guany de 2 (en la etapa de condicionament utilitzem un guany de 0.5) obtenint així una tensió en el rang 0 - 20V i restar-li 10V a la xifra final, d'on enregistrem una tensió compresa entre -10V i 10V.

Arribats a aquest punt, tindrem l'*array* de valors, i podrem graficar-lo, però no disposarem del senyal si no hi introduïm el període de mostreig utilitzat. Aquest dependrà del valor utilitzat per a la adquisició, estem parlant doncs d'un valor conegut que caldrà introduir per el "front panel" i que mitjançant el bloc "*Build Waveform*" afegirem a l'*array* de tensions obtenint doncs un l'esperat senyal final.

Una vegada disposem d'aquest senyal, executarem els pertinents tractaments i extraccions de dades, com obtenir valors màxims i mínims amb el bloc "*Waveform Min Max*", n'extraurem l'energia elevant el senyal al quadrat i integrant-lo i podrem desar en un fitxer d'Excel les dades pertinents per a un posterior anàlisi si escau.

### 3.2 Procediment per a l'assaig

Per tal de sotmetre a estudi els materials piezoelèctrics, i més concretament el seu comportament davant esdeveniments d'impacte, es pretén seguir un procediment on s'exposarà els piezoelèctrics a impactes de diferents magnituds, de manera gradual i es revisarà la lectura del circuit anteriorment exposat amb la finalitat de comprovar la relació existent entre impacte - lectura elèctrica - dany de substrat.

En aquest estudi, s'ha decidit sotmetre els substrats a impactes verticals de caiguda lliure. Els motius per els quals s'ha escollit aquest tipus d'impacte en front a d'altres, com per exemple, un impacte en paral·lel al terra o un pèndol *Charpy* són:

- Simplicitat d'execució.
- Disponibilitat de material per a l'execució. A la universitat s'han realitzat assajos similars amb anterioritat i el departament disposa de material.
- Baix cost, relacionat amb els dos punts prèviament mencionats.
- No es necessita un sistema d'accionament complex, ja que la font d'energia per generar l'impacte es la força de la gravetat. En un altre cas es necessitaria un motor o quelcom que proporcionés velocitat a l'impactador.

Si pensem en les variables que quantifiquen un impacte, la més evident es l'energia que aplicarem sobre el substrat. Per a quantificar-la cal saber el pes de l'impactador que es deixa caure i l'alçada d'impacte.

De la mateixa manera, es va plantejar la opció que una altra variable que afecti la lectura del piezoelèctric, a part de l'energia, fos la velocitat d'impacte. Per a una determinada energia d'impacte existeixen infinites velocitats d'impacte que depenen precisament de la gravetat i de l'alçada d'impacte. Seguint la relació:

$$V = \sqrt{2gh}$$

Així doncs, el procediment per a l'assaig serà impactar un determinat substrat, amb energies d'impacte compreses entre valors que pràcticament no causin deterioració en el substrat, i energies que provoquin la ruptura total del substrat. De igual manera per a una determinada energia d'impacte s'estudiaran dues velocitats d'impacte diferents amb intenció d'estudiar si la velocitat d'impacte es una variable clau en la lectura elèctrica.

S'estudiarà la viabilitat de ubicar mes d'un piezoelèctric per tal de rebre una resposta elèctrica més precisa, i conèixer si diferents fonts d'informació poden aportar dades extres per quantificar el dany en el substrat.

Per a cada assaig s'utilitzaran substrats i piezoelèctrics nous, per evitar possibles deterioracions ocasionades durant l'impacte.

Paràmetres transcendents per a qualsevol procediment d'assaig científic:

- Fiabilitat: Es busca obtenir el màxim grau de fiabilitat, mitjançant la repetibilitat de les proves, un ampli número d'assajos, i limitant la variabilitat amb diverses mostres d'un mateix assaig.
- Validesa: S'ha intentat aproximar els assajos al màxim a estàndards internacionals, i metodologies d'assaig ja existents, per tal d'assegurar la validesa del procediment seguit.
- Objectivitat: S'executen assajos un per un i les dades son adquirides a través d'un software a temps real, per tant no poden ser modificables ni discutibles. Els resultats obtinguts són

els que es mostren i només poden ser qüestionats en base a altres aspectes científics com la deformació existent en el substrat, l'alçada de rebot o el temps de contacte.

- Usabilitat: La facilitat d'ús d'aquest procediment basat en la regulació gradual de les energies amb les quals es pot impactar el substrat, el converteixen en un assaig executable per qualsevol persona amb un mínim de nocions tècniques.

Com s'ha esmentat amb anterioritat, la metodologia d'assaig ha estat 100% ideada des de zero i no es pot assegurar el mateix grau de fiabilitat, validesa, objectivitat i usabilitat, que l'assolible mitjançant procediments internacionals, amb normatives estandarditzades i maquinaria homologada.

### 3.3 Planning d'assajos

Tenint en compte totes les característiques exposades durant l'apartat anterior, s'ha compilat una matriu d'assajos per tal d'avaluar les característiques tant dels piezoelèctrics com dels substrats assajats.

Els codis d'assaig estan compostats per 3 caràcters, el primer es l'alçada d'impacte, el segon el pes de l'impactador, i el tercer es l'espècimen d'assaig. En casos d'assaigs especials (es detallen a continuació) les lletres "i" i "d" refereixen a "invers" i "doble" respectivament. Aquesta codificació s'escriu sobre el substrat a assajar i s'utilitza per mantenir la traçabilitat de les mostres i dels paràmetres d'assaig.

La següent matriu d'assajos que es mostra a la Taula 5 ha estat confeccionada amb la finalitat d'estudiar:

- Evolució de la lectura piezoelèctrica i del dany ocasionat amb l'increment de l'energia d'impacte. Fent ús d'un increment gradual de l'energia d'impacte, es graficaran resultats per veure quina evolució presenten ambdues variables en relació amb l'energia d'impacte.
- Afectació de la velocitat d'impacte dins d'una mateixa energia en la lectura piezoelèctrica i en el dany ocasionat. Per avaluar aquesta possibilitat, s'ha fet ús de dos impactadors amb diferent pes, i s'han assajat les energies d'impacte: 1.339J, 1.785J, 2.231J, 2.667J i 3.123J amb dues velocitats d'impacte diferents, amb la finalitat de comparar la resposta elèctrica obtinguda i comprovar si realment existeix o no aquesta afectació.
- Afectació de proximitat del piezoelèctric al punt d'impacte, sobre la conseqüent lectura elèctrica. Per als assajos números 11, 12, 19 i 20, s'han ubicat dos piezoelèctrics sobre la superfície del substrat, ubicats a distàncies diferents del punt d'impacte, amb la finalitat d'estudiar com varia la resposta obtinguda en funció del posicionament del piezoelèctric respecte del punt d'impacte.
- Variació en la resposta piezoelèctrica, depenent de la ubicació anterior o posterior del piezoelèctric en el substrat. Tots els assajos de la matriu s'han executat ubicant el piezoelèctric per la cara superior del substrat, per contra els assajos 9, 10, 17 i 18 s'han realitzat amb el piezoelèctric a la cara inferior amb la intenció de comparar la resposta amb els assajos homòlegs, 7, 8, 15 i 16.
- Afectació d'un impacte més violent de l'esperat en la lectura elèctrica i així com estudiar la possible saturació de l'amplificador operacional. Els assajos número 35 i 36, son executats amb l'impactador mes pesat disponible i la màxima alçada assolible per la configuració de l'assaig, amb la finalitat de provocar una ruptura extremadament abrupta (una energia d'impacte més de dues vegades superior a la segona més alta) i comprovar aleshores com responen tant el piezoelèctric com el circuit elèctric.



TEST Nº	ENERGIA D'IMPACTE [J]	MASSA [Kg]	ALÇADA D'IMPACTE [m]	VELOCITAT D'IMPACTE[m/s]	CODI D'ASSAIG
1	0,240	0,489	0,05	0,99	05-489-1
2	0,240	0,489	0,05	0,99	05-489-2
3	0,447	0,489	0,09	1,35	09-489-1
4	0,447	0,489	0,09	1,35	09-489-2
5	0,893	0,489	0,19	1,91	19-489-1
6	0,893	0,489	0,19	1,91	19-489-2
7	1,339	0,489	0,28	2,34	28-489-1
8	1,339	0,489	0,28	2,34	28-489-2
9	1,339	0,489	0,28	2,34	28-489-1i
10	1,339	0,489	0,28	2,34	28-489-2i
11	1,339	0,489	0,28	2,34	28-489-1d
12	1,339	0,489	0,28	2,34	28-489-2d
13	1,339	0,799	0,17	1,83	17-799-1
14	1,339	0,799	0,17	1,83	17-799-2
15	1,785	0,489	0,37	2,70	37-489-1
16	1,785	0,489	0,37	2,70	37-489-2
17	1,785	0,489	0,37	2,70	37-489-1i
18	1,785	0,489	0,37	2,70	37-489-2i
19	1,785	0,489	0,37	2,70	37-489-1d
20	1,785	0,489	0,37	2,70	37-489-2d
21	1,785	0,799	0,23	2,11	23-799-1
22	1,785	0,799	0,23	2,11	23-799-2
23	2,231	0,489	0,47	3,02	47-489-1
24	2,231	0,489	0,47	3,02	47-489-2
25	2,231	0,799	0,28	2,36	28-799-1
26	2,231	0,799	0,28	2,36	28-799-2
27	2,667	0,489	0,56	3,30	56-489-1
28	2,667	0,489	0,56	3,30	56-489-2
29	2,667	0,799	0,34	2,58	34-799-1
30	2,667	0,799	0,34	2,58	34-799-2
31	3,122	0,489	0,65	3,57	65-489-1
32	3,123	0,489	0,65	3,57	65-489-2
33	3,123	0,799	0,40	2,80	40-799-1
34	3,123	0,799	0,40	2,80	40-799-2
35	6,738	0,799	0,86	4,11	86-799-1
36	6,738	0,799	0,86	4,11	86-799-2

Taula 5. Planificació d'assajos

### 3.4 Metodologies Internacionals Existents

Com s'esmenta amb anterioritat, prèviament a definir la metodologia d'assaig definitiva, s'han investigat metodologies ja existents, per tal de seguir al màxim procediments validats internacionalment i d'aquesta manera incrementar el grau de fiabilitat dels assajos.

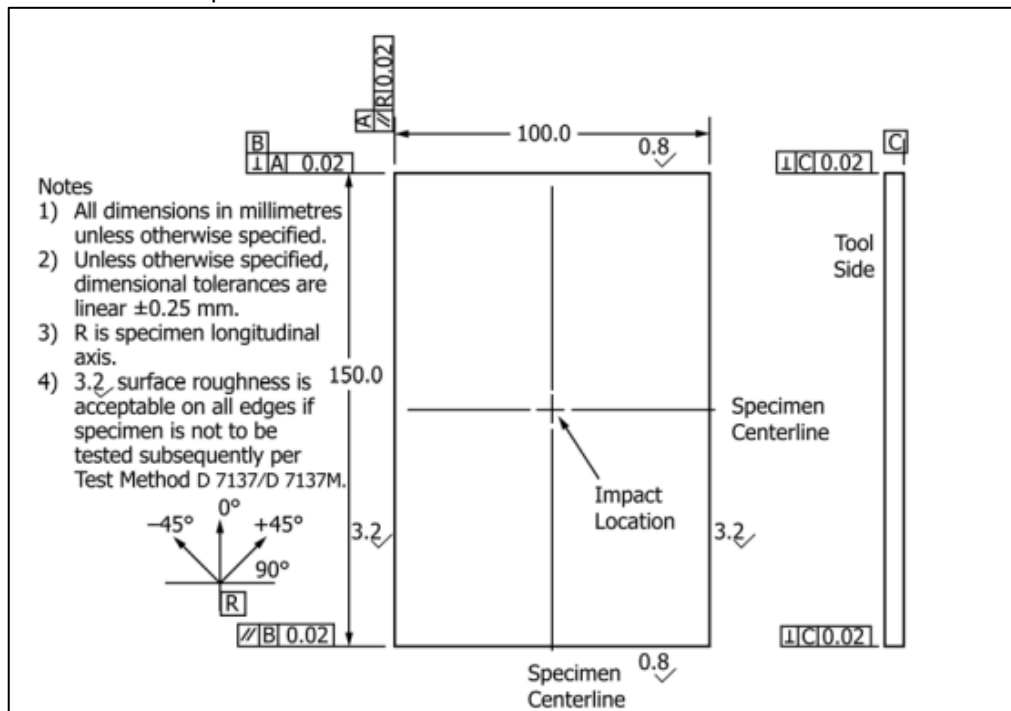
Les metodologies d'assaig en que s'ha basat la part experimental han estat:

- **ASTM D7136/7137** - *Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event*

Aquest assaig, mesura la resistència a un impacte de caiguda lliure d'una matriu de polímer reforçat. Pel que refereix al substrat, difereix notablement d'aquest treball, però el tipus d'impacte realitzat envers aquest es molt similar.

Es per això que aquesta metodologia d'assaig s'ha utilitzat com a referència per fixar els paràmetres:

- **Morfologia i dimensions del substrat:** En la figura 20 d'aquest document s'expliciten les dimensions del substrat que té morfologia rectangular amb dimensions 100x150 amb espessor variable en funció de l'assaig. La morfologia senzilla i estandarditzada s'utilitza de referència per al substrat d'aquest treball.
- **Punt d'impacte:** D'igual manera a la figura 20, es senyala el punt d'impacte com el punt central del substrat, per procedir al posterior alineat de l'impactador amb aquest. S'ha utilitzat el mateix procediment per a aquest treball amb la finalitat d'assegurar l'alineat tub-impactador-substrat, ja que la configuració d'assaig ha estat manipulada en diverses ocasions per causes d'afluència al laboratori.

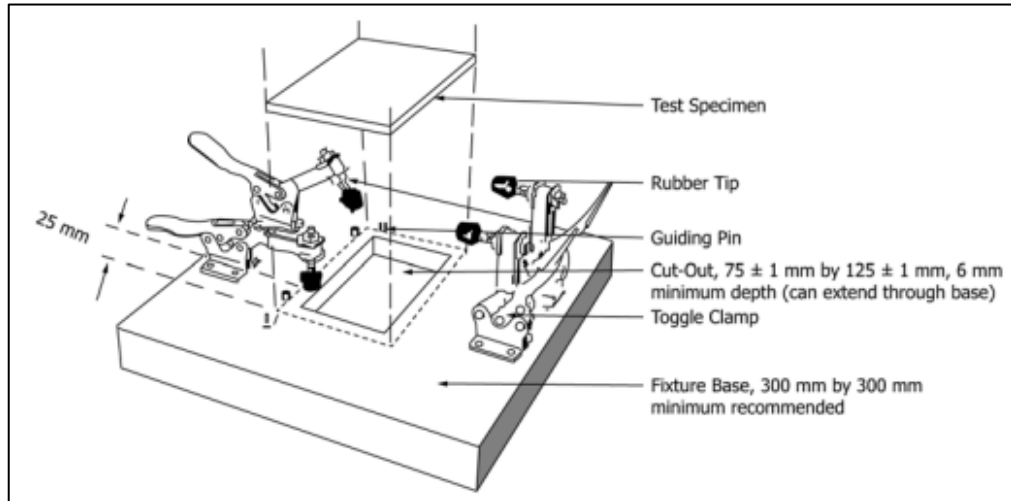


**Figura 20.** Morfologia substrat ASTM D 7136 [2]

- **Fixació del substrat:** A la figura 21, es mostra la fixació del substrat envers el marc. En ella es deixa un espai sota el substrat, per facilitar la deformació necessària al substrat, i es fixa aquest mitjançant 4 abraçadores de palanca al marc inferior. Tenint en compte la deformació més que probable del substrat, s'ha decidit també fer ús d'un marc inferior que ho permeti. Per a la fixació, s'han fet servir els mateixos punts de

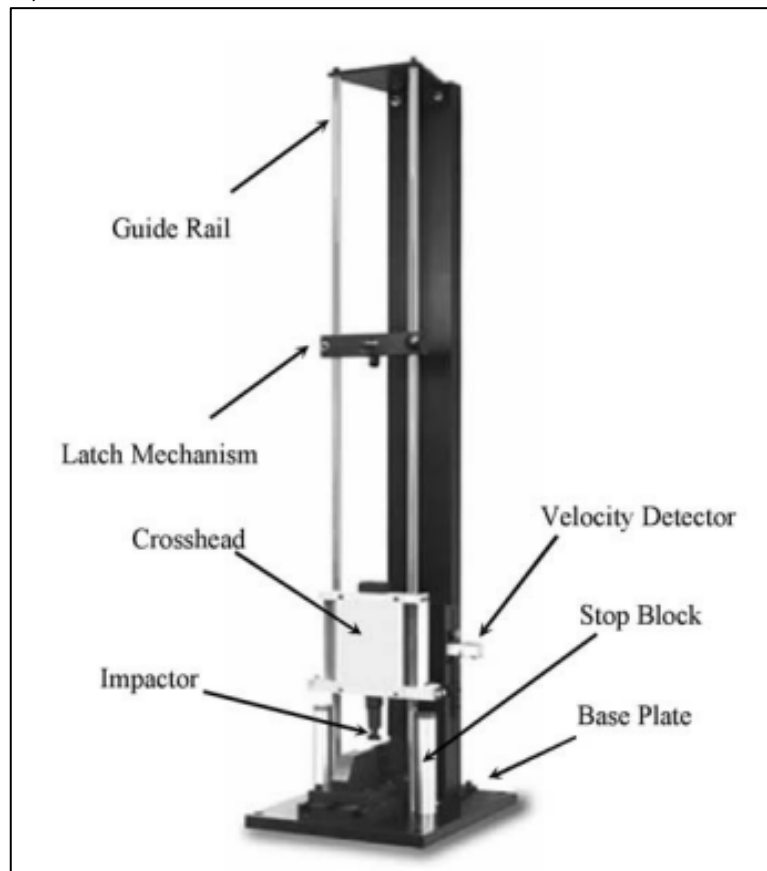


d'ancoratge però la no disponibilitat dels elements, ha comportat seguir un altre procediment de fixació que s'exposarà a continuació.



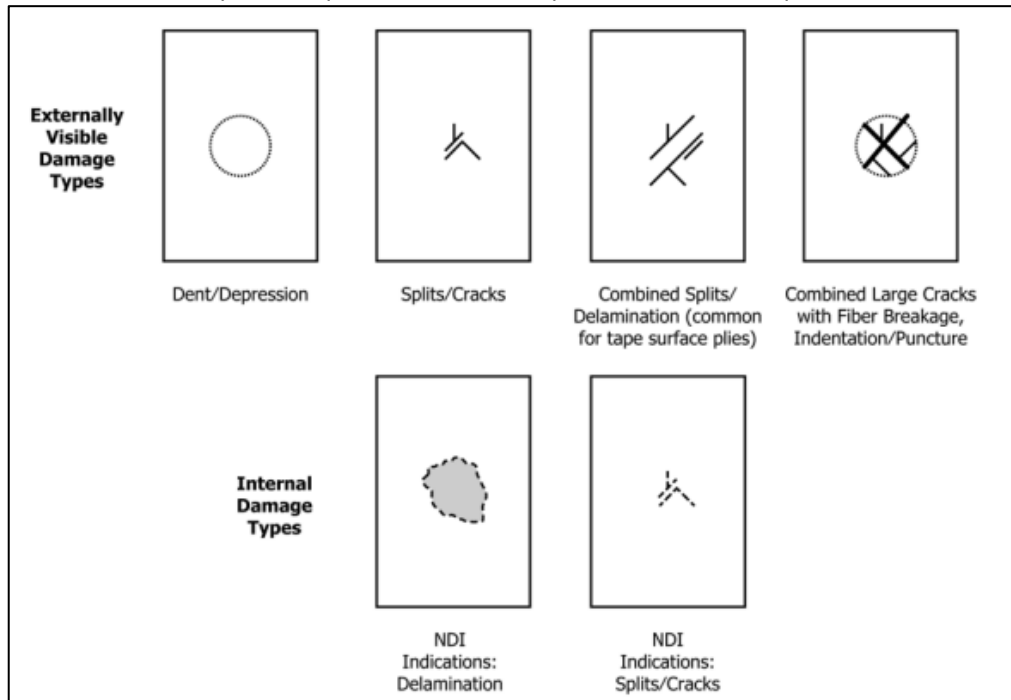
**Figura 21.** Fixació substrat ASTM D 7136 [2]

- **Procediment per a l'impacte:** A la figura 22, es mostra la configuració utilitzada per procedir a l'impacte. Mitjançant una estructura vertical amb un tub guia, es deixa caure l'impactador per mitjà d'un electroimant des de l'alçada desitjada. Per aconseguir un alt nivell de precisió, es farà ús també d'un element guia, com ara un tub per assegurar la verticalitat de l'impacte. Per deixar anar l'impactador, degut a la no disponibilitat d'un electroimant, es farà servir un sistema més bàsic.



**Figura 22.** Fixació substrat ASTM D 7136 [2]

- **Inspecció d'estat del substrat:** A la figura 23 s'exposen els tipus de fractura esperats en el substrat i la seva classificació. Per a l'execució d'aquest treball, també s'ha estandarditzat el tipus d'esquerda de manera que resultes senzill quantificar-la.

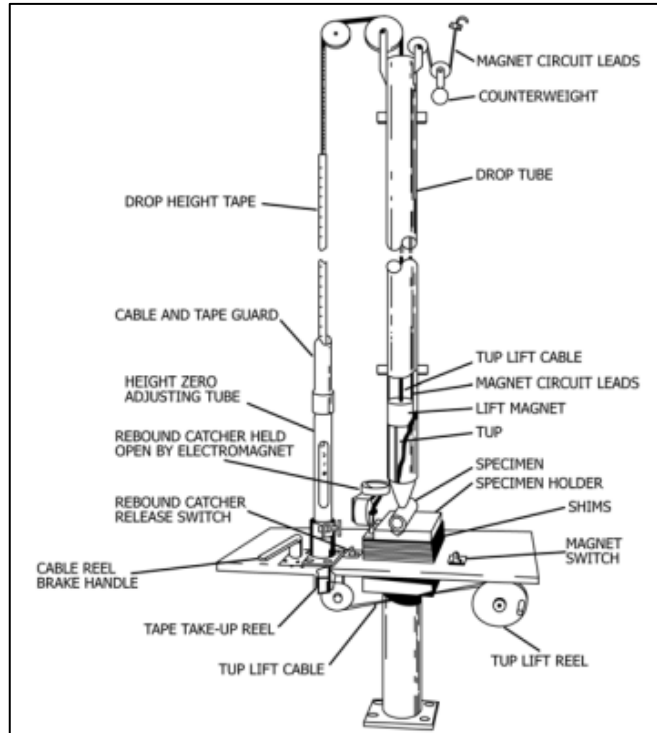


**Figura 23.** Dany substrat ASTM D 7136 [2]

- **ASTM D 2444 - ).** Determination of the Impact Resistance of Thermoplastic Pipe and Fittings by Means of a Tup

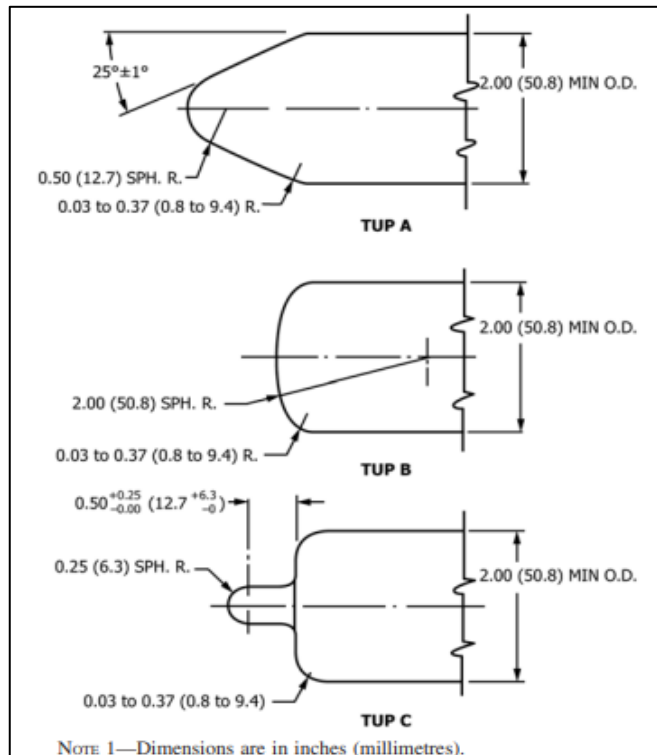
Aquesta metodologia internacional d'assaig, determina la resistència a impacte d'un termoplàstic, per fer-ho utilitza una metodologia molt similar a l'anterior, que ha ajudat a esclarir els següents paràmetres dels assajos d'aquest treball:

- **Procediment per a l'impacte:** A la figura 24, s'exposa la configuració utilitzada, on mitjançant un cable i diverses politges s'eleva l'impactador fins l'alçada desitjada. Això ha comportat la utilització d'una corda lligada al substrat que permetés la senzilla manipulació d'aquest des de la part inferior a la persona encarregada de mesurar l'alçada d'impacte.



**Figura 24.** Dany substrat ASTM D 2444 [1]

- **Morfologia de l'impactador:** En aquesta metodologia, a diferència de l'anterior, la morfologia de l'impactador pot variar en funció del substrat a estudiar com es pot observar a la figura 25. Això ha conduït a la realització d'uns assajos previs de calibratge per establir quin tipus d'impactador s'utilitzarà per deteriorar substrats com els que utilitzarem.



**Figura 25.** Dany substrat ASTM D 2444 [1]

### 3.5 Metodologia d'assaig

En aquest apartat s'exposa la metodologia d'assaig definitiva, on es tenen en compte components de l'assaig, procediment, comprovacions, etc.

Prèviament a explicar la metodologia seguida per a la realització dels assajos, es clarifica que, per a la fase d'adquisició de les dades, no s'ha utilitzat el procediment anteriorment utilitzat on es fa servir el microcontrolador Arduino i el programa LabView, ja que el disseny d'aquesta etapa s'ha fet en paral·lel a la execució de la fase experimental. Es per això que per a la captació de les dades s'ha fet servir una metodologia diferent que s'explica a continuació.

#### 3.5.1 Recursos disponibles

Amb la finalitat d'aproximar-nos a un estàndard internacional, sense obligatorietat d'una inversió econòmica molt gran, el primer pas ha estat conèixer els recursos disponibles per part dels grups d'investigació i els laboratoris.

Per al procés d'impacte, el grup de recerca *CATMech* disposa de:

- Un tub per guiar l'impactador envers el substrat, cilíndric de dimensions 1m x 42mm de diàmetre.
- Dos impactadors:
  - Un petit de dimensions 33.8 x 68.4mm i un pes de 446 g
  - Un gran de dimensions 43.2 x 398.0 mm i 755 g.
- Sergents com a elements de fixació.
- Perfils d'alumini per fer de bancada del sistema d'assaig.
- Cargols diversos incloent, barres roscades, femelles, cargols, volanderes, de totes les mètriques.
- Taller mecànic i banc de treball.

D'altra banda, per al procés d'adquisició de dades, el departament d'electrònica i el laboratori de projectes d'electrònica disposa de:

- Components elèctrics incloent, resistències, condensadors, amplificadors, plaques *proto-board*, etc.
- Font d'alimentació.
- Generador de funcions.
- Oscil·loscopi.

Posteriorment a conèixer els recursos disponibles i les característiques de les metodologies internacionals existents exposades a la secció 3.4, s'ha desenvolupat una metodologia d'assaig pròpia que s'exposa a continuació.

### 3.5.2 Configuració d'assaig

En aquesta secció es detalla pas per pas el procediment seguir per crear la configuració d'assaig utilitzada per a la fase experimental d'aquest treball.

1. S'utilitza un primer perfil d'alumini de dimensions 40mm x 40mm x 1m com a guia vertical al qual s'hi fixa el tub impactador per mitjà de 6 brides. Sobre el perfil vertical, als extrems s'hi fixen dos perfils de dimensions 40mm x 40mm x 40cm en posició horitzontal, aquests faran de nexes d'unió amb la biga on es suporta tot el conjunt per mitjà de 4 sergents. El conjunt es mostra a la figura 26.



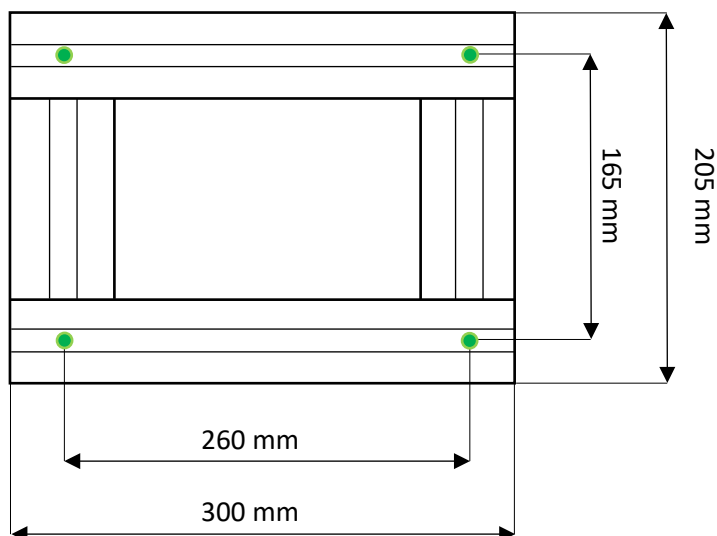
**Figura 26.** Disposició Vertical

2. L'impacte en el substrat s'haurà de produir en posició completament horitzontal i la cara no impactada del substrat no podrà trobar-se en contacte amb cap altre element. Per aconseguir-ho, en el pla horitzontal de l'assaig es disposaran quatre perfils d'alumini que formaran el marc que es mostra a la figura 27, sobre el qual s'ubicarà el substrat escollit.



**Figura 27.** Marc d'impacte

3. El substrat es fixarà al marc inferior mitjançant 4 cargols M8 i 4 femelles semicilíndriques ubicades a les quatre cantonades i a les ranures del perfil d'alumini. Tal com es mostra a la figura 28.



*Nota: Els 4 forats 4 perfils d'alumini tenen seccions de 40mm x 40mm*

**Figura 28.** Dimensions i punts d'ancoratge marc inferior

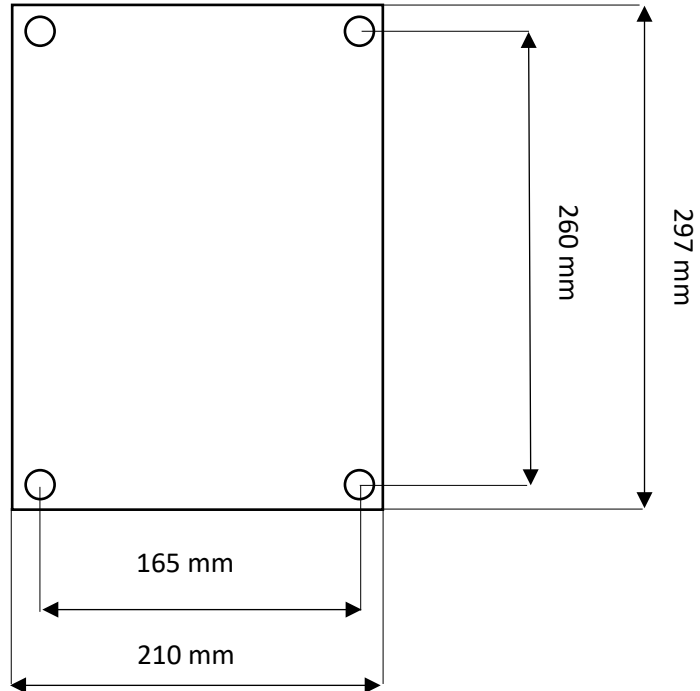
4. Una vegada fixats els components de la bancada, tot el conjunt a de ser sotmès a inspecció per assegurar anivellaments tant verticals com horitzontals, tal com es mostra a la figura 29.



**Figura 29.** Anivellament vertical

### 3.5.3 Preparació de les mostres

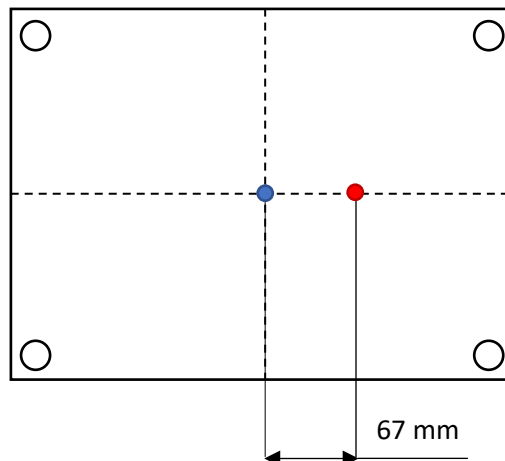
1. Per a una correcta preparació dels substrats a impactar, primerament es procedeix al tall del substrat per obtenir una mostra amb les dimensions que s'expliciten a la figura 30.



*Nota: Els 4 forats tenen un diàmetre passant de 7 mm, i l'espessor es constant de 2 mm*

**Figura 30.** Plànol substrat

2. Mitjançant un peu de rei i un regle s'assegurarà el compliment de les cotes explicitades en el plànol.
3. Fixació de l'element piezoelèctric mitjançant l'aplicació de dues gotes de cianoacrilat o similar directament sobre el substrat en el punt vermell segons indica la figura 31. També s'aplicarà un activador de curat, del qual s'aplicaran dues pulveritzacions sobre la cara del piezoelèctric que anirà en contacte amb el substrat. L'adhesió del conjunt ha de fer-se immediatament després de l'aplicació. Una vegada adherit, es deixarà el conjunt reposar per un temps mínim de 5 minuts. El punt d'impacte es l'indica en blau a la figura 31.



**Figura 31.** Ubicació piezoelèctric i punt d'impacte



4. Posteriorment, es fixarà el conjunt al marc mitjançant els cargols anteriorment mencionats, assegurant que el piezoelèctric queda ubicat a la part superior i amb ambdós cables accessibles per a ser manipulats, i s'assegurarà l'alineació del conjunt amb el tub mitjançant un nivell làser.

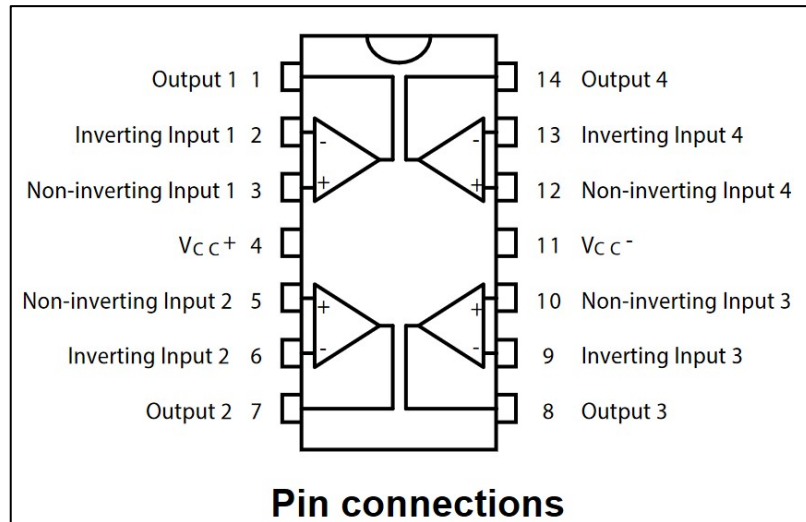


### 3.5.4 Muntatge del sistema de lectura i adquisició

Per a la correcta lectura de la senyal elèctrica produïda pel piezoelèctric, cal seguir detingudament les següents indicacions.

1. Seguint el procediment exposat anteriorment, el piezoelèctric queda situat a la part superior del conjunt, i amb ell, els borns positiu i negatiu que el componen. Aquests dos cables aniran connectats, al node on es troba la primera pota de la resistència R1, i a massa respectivament. Com s'indica a la figura 34.

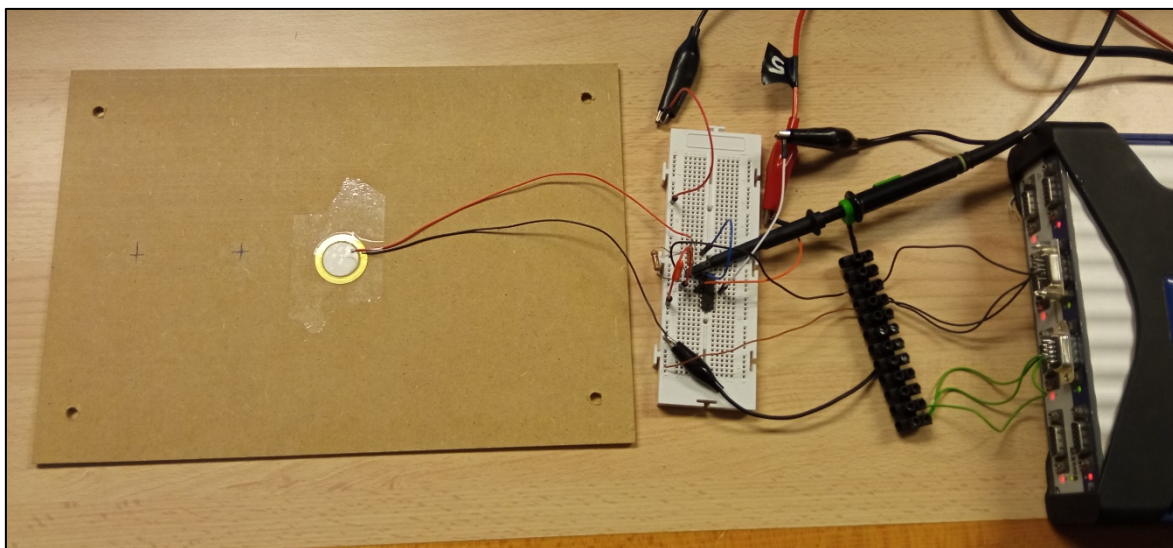
A la figura 32 es mostra la distribució dels pins de l'amplificador operacional utilitzat.



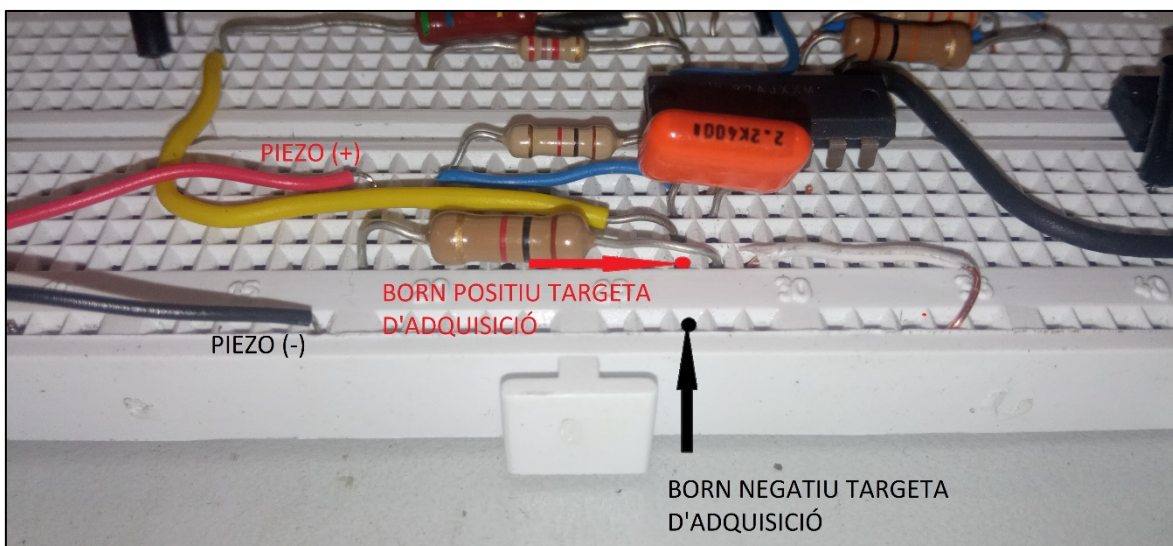
**Figura 32.** Pins TL084

2. El pin 3 de l'amplificador corresponent al terminal no inversor, anirà connectat directament a massa.
3. Els pins 4 i 11 de l'amplificador són els encarregats de proporcionar la tensió d'alimentació, fixada a  $\pm 10V$ . Valor escollit per limitar la tensió màxima proporcionable pel piezoelèctric, sabent que la targeta d'adquisició de dades només permet lectures en aquest rang. Per tant doncs els connectarem a una font de tensió, configurada en tipus *track*, per obtenir tensió de  $-10V$  fins a  $+10V$ . El born negatiu es connectarà al pin 11, el born corresponent al 0 es connectarà a la massa del circuit, i el born positiu al pin número 4.
4. A continuació, connectarem la targeta d'adquisició de dades al circuit, mitjançant dos cables connectats al nostre output que es troba, en borns del condensador, o bé entre el terminal d'output i la massa, ambdós escenaris són equivalents. Per a aquesta investigació la lectura s'ha executat entre el terminal de massa i l'output, per tant un cable de l'adquisidor anirà connectat a la massa i l'altre al pin 1 de l'amplificador.
5. Per acabar la targeta d'adquisició de dades anirà connectada a l'ordinador mitjançant un cable Ethernet i serà controlada per mitjà del programa CatManEasy.  
 Per a l'adquisició de dades s'ha fet servir una freqüència de mostreig de 19.2 kHz, ja que es la màxima que pot assolir la targeta, i s'ha comprovat que amb aquesta es compleix el teorema de Nyquist, mitjançant el qual donem validesa a l'estudi.

Finalment el conjunt format per piezoelèctric, circuit amplificador de càrrega i sistema d'adquisició de dades, es el que es mostra a les figures 33 i 34.



**Figura 33.** Vista general de la configuració

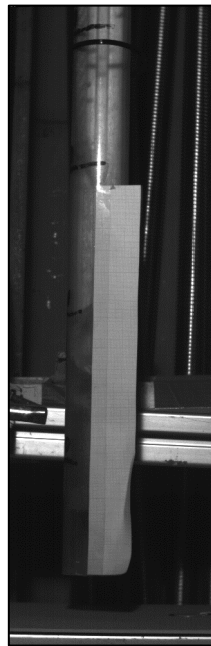


**Figura 34.** Piezoelèctric, amplificador de càrrega i adquiredor

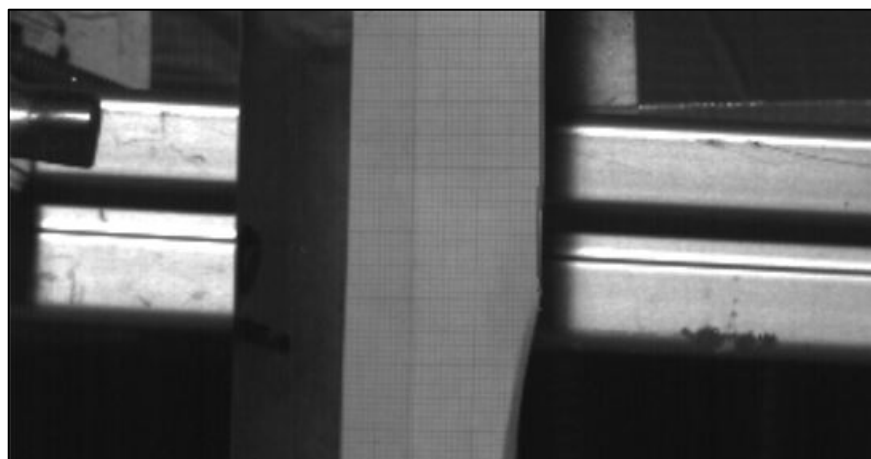
### 3.5.5 Muntatge del sistema de lectura de l'alçada de rebot

Una de les variables que ajudarà a tenir una visió global del comportament del substrat i de la dinàmica de l'impacte es l'alçada de rebot de l'impactador. En aquesta secció es detallarà el procediment per capturar aquesta dada mitjançant una càmera d'alta velocitat.

1. Primerament, s'ha retallat un fragment de paper mil·limetrat de dimensions 30mm x 260mm, constituït per dos colors que mostrin el màxim contrast possible. I s'adherirà a la part exterior del tub d'impacte, de manera que s'ubiqui l'inici del paper a una distància coneguda en centímetres amb la màxima precisió possible, per facilitar la posterior lectura a través de la càmera. En aquest cas s'ha utilitzat cinta adhesiva per procedir a l'adhesió. Es mostra una imatge del conjunt a la figura 35 i una imatge de la precisió en l'obtenció de l'alçada de rebot a la figura 36.



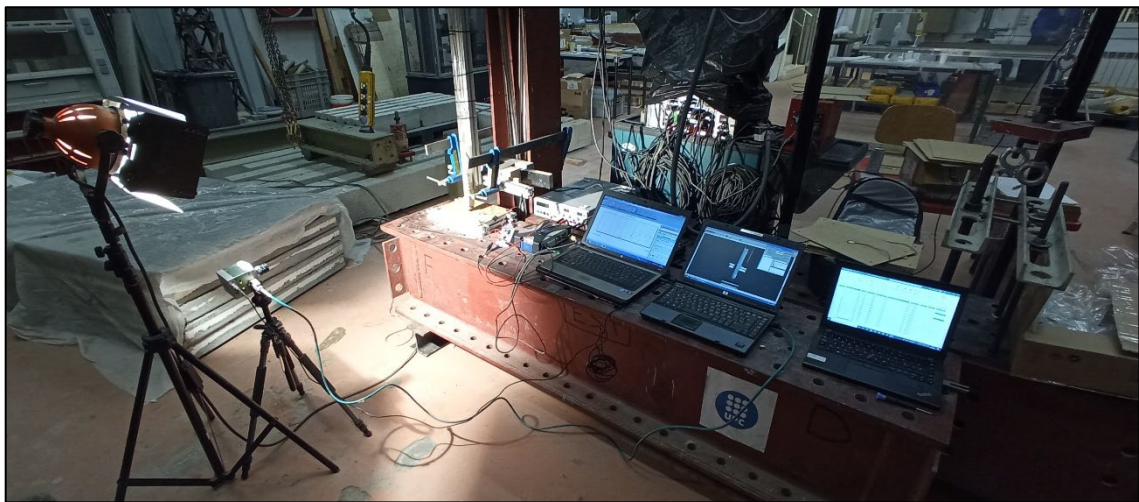
**Figura 35.** Paper mil·limetrat ubicat al tub



**Figura 36.** Resolució del paper mil·limetrat

2. Posteriorment i abans de procedir a la gravació, s'ubica un focus que il·lumina tot el conjunt bancada-substrat-paper mil·limetrat, per ajudar a la correcta captació de la imatge, ja que requerim una elevada il·luminació per diferenciar els les marques del paper mil·limetrat. Per a la captació de la imatge, s'ha utilitzat una càmera d'alta velocitat Mikrotron Motion Blitz Cube4. Aquesta càmera es connecta a l'ordinador amb connexió Ethernet i es controla fent servir el programa MotionBlitz Cube4.
3. La captació d'imatge s'inicia abans de començar l'assaig, ja que sabem que la memòria que conté només emmagatzema els últims 7 segons filmats. Una vegada realitzat l'impacte, per tant, disposarem d'un temps limitat d'aquests 7 segons per detenir la gravació sense perdre cap fotograma.

A la figura 37 es mostra una imatge de tot el conjunt encarregat de l'execució dels assajos on es pot veure el sistema d'adquisició d'alçada de rebot format per càmera, focus, paper mil·limetrat i el corresponent ordinador per l'adquisició.



**Figura 37.** Set-up d'assajos

### 3.5.6 Comprovació d'equivalència entre targeta d'adquisició i Oscil·loscopi.

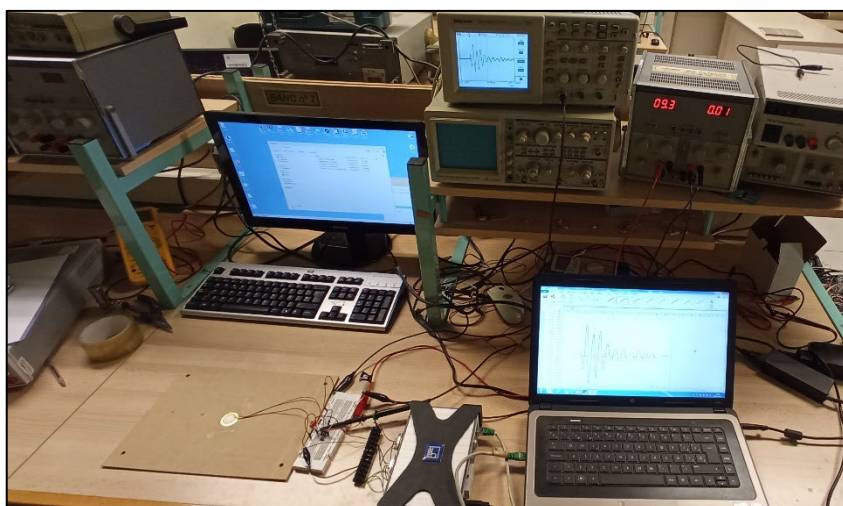
L'execució i comprovació del circuit elèctric que compon aquest treball, s'ha dut a terme al laboratori d'electrònica de projectes, on la resposta del circuit es captava sempre amb l'ajut d'un oscil·loscopi.

S'han executat assajos a mode de prova impactant la taula amb una moneda per comprovar la correcta lectura del piezoelèctric, i l'oscil·loscopi presentava sempre una alta sensibilitat i proporcionava una lectura molt neta.

Degut a les limitacions de mobilitat d'aquest hardware, sumat a la utilització d'una targeta d'adquisició de dades en la aplicació futura, s'ha realitzat un assaig de comprovació d'equivalència entre l'oscil·loscopi i la targeta d'adquisició de dades, amb tal de verificar que la lectura obtinguda amb ambdós sistemes es absolutament equivalent. A continuació s'exposa l'assaig de comprovació.

- Recreació del connexionat que s'utilitzarà per als assajos experimentals. Tenint en compte tots els paràmetres com alimentació de l'amplificador operacional, connexionat a la targeta d'adquisició i utilització del mateix software i no variació dels components del circuit entre d'altres.
- Connexionat en paral·lel de la sonda de l'oscil·loscopi a la sortida del circuit.
- Fixació superficial del piezoelèctric a un substrat que recrea l'utilitzat en els assajos experimentals.
- Activació simultània dels dos softwares d'adquisició per a la posterior comparació de senyals.
- Impacte sobre el substrat sense quantificació exacta amb l'ús de la mà i utilitzant com a impactador una moneda de 2€.
- Comparació dels senyals obtinguts de manera visual utilitzant variables com: Nombre de pics, aparició de soroll i morfologia.

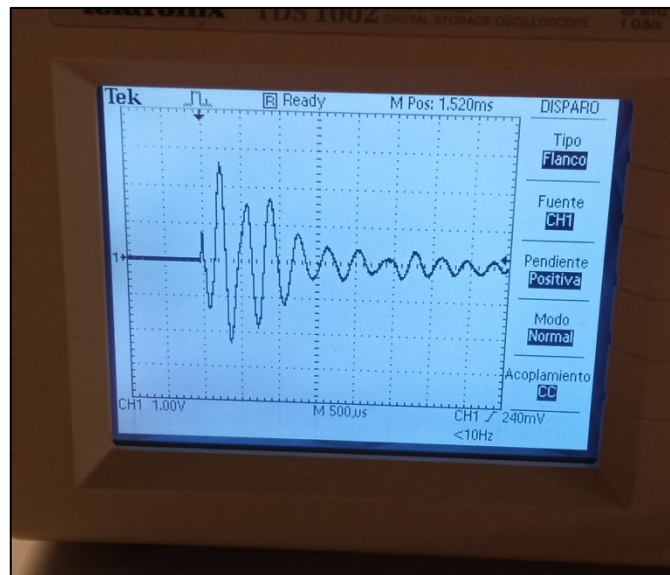
El procés de comprovació ha resultat satisfactori i ambdós sistemes resulten totalment equivalents com es pot observar a les figures 38, 39, 40 i 41.



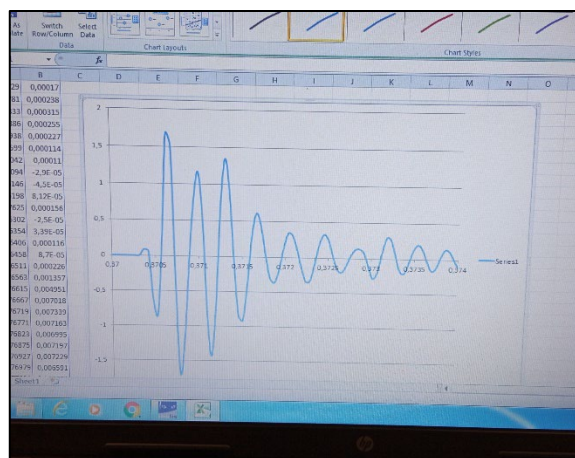
**Figura 38.** Conjunt connectat per comprovació



**Figura 39.** Font d'alimentació amplificador de càrrega.



**Figura 40.** Lectura Oscil·loscopi Comprovació



**Figura 41.** Lectura targeta d'adquisició comprovació

### 3.5.7 Execució d'assaig

Degut a la complexitat de l'entorn i a l'elevat número de aparells que componen aquesta metodologia, seran necessàries dues persones per assegurar la correcta execució dels assajos.

A continuació es detalla el procediment seguit per executar cadascun dels assajos realitzats per dur a terme aquest treball.

1. Primerament, i sempre després d'haver assegurat el funcionament de tots els subapartats anteriors, es realitzarà una comprovació de que els dos sistemes d'adquisició (de senyal i d'alçada de rebot) estan funcionant correctament. Per a la comprovació de l'adquiridor es realitzaran cops suaus amb el dit sobre el substrat i es verificarà que el canal connectat el circuit, detecta un determinat voltatge. Per a la comprovació del sistema de filmació, serà prou amb desplaçar qualsevol cosa per davant de l'objectiu i comprovar que aquest es veu de forma clara, enfocat i sense talls.
2. Una vegada realitzades les pertinents comprovacions, el primer integrant, s'ubicarà pròxim a la zona d'impacte i amb l'ajuda d'un metre i les marques del tub, posicionarà la part més baixa de l'impactador a la alçada corresponent a l'assaig que es vulgui realitzar. Una vegada en aquesta posició, es comunicarà amb el segon integrant per poder procedir a l'execució de l'impacte.
3. El segon integrant, iniciarà la gravació del sistema d'adquisició de dades i ho comunicarà al primer integrant.
4. El primer integrant deixa anar la corda que subjecta l'impactador, sempre lliscant per damunt del sergent superior.
5. El segon integrant, atura la lectura de l'adquiridor una vegada ha transcorregut l'impacte, i posteriorment i des de l'altre ordinador, atura el procés de filmació de la càmera d'alta velocitat.
6. Per últim es farà una comprovació de que les dades han estat enregistrades de manera correcta i es guardarà el fitxer corresponent, amb el nom del pertinent codi d'assaig, per mantenir la traçabilitat sobre els paràmetres de l'assaig realitzat.

### 3.6 Obtenció i post-processat de dades

Per a l'estudi dels resultats obtinguts es tindran en compte les següents variables.

- Voltatge obtingut. Aquest es mesurarà directament amb l'ajut de la targeta d'adquisició de dades, connectada al circuit elèctric. Els resultats Obtinguts a una freqüència de mostreig de 19200, els proporciona el programa *CatManEasy*, en format de fitxer Excel que inclou dues columnes, una per al temps, i l'altre per al voltatge amb una precisió de  $1 \cdot 10^{-17}$  V. D'aquest voltatge obtingut, els valors que farem servir com a resultats, seran els valors pics dels senyals. Tan el pic positiu com el negatiu per quantificar el voltatge màxim generat.
- Energia del senyal. Aquesta energia s'obté a partir de la lectura de voltatge, sabent que l'energia d'un senyal es defineix com la integral del voltatge al quadrat. Per tant doncs, mitjançant el mateix fitxer Excel de voltatge, aquest s'eleva al quadrat i es realitza la integral del senyal durant els primers 0.02s des que es produeix l'impacte. Aquest valor ens dona una visió general de la quantitat d'electricitat generada per el piezoelèctric.
- Morfologia dels senyals obtinguts. Es creu que la forma del senyal obtingut, pot caracteritzar l'esdeveniment d'impacte que ha ocorregut.

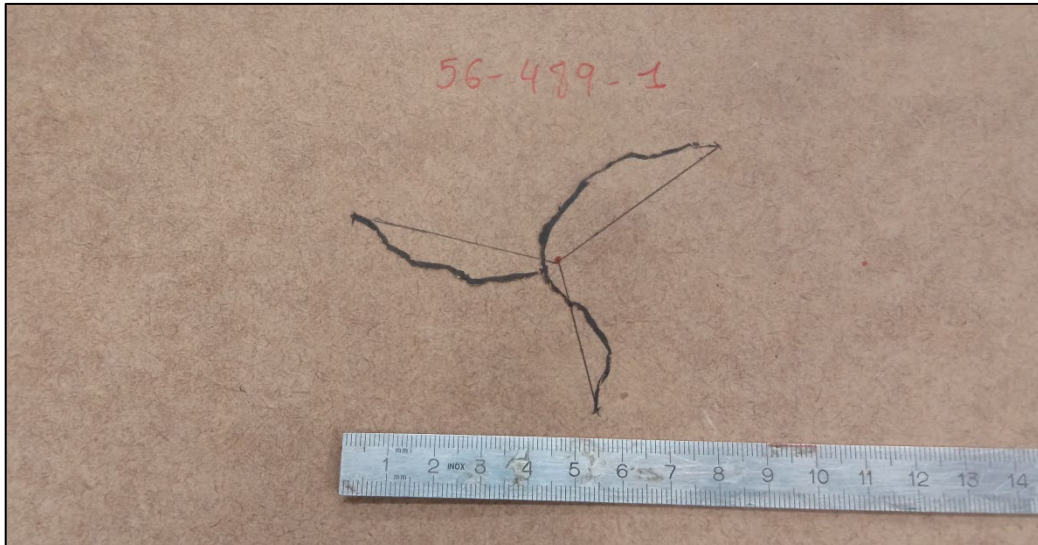
Després d'observar els senyals obtinguts durant la fase experimental, es veu clarament, que el voltatge que obtenim, presenta una fase d'excitació inicial molt clara que dura aproximadament 0.015 segons. Posterior a aquesta fase, existeix un voltatge inferior que encara presenta oscil·lacions i que es degut a les vibracions del substrat posterior a l'impacte. Per valorar doncs l'impacte que ha aparegut amb la intenció de quantificar el dany, s'ha escollit estudiar un període de 0.02s des de l'aparició de l'impacte per obtenir tant la primera fase d'uns 0.015 segons (la mes important) així com un excedent de 0.005 per si apareix un impacte petit amb elevat temps d'impacte o per si la oscil·lació post-impacte pogués tenir un paper rellevant.

Per tant es generaran els gràfics de tots els senyals durant els primers 0.02s des de que es produeix l'impacte, amb la finalitat de comparar-los entre ells mitjançant superposició i intentar trobar un patró de comportament que reguli la resposta elèctrica segons l'impacte aplicat i el dany generat. Seguint aquests primers 3 punts, a l'**Annex 2** del treball s'inclouen tots els resultats individuals dels assajos en format PDF, contenen cadascun d'ells una taula de dades amb 4 columnes, dedicades a l'instant de temps en que es produeix l'impacte, al voltatge generat, i les dues últimes al quadrat del voltatge i a l'àrea entre dos punts amb la finalitat d'integrar el senyal.

- Dany produït en el substrat. Aquest estat del substrat es quantificarà en funció de la esquerdada ocasionada en el substrat. Una vegada assajada la mostra, s'inspecciona el substrat per la cara posterior i amb un marcador es re-segueix el recorregut de l'esquerda. Posteriorment es simplifica la morfologia de l'esquerda a línies rectes i es sumen els recorreguts de totes les esquerdes ocasionades, obtenint finalment una longitud total d'esquerda per cada substrat, que quantifica quin es l'estat després de l'impacte. A la figura 42 es mostra un exemple d'obtenció d'aquest resultat.

A l'**Annex 1** d'aquest treball, es poden observar totes les imatges dels substrats assajats i les corresponents esquerdes resseguides, en cas de que hi hagin aparegut.





**Figura 42.** Esquerda simplificada

- Alçada de rebot. Com s'exposa en el paràgraf de metodologia, aquesta variable es mesurada amb l'ajut d'una càmera d'alta velocitat i fotograma per fotograma es revisa quina es l'alçada màxima assolida per l'impactador. Amb la finalitat de quantificar la quantitat d'energia que el substrat es capaç de retornar a l'impactador.

Totes les variables que s'han mencionat, s'han recopilat de manera individual i per separat, però seran compilades un sol full de resultats generals.



## 4 Síntesi de resultats

En aquest apartat es detallen tots els resultats obtinguts dels assajos realitzats, i s'exposen els anàlisis pertinents que tractaran de determinar quina relació existeix entre totes les variables exposades a l'apartat anterior amb la fi de justificar la viabilitat de l'aplicació de materials piezoelèctrics com a sensors per a la previsió de dany en impacte.

La primera de les accions a realitzar ha estat resumir tots els resultats obtinguts en un mateix full, per intentar buscar relacions directes existents entre ells.

A les taules 6, 7 i 8 s'exposa el full de resultats on s'expliciten totes les dades obtingudes de cadascun dels assajos.

#### 4.1 Sumari de resultats obtinguts de la part experimental

TEST Nº	CODI ASSAIG	E. D'IMPACTE (J)	V. MÀXIM (V)		V. MÍNIM (V)		ENERGÍA ELÈCTRICA		ALÇADA REBOT (mm)		N. ESQUERDES	L1	L2	L3	L4	L5	L. ESQUERDA (mm)			
1	05-489-1	0.24	1.0772	1.0171	-1.0853	-0.9890	0.001684	0.001407	17	19.5	0	0					0	0.0		
2	05-489-2		0.9571		-0.8927		0.001130		22		0	0					0			
3	09-489-1	0.45	1.4105	1.3162	-0.9637	-1.1068	0.002258	0.002532	35	33.5	0	0					0	0.0		
4	09-489-2		1.2219		-1.2498		0.002807		32		0	0					0			
5	19-489-1	0.89	2.1706	2.3695	-2.0369	-1.8928	0.004713	0.005151	63	62.5	1	9					9	4.5		
6	19-489-2		2.5683		-1.7487		0.005589		62		0	0					0			
7	28-489-1	1.34	2.9811	2.5471	-2.4827	-1.8227	0.009318	0.007137	77	76.5	3	23	9	18			50	51.0		
8	28-489-2		2.1131		-1.1627		0.004956		76		3	21	16	15			52			
9	28-489-1i	1.34	1.7615	2.0234	-2.1282	-3.2109	0.005473	0.010147	86	88.5	3	21	24	18			63	64.0		
10	28-489-2i		2.2853		-4.2937		0.014821		91		4	22	22	17	4		65			
11	28-489-1d-1	1.34	2.4862	2.3030	-3.0133	-3.1826	0.007302	0.008508	105	101	1	35					35	43.0		
	28-489-1d-2		2.1197		-3.3519		0.009714													
12	28-489-2d-1		2.7153	2.6340	-5.0067	-3.9287	0.012020	0.059460	97		3	25	19	7						51
	28-489-2d-2		2.5526		-2.8507		0.106900													
13	17-799-1	1.34	2.5652	2.2761	-2.2619	-2.0865	0.005927	0.005967	39	49	3	25	28	31			84	71.5		
14	17-799-2		1.9869		-1.9110		0.006006		59		3	14	25	20			59			
15	37-489-1	1.79	2.6388	3.4265	-3.3335	-3.1300	0.011885	0.011598	63	63.5	3	41	18	30			89	79.0		
16	37-489-2		4.2141		-2.9264		0.011311		64		3	23	30	16			69			

Taula 6. Sumari de resultats 1

TEST Nº	CODI ASSAIG	ENERGÍA D'IMPACTE (J)	V. MÀXIM (V)		V. MÍNIM (V)		ENERGÍA ELÈCTRICA		ALÇADA REBOT (mm)		N. ESQUERDES	L1	L2	L3	L4	L5	L. ESQUERDA (mm)	
17	37-489-1i	1.79	2.4831	2.1477	-4.1049	-3.5974	0.010908	0.008529	60	59	3	41	38	13			92	104.5
18	37-489-2i		1.8122		-3.0900		0.006151		58		3	31	20	24	42		117	
19	37-489-1d-1	1.79	1.7600	2.2445	-3.1158	-4.2478	0.007416	0.070388	78	87.5	3	30	34	35			99	93.5
	37-489-1d-2		2.7289		-5.3798		0.133360											
20	37-489-2d-1		3.1079	3.3862	-3.1640	-2.6873	0.013111	0.011092	97		5	27	12	19	20	10	88	
	37-489-2d-2		3.6645		-2.2106		0.009072											
21	23-799-1	1.79	2.3576	1.9972	-2.0676	-1.8298	0.005045	0.004134	42	37.5	4	31	22	16	25		94	109.0
22	23-799-2		1.6368		-1.5920		0.003224		33		5	16	36	10	30	32	124	
23	47-489-1	2.23	3.7529	3.4641	-2.8681	-2.8231	0.011886	0.010921	57	56	4	40	39	29	34		142	121.0
24	47-489-2		3.1753		-2.7781		0.009957		55		4	19	37	35	9		100	
25	28-799-1	2.23	3.1120	2.7256	-4.4179	-3.6196	0.014609	0.011532	43	43	2	59	52				111	129.0
26	28-799-2		2.3392		-2.8213		0.008455		43		4	45	32	35	35		147	
27	56-489-1	2.67	5.6712	4.7638	-3.8122	-3.3526	0.025734	0.020605	70	68.5	3	49	44	34			127	114.0
28	56-489-2		3.8563		-2.8930		0.015476		67		4	32	30	32	7		101	
29	34-799-1	2.67	6.9168	5.0987	-6.7118	-6.7135	0.038057	0.030926	36	30	4	44	38	36	46		164	172.5
30	34-799-2		3.2805		-6.7152		0.023795		24		5	54	49	49	22	7	181	

Taula 7. Sumari de resultats 2

TEST Nº	CODI D'AS-SAIG	ENERGÍA D'IMPACTE (J)	V. MÀXIM (V)		V. MÍNIM (V)		ENERGÍA ELÈCTRICA		ALÇADA REBOT (mm)		N. ESQUERDES	L1	L2	L3	L4	L5	L. ESQUERDA (mm)	
31	65-489-1	3.12	4.0775	5.7848	-2.6579	-5.4361	0.012486	0.031846	27	34.5	5	51	46	12	47	9	165	158.3
32	65-489-2		6.8861		-7.3672		0.034635 <sup>1)</sup>		42		3	43	43	32			118	
33	65-489-3		6.3909		-6.2834		0.048417		2)		4	75	45	19	53		192	
34	40-799-1	3.12	3.5966	3.2955	-3.5702	-3.4657	0.020888	0.015512	43	39.5	5	75	26	32	33	61	227	243.5
35	40-799-2		2.9944		-3.3613		0.010138		36		4	66	67	58	69		260	
36	86-799-1	6.74	5.4540	5.6414	-4.6768	-5.8244	0.054880 <sup>1)</sup>	0.058264	0	0	5	85	60	68	92	30	335	301.5
37	86-799-2		5.8288		-6.9721		0.058264		0		5	55	65	60	45	43	268	

**Taula 8.** Sumari de resultats 3

<sup>1)</sup> Ha existit des-adhesió del piezoelèctric posteriorment a l'impacte, la corba de resposta canvia i pot existir una lleugera influència en la lectura de la energia del senyal. Per això es crea el tercer espècimen i tenim 1 resultat mes que els assajos del planning.

<sup>2)</sup> El sistema d'enregistrament no ha funcionat correctament i no tenim dades sobre l'alçada de rebot.

## 4.2 Evolució de les variables obtingudes de l'impactador petit

En aquest apartat es realitza un seguiment detallat de l'evolució dels resultats dels assajos comuns entorn a l'impactador petit, a mesura que es va augmentant l'energia d'impacte. A la taula 9 es mostren els resultats obtinguts en tots els assajos entorn l'impactador petit.

TEST Nº	CODI D'AS- SAIG	E. IMPACTE (J)		VOLTATGE MÀXIM (V)		VOLTATGE MÍNIM (V) (-)		ENERGÍA ELÈCTRICA		REBOT (mm)		LONGITUD D'ESQUERDA (mm)	
1	05-489-1	0.24	0.24	1.0772	1.0171	1.0853	0.9890	0.001684	0.001407	17	19.5	0	0.0
	05-489-2	0.24		0.9571		0.8927		0.001130		22		0	
2	09-489-1	0.45	0.45	1.4105	1.3162	0.9637	1.1068	0.002242	0.002525	35	33.5	0	0.0
	09-489-2	0.45		1.2219		1.2498		0.002808		32		0	
3	19-489-1	0.89	0.89	2.1706	2.3695	2.0369	1.8928	0.001887	0.003738	63	62.5	9	4.5
	19-489-2	0.89		2.5683		1.7487		0.005589		62		0	
4	28-489-1	1.34	1.34	2.9811	2.5471	2.4827	1.8227	0.009318	0.007014	77	76.5	50	51.0
	28-489-2	1.34		2.1131		1.1627		0.004709		76		52	
8	37-489-1	1.79	1.79	2.6388	3.4265	3.3335	3.1300	0.011885	0.011598	63	63.5	89	79.0
	37-489-2	1.79		4.2141		2.9264		0.011311		64		69	
12	47-489-1	2.23	2.23	3.7529	3.4641	2.8681	2.8231	0.011886	0.010921	57	56	142	121.0
	47-489-2	2.23		3.1753		2.7781		0.009957		55		100	
14	56-489-1	2.67	2.67	5.6712	4.7638	3.8122	3.3526	0.025734	0.020605	70	68.5	127	114.0
	56-489-2	2.67		3.8563		2.8930		0.015476		67		101	
16	65-489-1	3.12	3.12	4.0775	5.7848	2.6579	5.4362	0.012486	0.023560	27	34.5	165	158.0
	65-489-2	3.12		6.8861		7.3672		0.034635 <sup>1)</sup>		42		118	
	65-489-3	3.12		6.3909		6.2834		0.048417		2)		192	
18	86-799-1	6.74	6.74	5.4540	5.6414	4.6768	5.8245	0.054880 <sup>1)</sup>	0.058264	0	0	335	301.5
	86-799-2	6.74		5.8288		6.9721		0.058264		0		268	

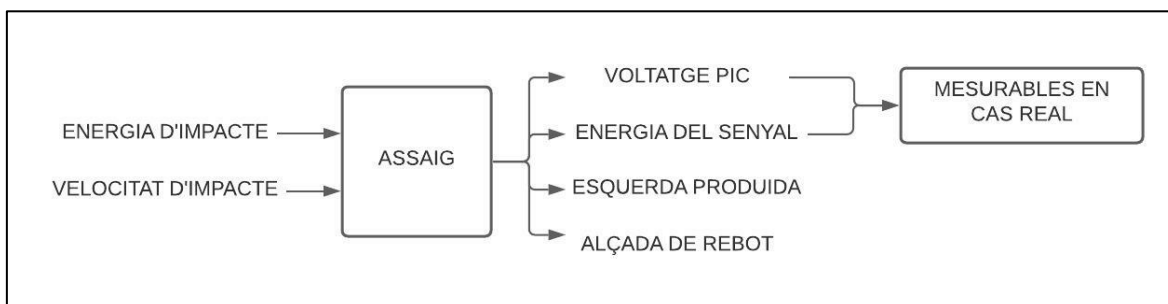
**Taula 9.** Sumari de resultats impactador petit

<sup>1)</sup> Ha existit des-adhesió del piezoelèctric posteriorment a l'impacte, la corba de resposta canvia i pot existir una lleugera influència en la lectura de la energia del senyal.

<sup>2)</sup> El sistema d'enregistrament no ha funcionat correctament i no tenim dades sobre l'alçada de rebot.

Com es pot observar, l'impactador de 489g de pes, impactarà el substrat en un rang d'energies compreses entre 0,24 J i 3,12J. Finalment s'ha realitzat un últim assaig amb 6,74J per veure la reacció del piezoelèctric i del circuit elèctric, que en primera instància no es tindrà en compte per als estudis que es mostren a continuació, ja que es un valor excessivament aïllat de la resta. Un estudi posterior esclarirà si aquest últim assaig segueix una relació lineal amb la resta o si per contra succeeix quelcom diferent.

A la figura 43 es mostra un diagrama de l'assaig, on es s'observen les variables d'entrada que el componen, les variables de sortida, i si aquestes variables de sortida serien utilitzables en una situació real.



**Figura 43.** Control de les variables del procés

En aquesta secció, s'estudiarà l'evolució dels impactes realitzats amb l'impactador petit, on l'evolució de l'energia d'impacte, de la velocitat d'impacte i conseqüentment de la percussió produïda en el xoc es constant i proporcional. Per tant doncs totes les gràfiques es realitzaran utilitzant com a variable d'entrada l'energia d'impacte.

#### 4.2.1 Evolució dels voltatges pic amb l'augment de l'energia d'impacte

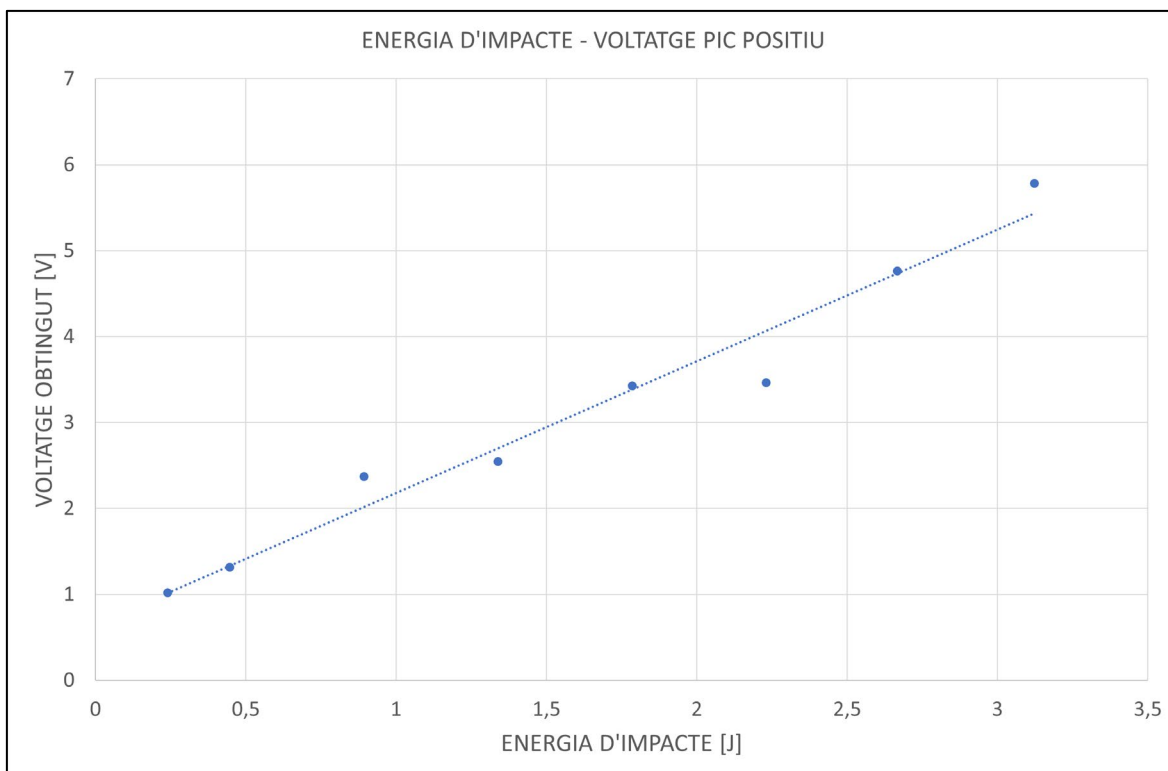
El primera cas a estudiar ha estat la resposta del sistema en termes de voltatges pic. A les figures 44 i 45 es poden observar dos gràfics que mostren l'evolució del voltatge pic positiu i negatiu, amb l'augment gradual de l'energia d'impacte. S'utilitzen valors mitjans dels dos espècimens assajats per cada energia d'impacte.

**S'observa clarament una evolució lineal dels voltatges pic tant positiu com negatiu, amb l'increment lineal de l'energia d'impacte, fins a l'energia màxima que considerarem en aquest apartat.**

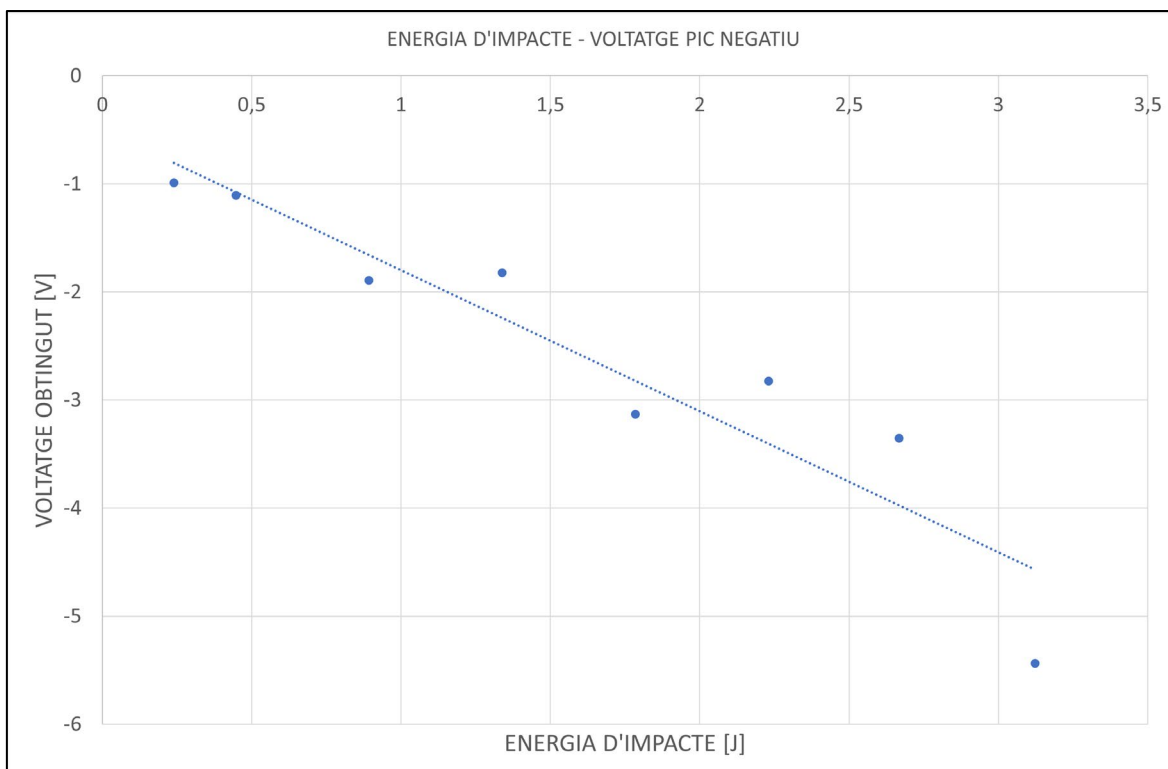
Aquests voltatges pic, acostumen a establir-se molt a prop de l'instant d'impacte, aproximadament entre els 2ms i els 3ms posteriors a l'impacte. I observant la morfologia de les gràfiques com s'exposarà a la secció 4.4, representen de manera bastant correcta la magnitud de l'impacte rebut, i a més poden ser captats amb un enregistrament de dades considerablement petit.

D'altra banda, com es mostrarà mes endavant, l'evolució del voltatge per a energies més elevades que la última enregistrada en aquesta secció, no sembla continuar incrementant, i sembla establir el seu límit entorn als 5-7V independentment de l'agressivitat de l'impacte generat.

Es per això que per a les comparacions en les seccions 4.2.3 i 4.2.4, es compararan la resta de variables (alçada de rebot i longitud d'esquerda) amb l'energia elèctrica del senyal i no amb els valors dels voltatges pic.



**Figura 44.** Evolució del voltatge pic positiu



**Figura 45.** Evolució del voltatge pic negatiu



#### 4.2.2 Evolució de l'energia del senyal amb l'augment de l'energia d'impacte

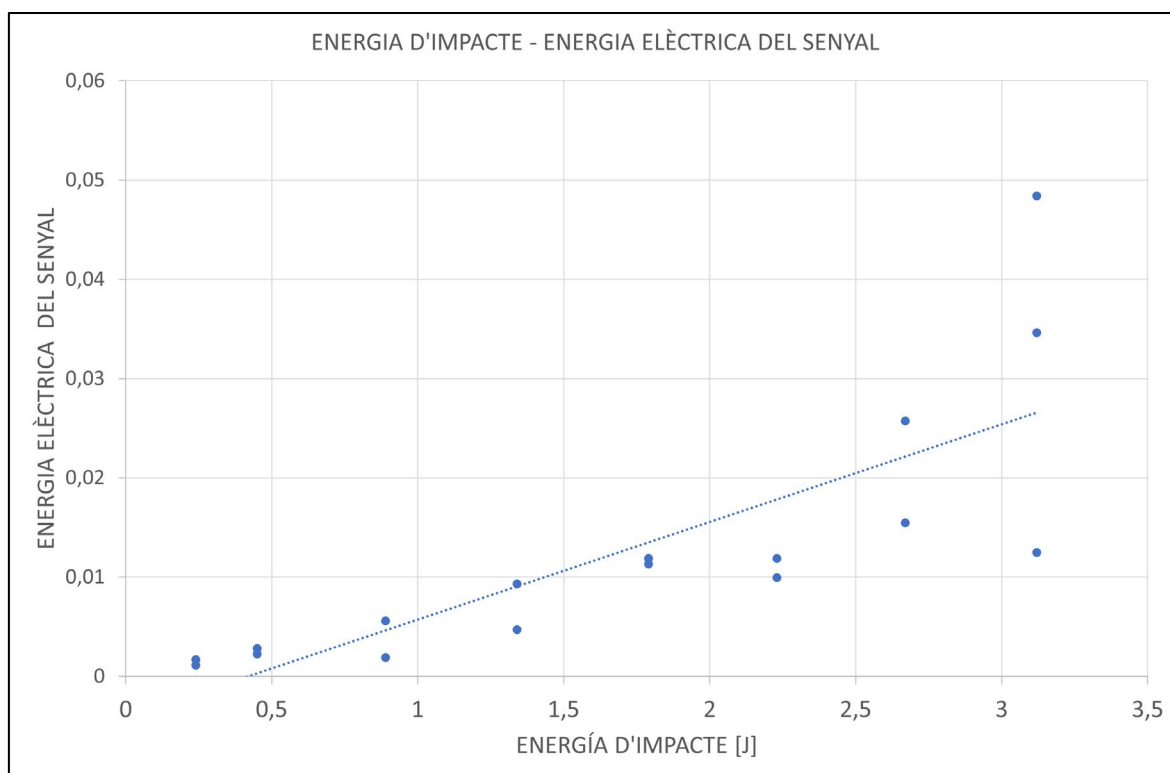
En aquesta secció s'ha generat una gràfica, que s'exposa a la figura 46, on s'enfronta l'evolució de l'energia d'impacte amb la quantitat d'energia elèctrica que proporciona el senyal. S'observa una relació lineal especialment quan les energies són més baixes. **A mesura que l'energia d'impacte augmenta, la fractura del substrat també ho fa, afectant així la quantitat d'energia transmesa entre l'impactador i el substrat, i consegüentment interferint en la lectura piezoelèctrica.**

A partir de les dues últimes energies d'impacte (2,67 i 3,12) els punts comencen a desviar-se de la regressió lineal.

A més a partir de l'última alçada comencem a tenir problemes de des-adherència del piezoelèctric ja que el substrat presenta una elevada deformació prèvia a la ruptura.

Per aquesta comparació en concret, s'han utilitzat els valors individuals dels espècimens amb la finalitat de mostrar que per a energies d'impacte elevades, l'energia elèctrica del senyal comença a adquirir certa variabilitat que podria complicar la determinació de l'impacte ocorregut en cas que aquest sigui de magnitud elevada.

Caldria realitzar més assajos per determinar si efectivament aquesta variabilitat augmenta amb l'augment de l'energia d'impacte o si ha estat un esdeveniment puntual.



**Figura 46.** Evolució de l'energia del senyal amb valors individuals

#### 4.2.3 Evolució de l'alçada de rebot amb l'augment de l'energia d'impacte

El següent pas a realitzar, ha estat enfrontar aquesta energia elèctrica que ens proporciona el senyal generat per el piezoelèctric, amb l'evolució de les alçades de rebot per a cadascuna de les energies d'impacte. El gràfic obtingut es mostra a la figura 47.

**S'observa que el creixement de l'energia elèctrica obtinguda es considerablement lineal. De la mateixa manera, l'alçada de rebot, augmenta a l'inici amb l'augment de l'energia d'impacte obtenint el seu màxim a l'energia de 1,34J, però tot seguit inicia un decrement. Aquest es**

clarament degut a la fallida del substrat, que comença a presentar esquerdes i per tant deixa d'actuar en el rang elàstic i de transmetre energia a l'impactador per al seu consegüent rebot.

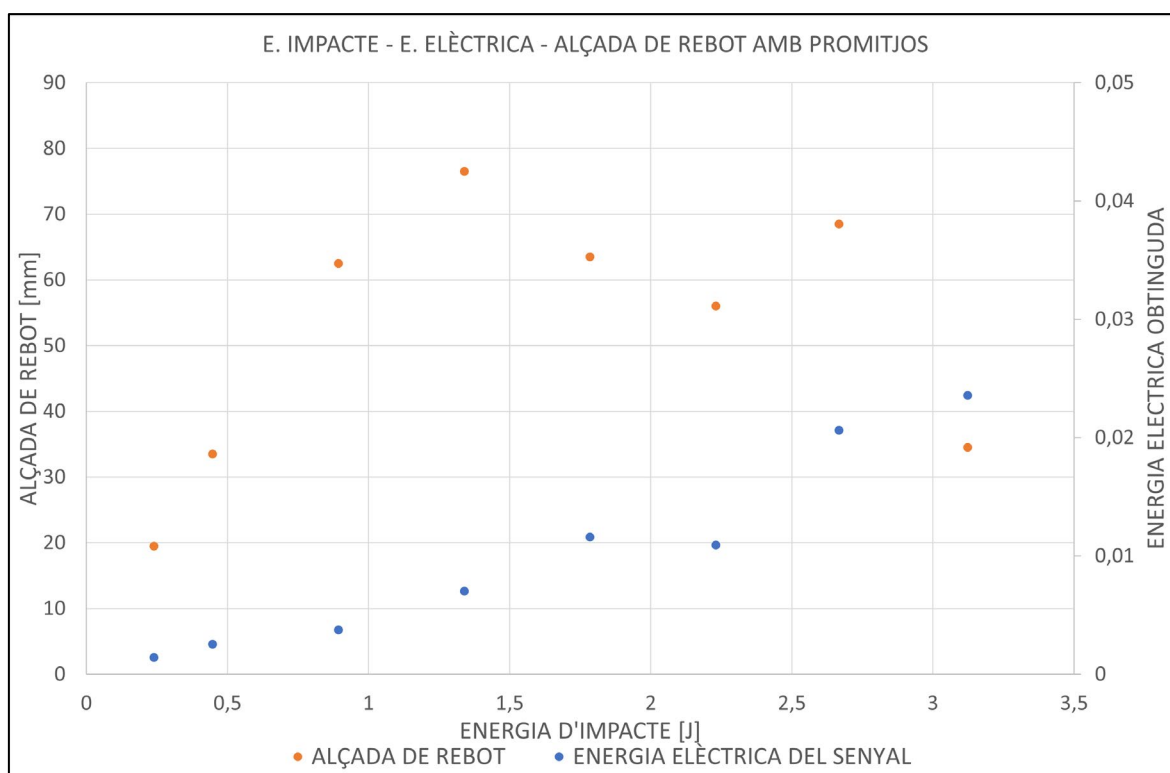
No es pot clarificar que l'alçada de rebot tingui una relació amb la quantitat d'energia elèctrica obtinguda.

Un major número d'assajos, amb més intervals d'energia i més espècimens per assaig, ajudaria dibuixar una gràfica que clarifiqués a partir de quin punt s'inicia el decrement de l'alçada de rebot, punt a partir del qual coneixeríem que l'estat del substrat es troba considerablement deteriorat en no ser capaç de retornar energia a l'impactador. D'aquesta manera si observéssim una energia d'impacte superior a un determinat valor (en el cas del nostre assaig, la de 1,34J), acompanyada per una alçada de rebot baixa, podríem assegurar que l'estat del substrat, degut exclusivament a l'impacte, es deteriora.

Durant els tres primers punts, on considerem que no hi ha una falla considerable del substrat, la relació entre alçada de rebot i energia elèctrica del senyal es pràcticament lineal i constant.

- Punt 1 :  $0,001407/19,5 = 7,2153 \text{ e-5}$ .
- Punt 2 :  $0,002525/33,5 = 7,5373 \text{ e-5}$ .
- Punt 3 :  $0,003738/62,5 = 5,9808 \text{ e-5}$ .
- Punt 4:  $0,007137/76,5 = 9,3294 \text{ e-5}$ .

El paràmetre que estem obtenint en aquest càlcul es l'energia elèctrica que ha de generar el senyal, per produir 1 mm d'alçada de rebot. Com s'ha expressat anteriorment, això només serà així durant la primera part de l'estudi, abans d'arribar a l'energia d'impacte de 1,34J.



**Figura 47.** Evolució de l'energia del senyal i alçada de rebot corresponent amb valors mitjans

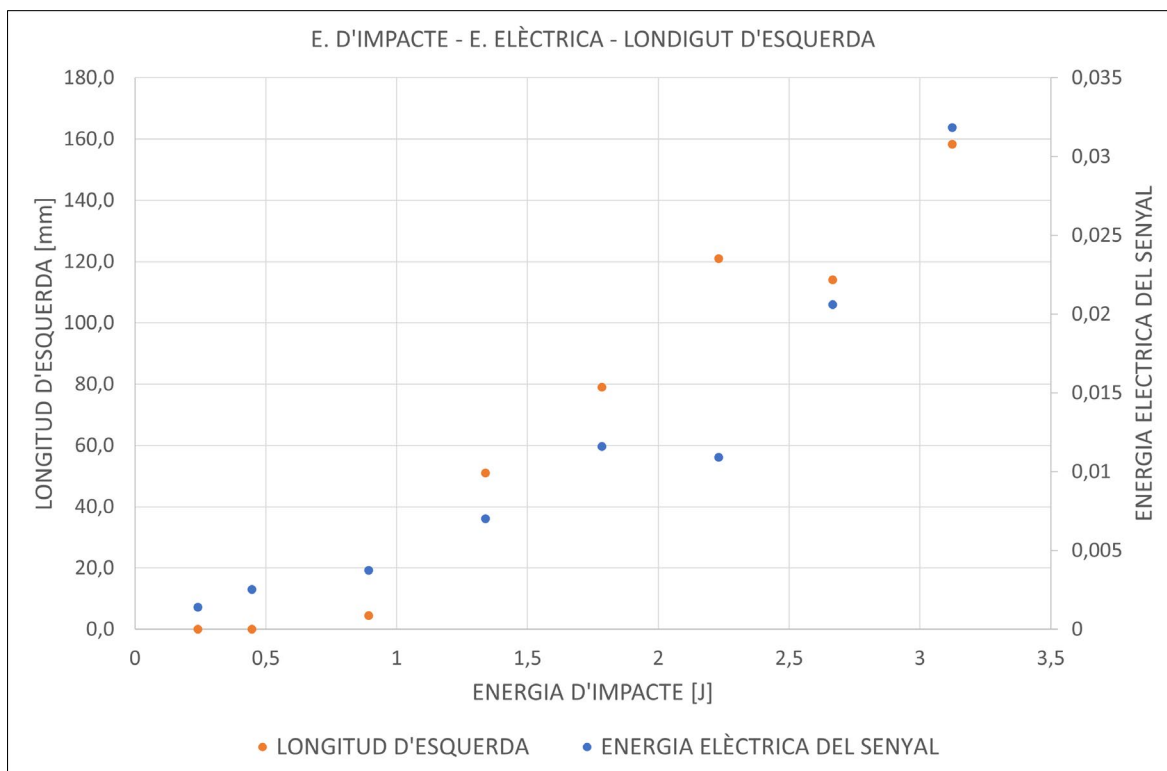
#### 4.2.4 Evolució de l'esquerda produïda amb l'augment de l'energia d'impacte

L'únic contrast de dades que resta, es comparar com evoluciona l'aparició d'esquerdes en el substrat amb l'increment de l'energia d'impacte. Per fer-ho s'utilitza el gràfic que s'exposa a la figura 48.

S'observa que en rangs d'energia baixos, la aparició d'esquerda es nul·la, el substrat es capaç d'actuar en el rang elàstic, retornar un percentatge d'energia considerable al substrat. Es a partir del tercer valor d'energia d'impacte (1,34J) on s'inicia una aparició considerable d'esquerdes, i per tant sabem que el deteriorament del substrat s'inicia en el rang [0.89J - 1.34J]. Coneixent això es clar que en per a properes investigacions, s'haurà d'executar un major número d'assajos en aquest rang per mirar d'esclarir el comportament del material i relacionar-lo amb la resta de variables de les que disposem.

Veient el comportament doncs sabem que el punt on l'alçada de rebot començarà a disminuir, o si mes no, a perdre la relació quasi lineal dels primers punts, es anterior a l'energia de 1,34J, ja que en aquesta la quantitat d'esquerda ja es considerable.

Cal tenir en compte també que totes aquestes deduccions referents a valors exactes, son referents al material utilitzat en aquest estudi i que utilitzant altres materials es segur que la dinàmica de la corba canviarà i es segur que els valors d'energia i distancia de rebot ho faran també.



**Figura 48.** Evolució de l'energia del senyal i esquerda corresponent amb valors mitjans

### 4.3 Afectació de la velocitat d'impacte en la resposta piezoelèctrica

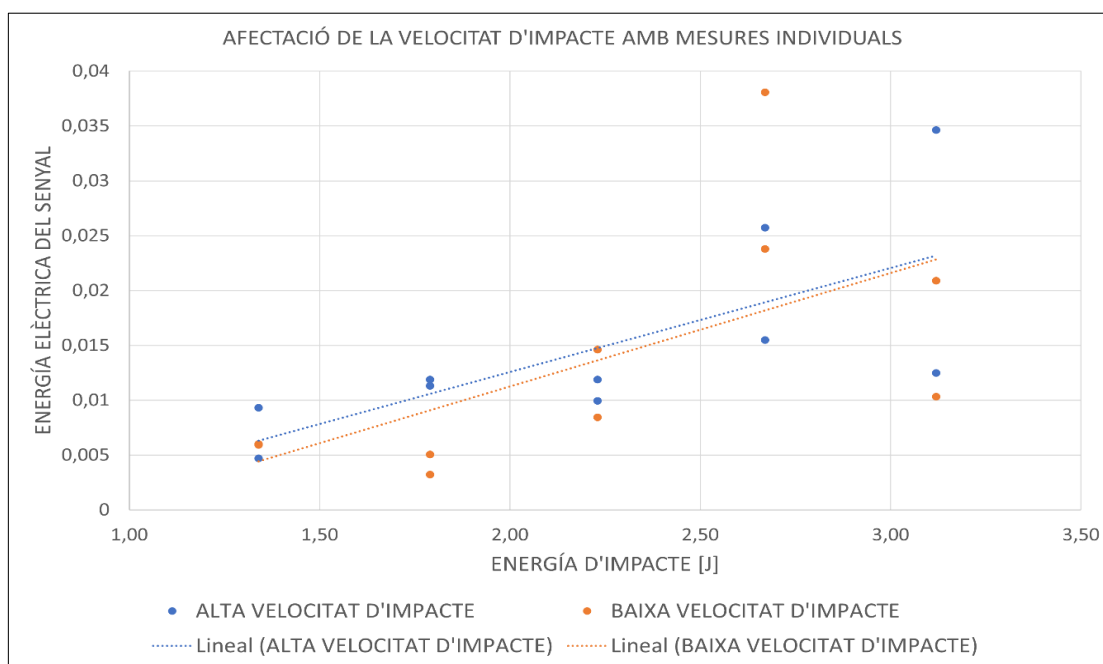
En aquesta apartat de la matriu d'assajos, s'utilitzen velocitats d'impacte diferents per determinades energies, a fi d'investigar si existeix alguna relació entre la velocitat d'impacte i la lectura elèctrica del piezoelèctric per a una mateixa energia. Els valors rellevants es mostren a la taula 10.

Com s'explica a la secció 2.5.2, el paràmetre més exacte per estudiar aquesta secció, seria l'ús de forces impulsives, i la seva relació amb l'afectació en la quantitat de moviment. La velocitat d'impacte doncs, es un paràmetre que fa variar la força impulsiva i es el aquest segon paràmetre el que afectarà la lectura piezoelèctrica.

ENERGÍA D'IMPACTE	ENERGÍA ELÈCTRICA IMPACTADOR PETIT			ENERGÍA ELÈCTRICA IMPACTADOR GRAN		
1.34	28-489-1	0.009318	0.00704	17-799-1	0.005927	0.005967
	28-489-2	0.004709		17-799-2	0.006006	
1.79	37-489-1	0.011885	0.011598	23-799-1	0.005045	0.004134
	37-489-2	0.011311		23-799-2	0.003224	
2.23	47-489-1	0.011886	0.010921	28-799-1	0.014609	0.011532
	47-489-2	0.009957		28-799-2	0.008455	
2.67	56-489-1	0.025734	0.020605	34-799-1	0.038057	0.030926
	56-489-2	0.015476		34-799-2	0.023795	
3.12	65-489-1	0.012486	0.031846	40-799-1	0.020888	0.015512
	65-489-2	0.034635		40-799-2	0.0101376	

**Taula 10.** Energia del senyal en funció de la velocitat d'impacte.

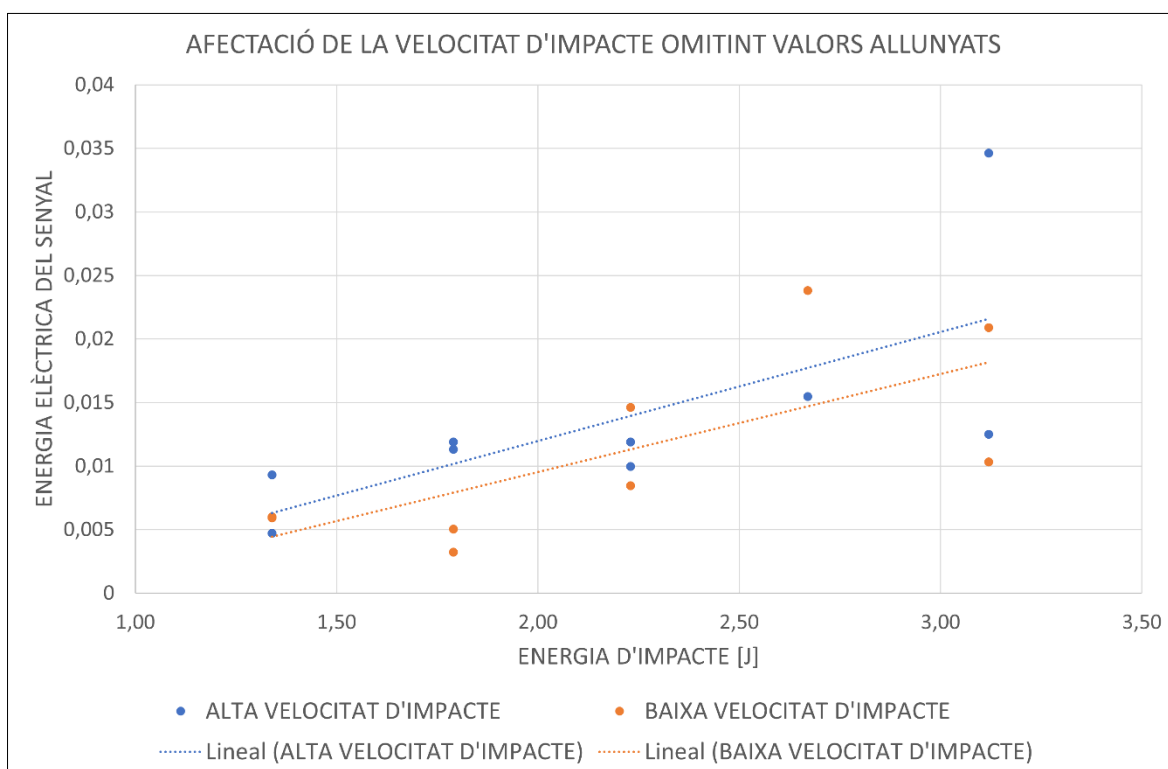
A continuació es mostra la gràfica de la figura 49 on els resultats són basats en les dades individuals (2 mostres/energia), i s'observa en el comportament de les regressions lineals, que a major es l'energia d'impacte, l'afectació de la velocitat d'impacte decreix. En primera instància, esperaríem un comportament homogeni, es a dir que l'afectació de la velocitat d'impacte en la lectura elèctrica del senyal, es mantingués constant o guardés una proporció amb l'increment de l'energia d'impacte.



**Figura 49.** Afectació de la velocitat d'impacte amb mesures individuals

Si ens fixem doncs en l'assaig 34-799-1 (assaig més allunyat en l'energia d'impacte 2.67), presenta una lectura elèctrica molt elevada (aquest assaig va tenir un detall d'execució diferent a la resta, es va deixar anar la corda sense lliscar per damunt l'acer d'un dels sergents, com s'ha fet en tota la resta d'assajos), que s'allunya molt de la regressió lineal. Si no tenim en compte aquest assaig, obtenim el segon gràfic, exposat a la figura 50, on s'observa una diferència quasi proporcional entre les regressions lineals corresponents a cada velocitat d'impacte. **Això pot voler dir que la velocitat d'impacte té una afectació sobre la lectura (incrementant-la) que augmenta presenta un increment proporcional a mesura que augmenta l'energia d'impacte.**

Farien falta més assajos per tal de confirmar aquesta hipòtesi, i per intentar buscar un patró de comportament que mostri en quina proporció, la velocitat d'impacte afectarà en l'increment de lectura elèctrica del senyal. Mostrar doncs un increment en Joules per cada unitat de m/s que s'incrementa.



**Figura 50.** Afectació de la velocitat d'impacte sense valors allunyats

#### 4.4 Utilització de la morfologia del senyal com a font d'informació

En aquesta secció, s'utilitzarà la morfologia de les gràfiques, com a informació addicional als valors màxim i mínim dels senyals obtinguts, amb la finalitat de caracteritzar quin ha estat l'impacte produït. També es relacionarà amb la longitud d'esquerda que caracteritza el dany ocasionat en el substrat.

Per fer-ho, una vegada obtinguts tots els resultats dels assajos experimentals, s'han disposat els senyals de voltatge en un full de càlcul, assignant a cada columna una capçalera amb el codi d'assaig, sota la qual s'adjunten totes les dades de voltatge obtingudes.

La les dues primeres columnes fan referència al temps, una es per a la freqüència de mostreig de 19.2 kHz, i l'altra per a una freqüència de 9.6kHz, freqüència a la qual per error s'han realitzat 4 assajos però que també compleix amb el Teorema de Nyquist.

D'aquesta manera, tots els voltatges poden disposar-se sobre la mateixa gràfica i mitjançant el selector, escollir quines gràfiques es volen comparar.

A l'**Annex 3** d'aquest treball, s'observen totes les gràfiques individuals obtingudes de cadascun dels assajos.

#### 4.4.1 Utilització de la morfologia del senyal per quantificar l'impacte produït

A continuació es mostra la comparació entre els assajos 19-489-1 i 56-489-2, que es pot observar a la figura 51.

Utilitzant el vídeo d'alta resolució de l'assaig 19-489-2, s'observa que el contacte entre impactador i substrat s'inicia al fotograma: 11640 i acaba al fotograma 11652. 12 fotogrames de temps de contacte

Treballant a una freqüència de mostreig de 1014, es un període entre fotograma de  $986\mu\text{s}$ , (la pròpia càmera menciona  $983\mu\text{s}$  així que farem cas a la càmera).

$12 \cdot 983 = 11796 \mu\text{s}$ , es a dir 11.796ms de temps d'impacte.

S'entreveu que el punt de màxima deformació es el fotograma 11646, per tant es sembla que es deforma en el mateix temps en ambdues direccions = 5.898ms per deformació axial.

Utilitzant el vídeo d'alta resolució de l'assaig 56-489-2, s'observa que el contacte entre impactador i substrat s'inicia al fotograma: 11837 i acaba al fotograma 11851. 14 fotogrames de temps de contacte.

Continuant amb el període de  $983 \mu\text{s}$ :  $14 \cdot 983 = 13726 \mu\text{s}$ , es a dir 13.762ms de temps d'impacte.

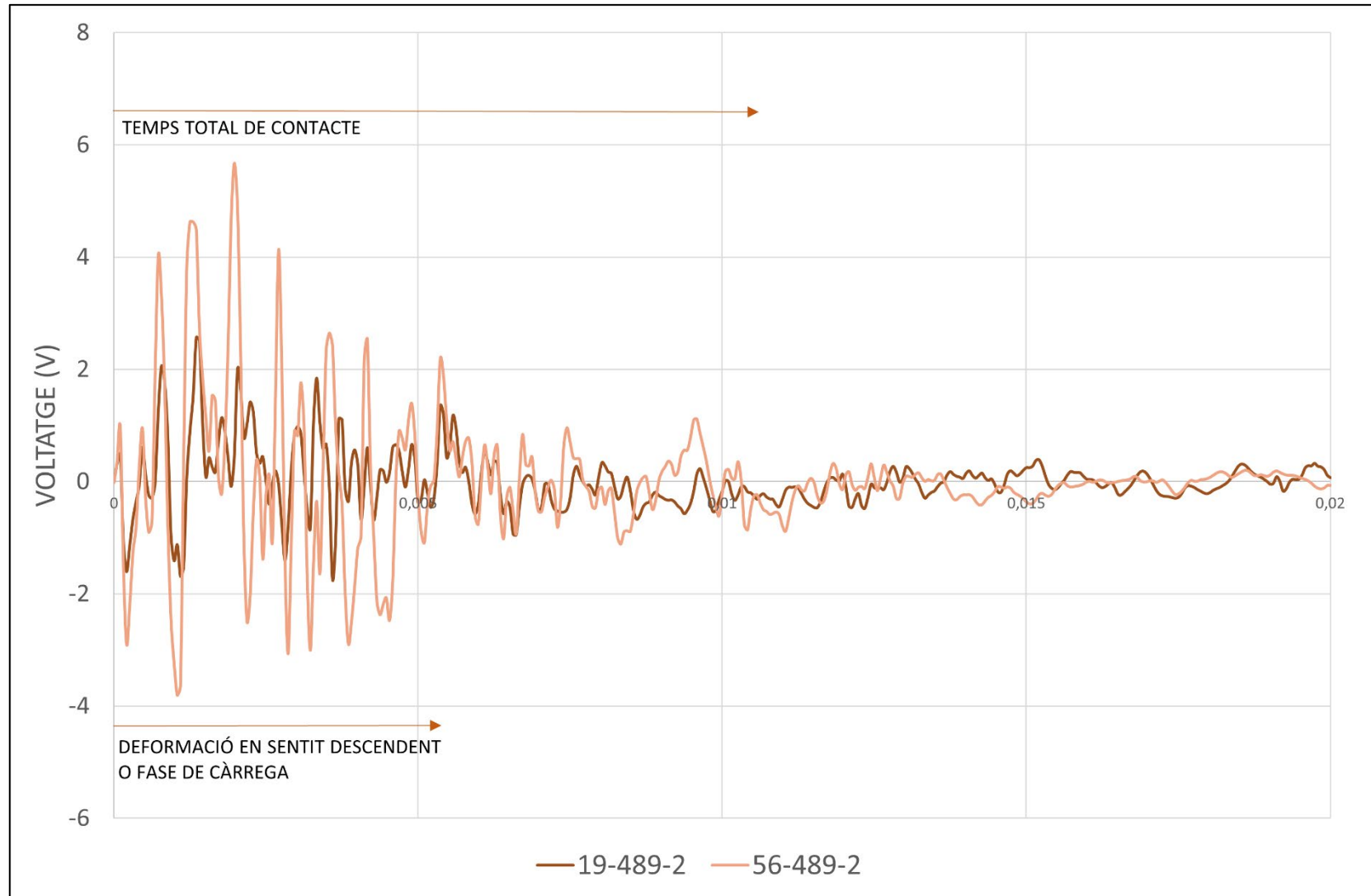
S'entreveu que el punt de màxima deformació es el fotograma 11844, per tant es sembla que es deforma en el mateix temps en ambdues direccions = 6.888ms per deformació axial.

Ambdós temps de contacte son molt similars tot i que els diferencien 37 cm d'alçada d'impacte, s'observa la coincidència dels pics que componen la resposta durant el primer període d'almenys 0,003 segons, amb una marcada diferència en els valors màxims. **Observant aquest comportament, podem dir que l'energia elèctrica del senyal durant la primera fase de l'impacte (aproximadament 3 ms) on els pics son coincidents, pot ser capaç de caracteritzar amb precisió la magnitud de l'impacte ocasionat.**

Això es degut a que en aquesta primera fase en un mateix període de temps, el material obté una major deformació per a l'impacte gran envers al petit. Es clar que en aquest fragment de temps tant petit, encara no s'ha originat cap ruptura, es per això que els pics dels senyals coincideixen, en cas d'originar-se una ruptura molt ràpida, el senyal presentaria una distorsió prematura que dificultaria la comparació d'aquests primers pics.

En aquests casos les energies elèctriques obtingudes finals son 0,0018871 per a l'assaig des de 19cm i 0,01547565 per a l'assaig des de 56cm. Es considerablement superior com s'espera per al cas de major energia d'impacte, per tant, coincideix en la hipòtesi de que aquests primers pics poden representar en un cert grau de fiabilitat, el grau d'impacte ocasionat.

**Com es pot observar però, sembla que la part posterior al final de temps de contacte (passats els 12ms), no mostra informació rellevant, i que inclús tampoc ho fa la part de descàrrega de l'impacte (entre els 6ms i els 12ms).**



**Figura 51.** Comparació morfològica de senyals



#### 4.4.2 Utilització de la morfologia del senyal per quantificar l'esquerda generada

A continuació es mostren dues gràfiques, la primera corresponent als assajos 09-489-1 i 09-489-2 s'adjunta a la figura 52, i la segona, adjunta a la figura 53, correspon als assajos 47-489-1 i 47-489-2.

Aquests assajos, corresponen a unes energies d'impacte de 0.45J i 2.23J, que, com s'ha demostrat a la secció 4.2 del treball, en la primera energia sabem que no hi haurà aparició d'esquerda, i a la segona podem assegurar que es produirà esquerda i que el material deixarà aviat de treballar en el rang elàstic.

Observant les gràfiques, veiem que les corresponents a 0.45J, presenten una uniformitat molt superior a les de 2.23J, que els dos senyals 47-489 presentin morfologia bastant diferenciada, és degut a que les esquerdes s'originen en direccions diferents i per tant la lectura del piezoelèctric es diferent per l'espècimen1 que per l'espècimen 2. Tot això vol dir que **l'aparició d'esquerdes en el substrat, genera deformacions que alteren la resposta piezoelèctrica, allunyant-la d'una resposta característica en freqüència que existeix durant el tram en el qual el material actua en el rang elàstic.**

Amb l'estudi realitzat no es pot predir el tamany de les esquerdes i encara menys la morfologia d'aquestes mirant únicament la gràfica. Per fer-ho hauríem de disposar de la dinàmica de generació d'esquerdes en el substrat, sabent quina esquerda s'ha generat en cada moment i intentar comparar-ho amb pics o alteracions produïdes en aquest moment a la gràfica.

Es cert que per al segon cas, l'espècimen número 1, presenta un senyal amb major excitació i majors valors de màxim, mínim i energia total, i això coincideix amb que es el que te major longitud d'esquerda dels dos. Tot i així, això no es un patró que es repeteix al llarg de tots els assajos.

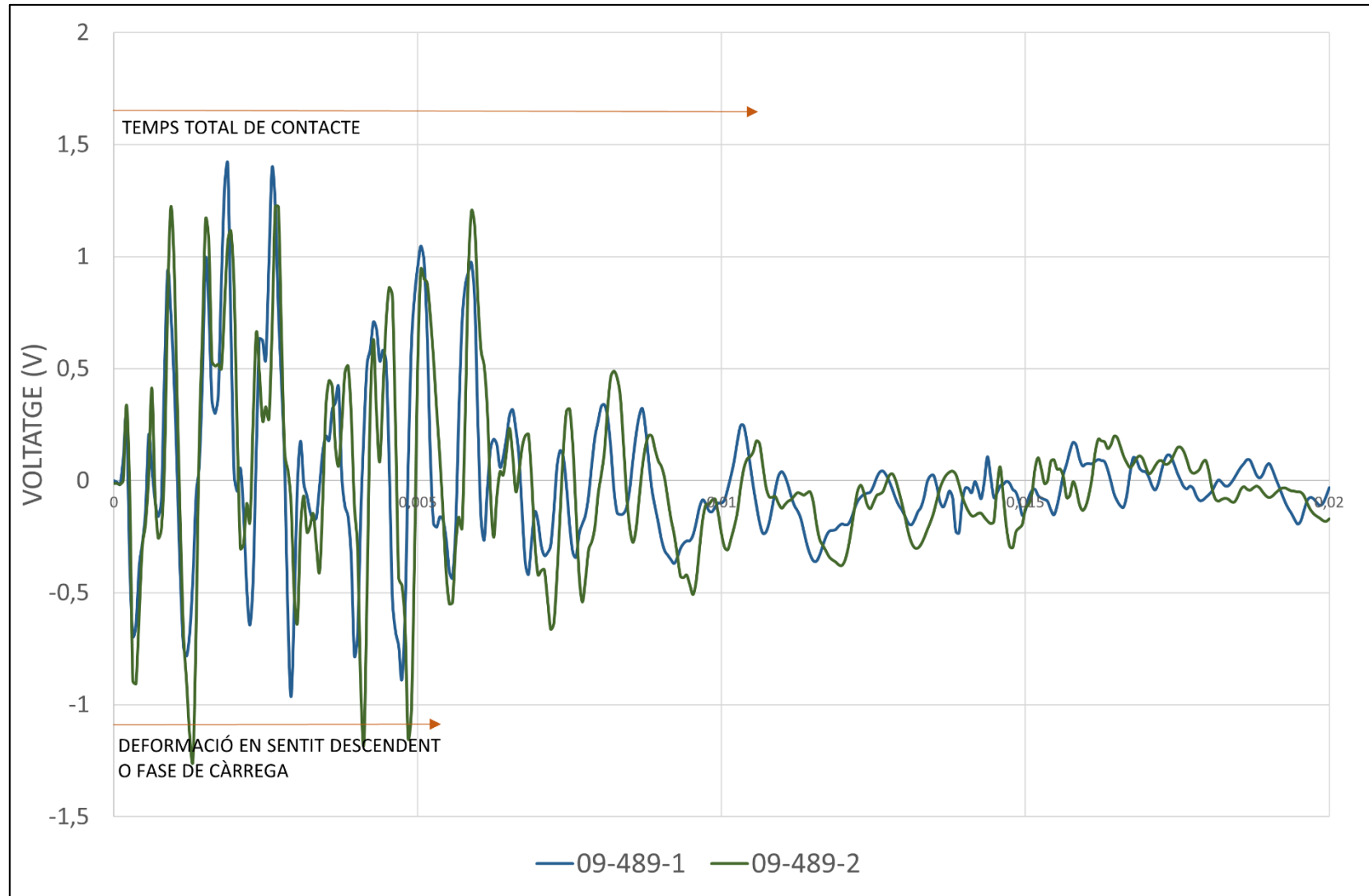


Figura 52. Comparació senyals sense esquerra

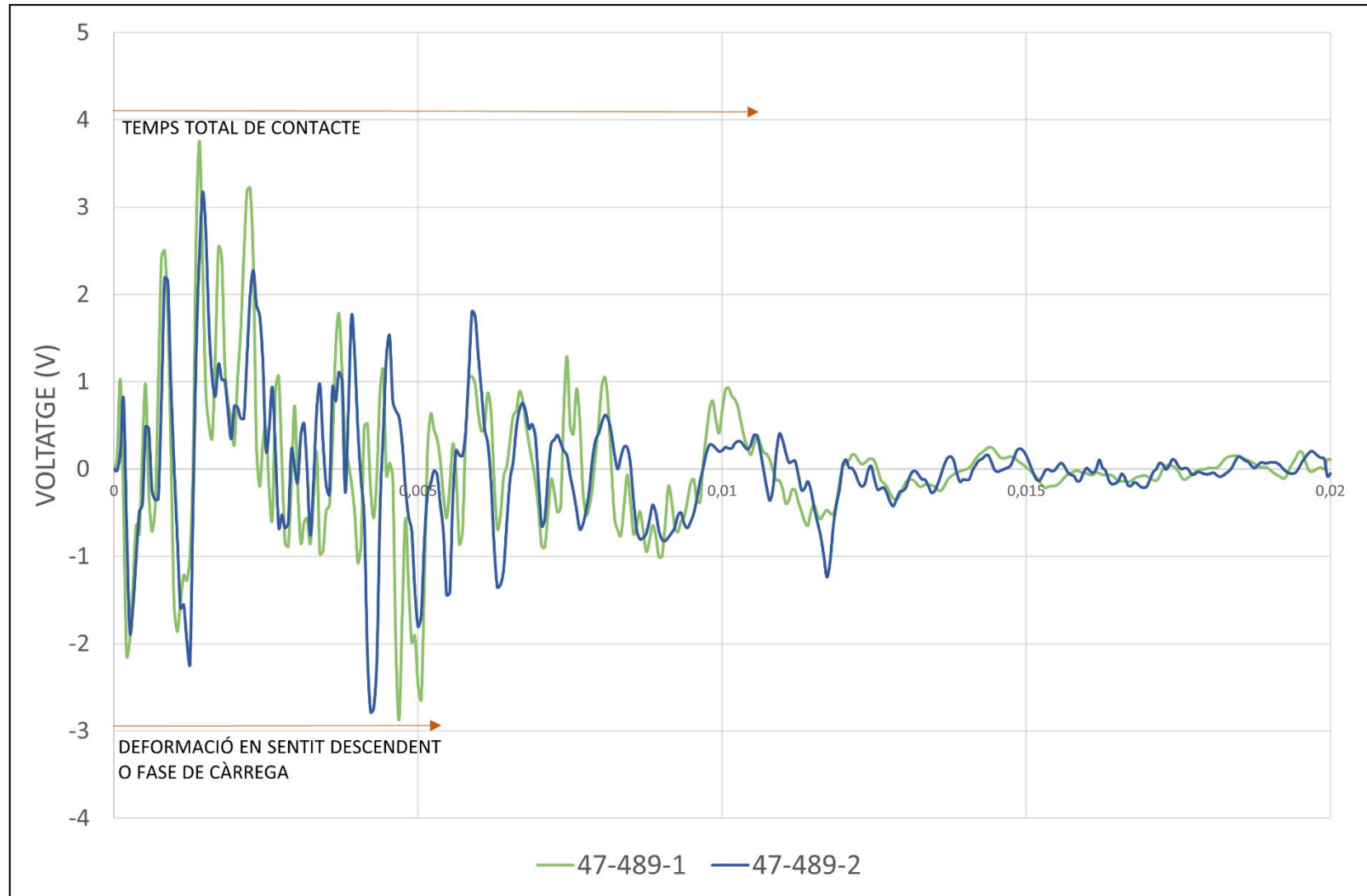
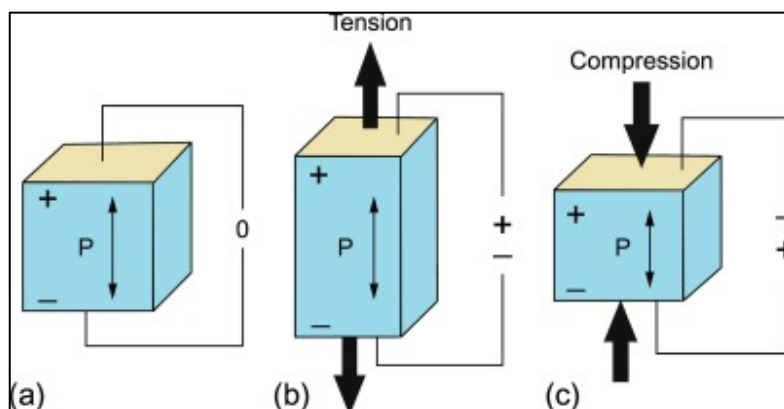


Figura 53. Comparació senyals amb esquerra

## 4.5 Afectació de la ubicació anterior o posterior del piezoelèctric en la lectura del senyal

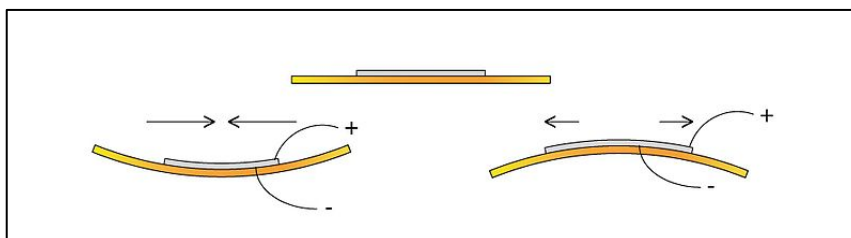
En aquest apartat, s'estudia la relació existent en la resposta elèctrica del senyal quan el material piezoelèctric es troba ubicat a la part anterior o a la part posterior del substrat.

Com s'explica a la revisió de l'estat de l'art, de l'efecte piezoelèctric directe, en coneixem que existeix diferència en la creació de càrrega elèctrica quan el piezoelèctric es troba sotmès a esforç de tracció, a esforç de compressió, com es mostra als casos a, b i c de la figura 54.



**Figura 54.** Efecte piezoelèctric directe [13]

Sabem doncs que en un esdeveniment d'impacte, es produeix una deformació a flexió del substrat, en la qual les fibres de la part anterior, es trobaran sotmeses a compressió, i les fibres ubicades a la part posterior es trobaran sotmeses a tracció. Per tant les càrregues es distribuïran com es mostra a la figura 55.



**Figura 55.** Distribució de càrregues a flexió

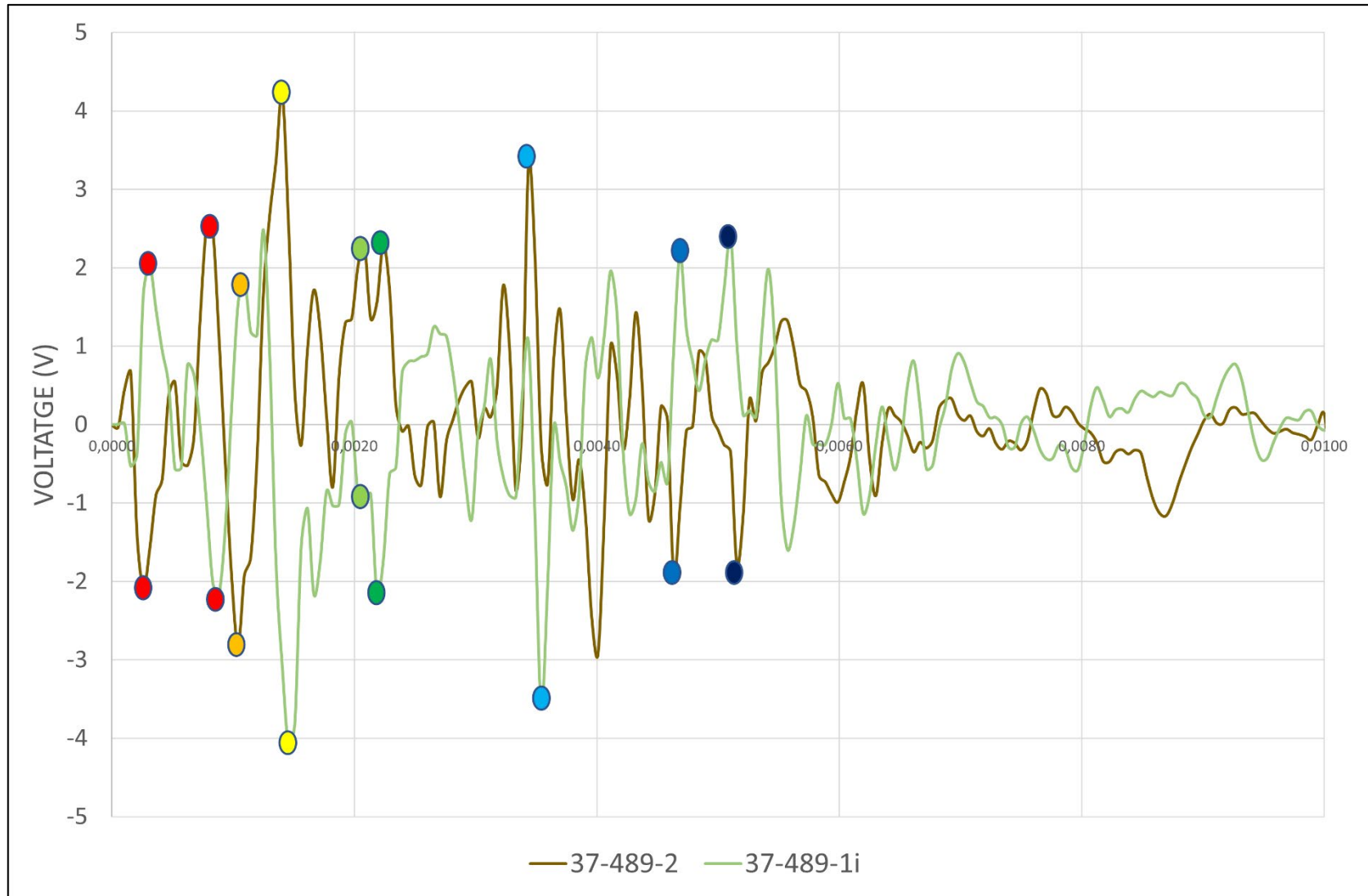
*Piezo bending principle* (17 Febrer 2011) Piezoelectric Bending [Imatge] Wikimedia commons

A la figura 56 s'exposa la sobreposició dels assajos 37-489-2 i 37-489-1i, on podem observar que si que s'observa clarament un comportament invers en la lectura piezoelèctrica. Els pics oposats que mes destaquen es mostren ressaltats per facilitar el procés de comparació.

De la mateixa manera que en aquest estudi es mostra un comportament quasi exactament invers, comparant altres assajos, no tots mostren el mateix aspecte clarament invers. Això pot ser degut a la variabilitat del procediment d'assaig en si mateix i al tipus de fractura del material que hem utilitzat ja que en ser compost, per molt que apliquem dues vegades la mateixa energia d'impacte, es molt complicat aconseguir exactament la mateixa ruptura, i això tindrà afectació en la lectura obtinguda. El procediment adequat per realitzar aquesta comprovació hagués estat ubicar un piezoelèctric al davant i un al darrera exactament en la mateixa posició, i executar l'assaig amb ambdós adherits, per disminuir la variabilitat a 0, com s'ha fet en els assajos de comprovació d'afectació de la distància al punt d'impacte sobre la lectura del senyal.



**Tot i així havent aconseguit una morfologia inversa quasi exacta, podem assegurar que si ubiquem el piezoelèctric a la part posterior, la el senyal obtingut serà el mateix però amb la morfologia invertida.**

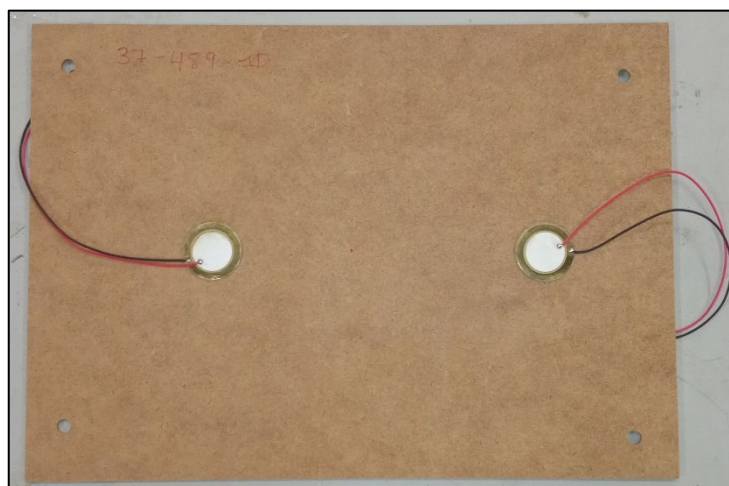


**Figura 56.** Comparació de ubicació del piezoelèctric anterior i posterior

## 4.6 Afectació de la distància del piezoelèctric al punt de impacte en la lectura del senyal

En aquest apartat, s'estudia la relació existent en la resposta elèctrica del senyal quan el material piezoelèctric es troba ubicat a diferents distàncies del punt d'impacte.

Per fer-ho s'han realitzat els assajos corresponents a les alçades de 28 i 37cm, amb un piezoelèctric ubicat com es habitual a 67mm, i un altre ubicat a l'altra banda a una distància de 100mm, com s'exposa a la figura 57.



**Figura 57.** Disposició doble piezoelèctric

Com per a la resta d'assajos, s'han impactat dues mostres per a cada tipus d'impacte, a la taula 11, s'exposen les variables dels senyals obtinguts. L'últim número del codi d'assaig indica 1 quan es tracta del piezoelèctric situat a 67mm i 2 si es parla del situat a 90mm.

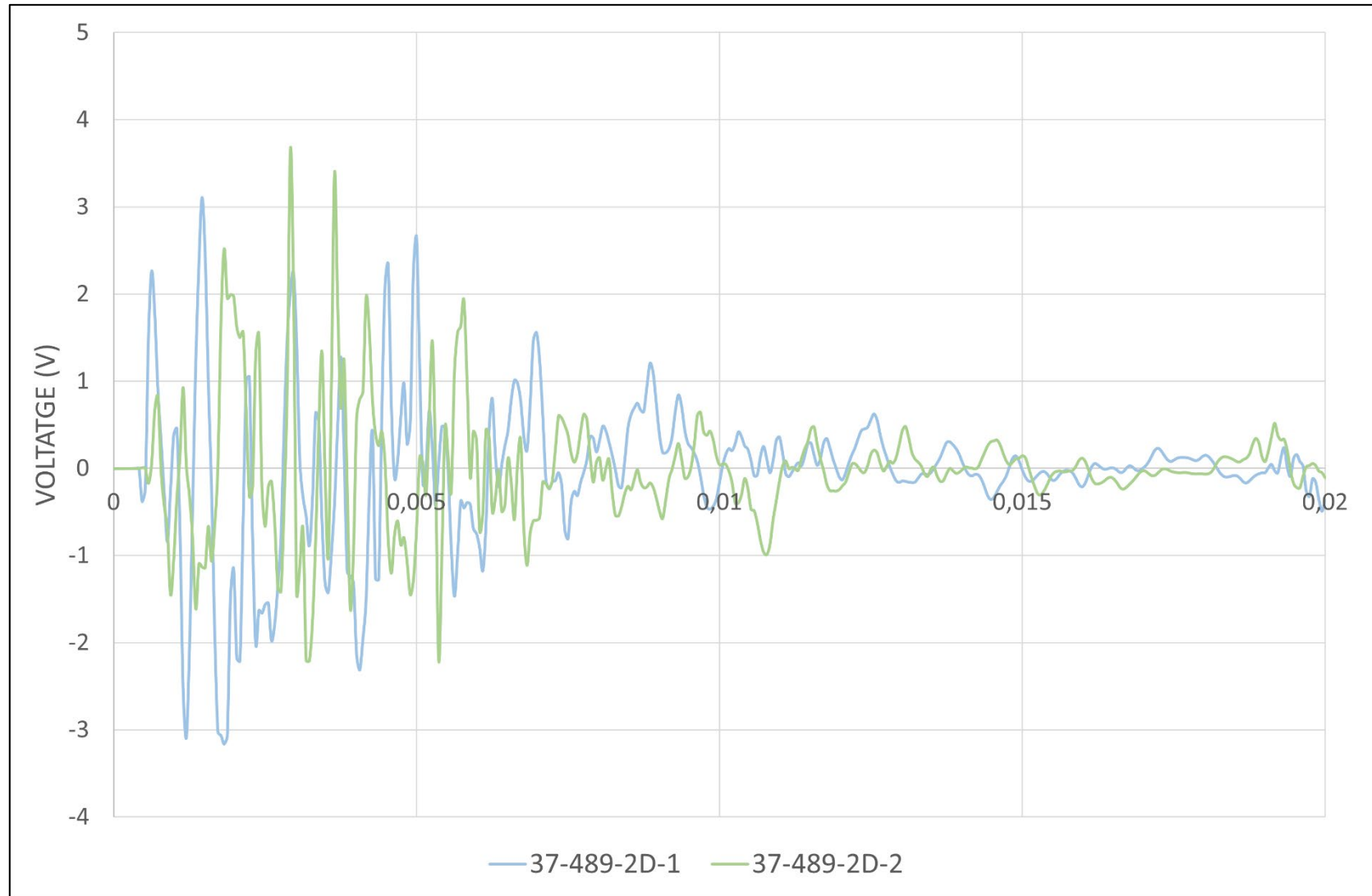
CODI D'ASSAIG	ENERGIA D'IMPACTE	VOLTATGE MÀXIM	VOLTATGE MÍNIM	ENERGÍA ELÈCTRICA
28-489-1d-1	1.34	2,4862	-3,0133	0,007302
28-489-1d-2		2,1197	-3,3519	0,009714
28-489-2d-1		2,7153	-5,0067	0,012028
28-489-2d-2		2,5526	-2,8506	0,010693
37-489-1d-1	1.79	1,7600	3,1158	0,007417
37-489-1d-2		2,7289	5,3798	0,013336
37-489-2d-1		3,1078	-3,1639	0,013111
37-489-2d-2		3,6646	-2,2106	0,009072

**Taula 11.** Evolució de variables llegibles amb doble piezoelèctric

**A la figura 58 observa una excitació més ràpida del piezoelèctric situat més proper a l'impacte. Per tant si ubiquéssim diversos piezoelèctrics en una estructura, el que rebí abans el senyal, serà el situat més a prop del punt d'impacte.**

Per altra banda, les morfologies dels senyals, no mostren equivalència entre el primer i el segon piezoelèctric. Això pot voler dir que la distància al punt d'impacte farà variar la morfologia característica del senyal, provablement degut a l'espectre freqüencial d'aquest.

Caldria realitzar més assajos en aquesta configuració per esclarir el comportament i la variació de la morfologia tipus en funció de la distància de l'impacte al piezoelèctric.



**Figura 58.** Comparació de l'afectació de la distància de l'impacte al piezoelèctric en la lectura



## 4.7 Afectació d'un impacte de gran energia en la lectura del senyal

En aquest apartat, s'estudia la resposta del sistema davant un esdeveniment d'impacte de gran energia. Al llarg de tot l'estudi, s'han realitzat assajos en el rang d'aparició d'esquerdes, i fins a una energia d'impacte de 3.12J, en la qual s'han obtingut valors d'esquerda considerablement elevats com per considerar el substrat inservible, i per tant no existia necessitat de continuar incrementant energies d'impacte i es podien utilitzar els substrats restants per a altres comprovacions com la del posicionat anterior o posterior, el doble piezoelèctric, etc.

En aquest cas, hem volgut plantejar l'aparició d'un impacte 3 vegades superior a l'energia d'impacte màxima assajada anteriorment, i hem aplicat el pes màxim disponible des de l'alçada màxima assolible, obtenint així un assaig des de 86cm, amb l'impactador de 799g, amb una energia d'impacte de 6.74J.

Es vol estudiar si aconseguim saturar l'amplificador operacional generant un pic molt alt de voltatge, veure si la freqüència de mostreig es capaç de captar una resposta ràpida com la que esperem percebre, estudiar també la reacció del mateix circuit elèctric que compona l'etapa d'amplificació de càrrega i comprovar que totes les afirmacions fetes anteriorment continuen tenint validesa per aquest tipus d'assaig.

A la figura 59 es mostren els resultats obtinguts en els assajos 86-799-1 i 86-799-2.

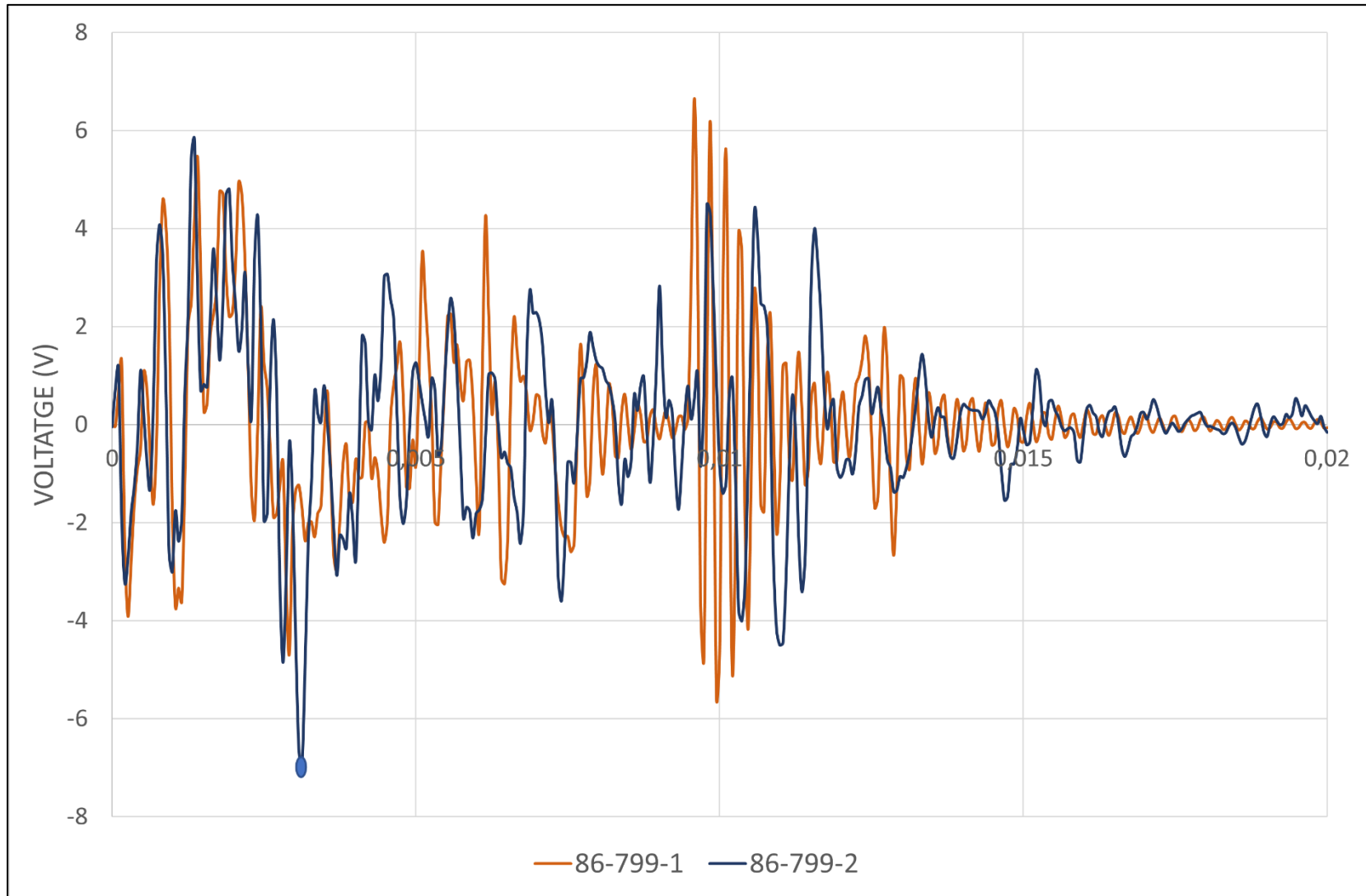
Observem primerament que l'energia d'impacte no ha estat suficient per generar saturació a l'amplificador operacional. Això incrementa la fiabilitat i la robustesa del circuit elèctric dissenyat.

Reforçant les conclusions exposades a la secció 4.4.1, els senyals continuen mostrant un comportament molt similar durant els primers instants de l'impacte, en aquest cas aproximadament durant uns 2ms, els primers pics presenten una morfologia totalment equivalent. Per tant podem concloure que el sistema utilitzat també es capaç de captar correctament el senyal generat en aquesta energia i la seva freqüència.

A partir d'aquest punt s'inicia l'aparició d'esquerdes i les morfologies comencen a variar. Sabem que el primer assaig ha proporcionat una longitud d'esquerda superior, però que aquesta esquerda es menys profunda que la primera. Una esquerda llarga i poc profunda, es genera lentament, crea menys moviment superficial en el substrat i per tant segurament tindrà una resposta elèctrica amb menys pic i més duradora. El segon assaig per contra, ha tingut una ruptura amb més profunditat, per tant més ràpida i abrupta, això podria tenir a veure amb el pic que s'observa aproximadament als 3ms (senyalat en blau al gràfic), i que podria caracteritzar la profunditat de l'esquerda generada. Caldria assajar més substrats en aquestes energies per tenir fonts de contrast i comprovar la veracitat d'aquesta afirmació.

No s'ha observat deterioració de cap component elèctric utilitzat en el circuit, en l'amplificador ni en cap agent involucrat en l'assaig, per tant no existeix perillositat en la captació d'un impacte desproporcionat.

El pic i les ondulacions que s'observen al senyal de l'espècimen 1, aproximadament als 9ms de l'impacte, son deguts al colpeig de l'impactador amb la biga situada a la part inferior. Com s'ha percebut en altres assajos, la des-adherència del piezoelèctric va sempre acompanyada d'oscil·lacions quasi-perfectes degudes, segurament a l'ondulació del propi cos del piezoelèctric, per tant si observem aquest comportament, voldrà dir que en aquest punt, el piezoelèctric s'ha des-adherit. En aquest cas, s'observen les oscil·lacions perfectes ja als 7ms aproximadament, per tant la des-adherència es anterior a l'impacte amb la biga inferior.



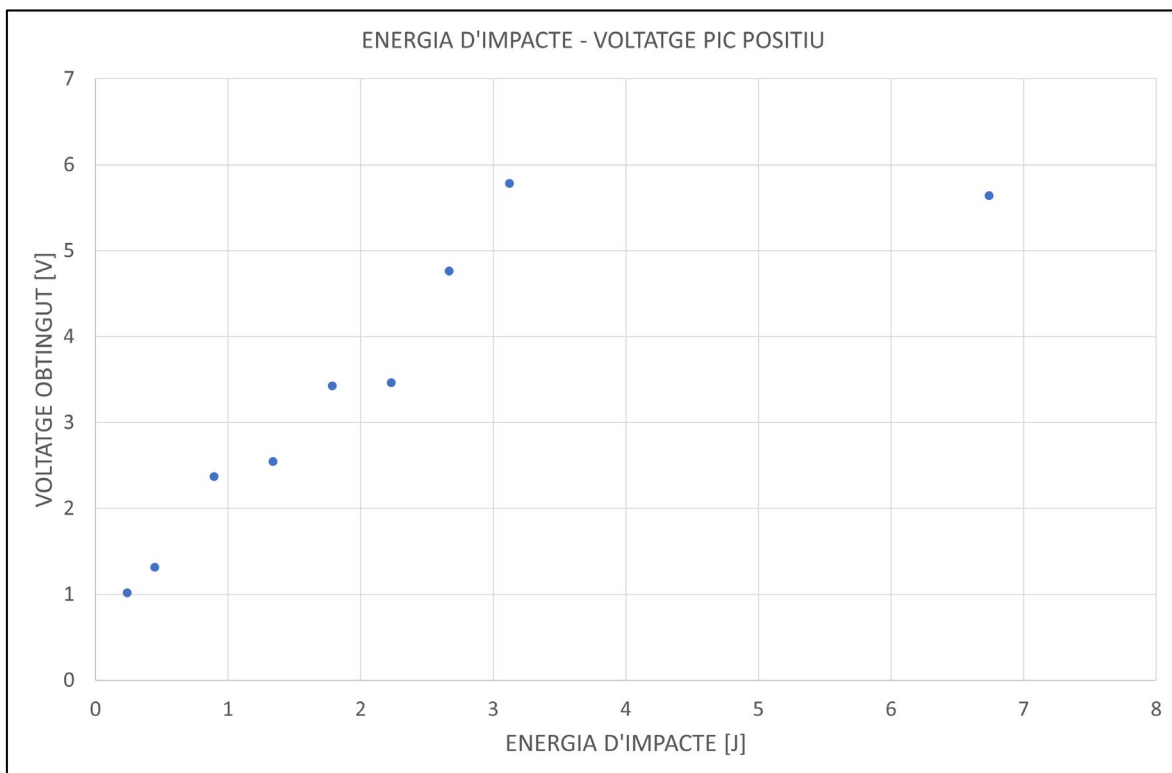
**Figura 59.** Comparació de senyals en energia d'impacte desproporcionat

Pel que fa la resposta del piezoelèctric en termes de variables mesurables quantitativament, es a dir el voltatge pic màxim i mínim i l'energia elèctrica del senyal, a continuació es mostren les figures 60, 61 i 62, que son continuacions de les figures mostrades a les seccions 4.2.1 i 4.2.2 però incloent aquest últim assaig d'energia molt mes elevada.

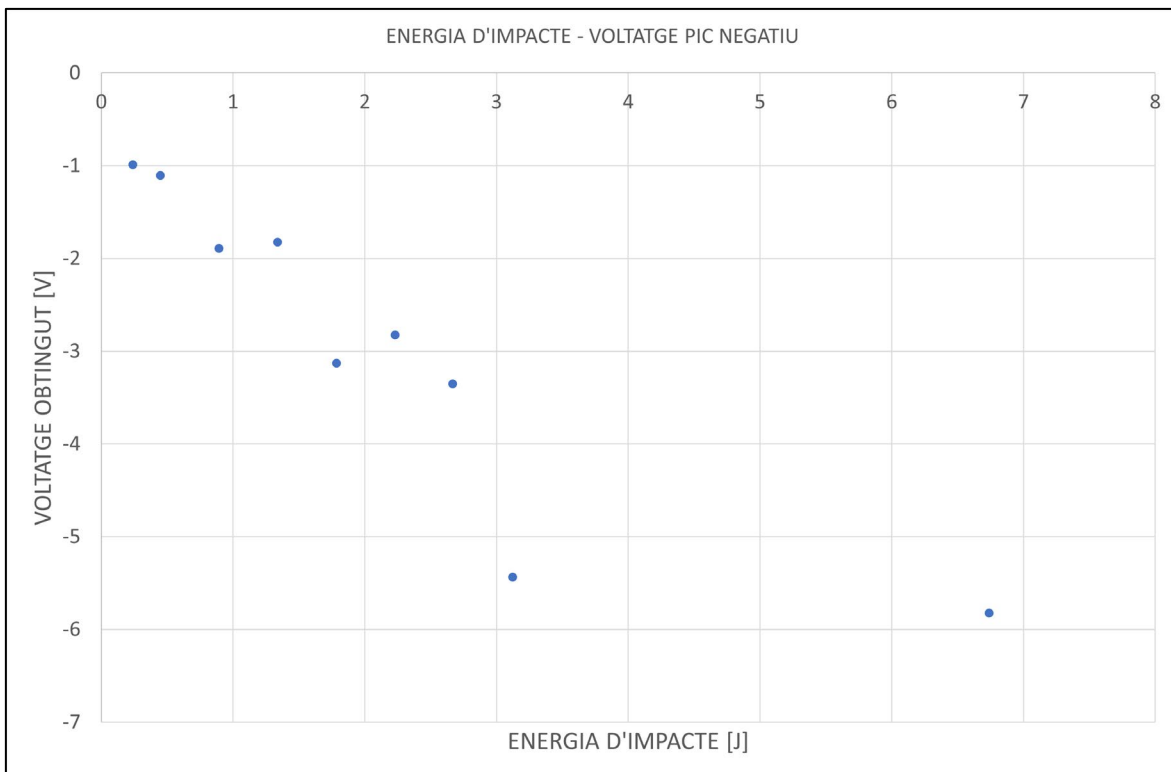
Es pot observar clarament un comportament molt diferenciat entre l'evolució del voltatge i el de l'energia, pel que fa els voltatges pic, tant positiu com negatiu, observem una estancació del voltatge màxim i mínim assolit, es a dir, el voltatge sembla arribar al seu límit entorn a l'energia de l'últim assaig realitzat en primera instància, i quan hem incrementat l'energia d'impacte per 3, no ha estat possible augmentar aquesta lectura. Podem concloure doncs que pel que fa el voltatge del senyal, es possible que arribem a la saturació del dispositiu a prop dels 6V (en condicions ideals l'amplificador es saturaria a 10V, però es possible que això succeeixi abans degut a no idealitats). En cas de confirmar que es tracta d'una saturació, podríem intentar variar el valor de  $R_2$  per disminuir el voltatge assolible i limitar l'aparició de saturació.

Per contra, respecte l'energia, podem observar que contràriament a l'esperat, ambdós assajos presenten una variabilitat considerablement reduïda. Això pot ser degut a que el tipus de ruptura es penetrant totalment, i per tant no hi ha marge a que el material s'oposi a la ruptura generada per aquest tipus d'impacte, generant sempre lectures similars i elevades. Pel que fa a la linealitat respecte la resta de punts de la gràfica, observem que també conserva notablement la linealitat dels punts anteriors i que per tant contràriament al que passa amb el voltatge, l'energia del senyal si es capaç de caracteritzar impactes amb una energia d'impacte molt elevada. En cas de confirmar-se la saturació del voltatge, es segur que la lectura d'energia d'impacte no seria una lectura correcta ja que es defineix com l'integral del quadrat d'un senyal que pateix saturació.

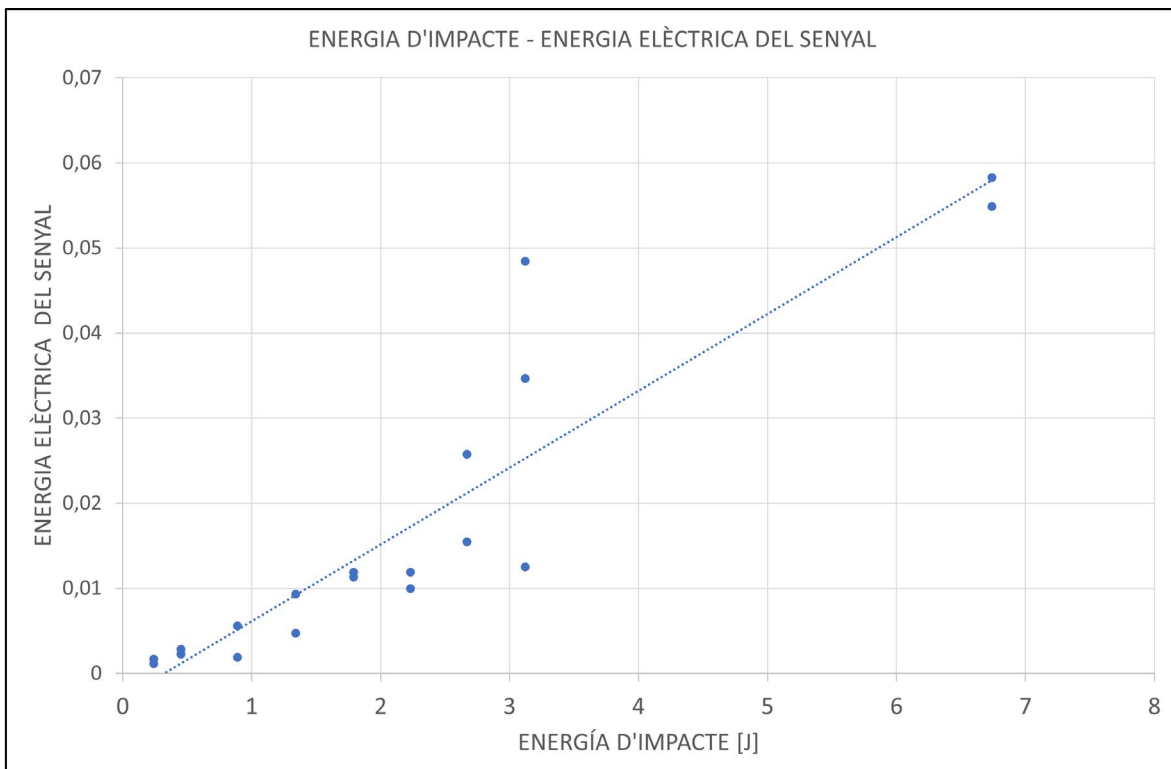
Farien falta més assajos en la zona intermèdia entre les energies d'impacte de 3J a 7J per poder donar afirmacions amb major grau de certesa i poder determinar el comportament real de la resposta piezoelèctrica en aquesta franja.



**Figura 60.** Evolució de tots els voltatges positius



**Figura 61.** Evolució de tots els voltatges negatius



**Figura 62.** Evolució de totes les energies del senyal

## 5 Pressupost

En un document adjunt a aquest treball anomenat "TFG\_FerranUrquia\_Pressupost", s'inclouen tots els costos existents per a la execució d'aquest treball.

Com s'explica al document, el pressupost consta de tres apartats, el dedicat a la fase experimental, es a dir l'execució dels assajos al laboratori de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria de l'ESEIAAT, tenint només en conte els costos materials de l'execució. Per a aquesta part es tenen en compte components de circuit electrònic utilitzat, altres components com la targeta d'adquisició de dades o la càmera d'alta velocitat, components d'assaig incloent impactador, tub, substrats, etc.

La segona fase del pressupost, es mostra el cost de la etapa de comunicació amb Arduino i LabView, incloent l'etapa d'acondicionament del senyal i igualment. També refereix únicament a costos materials.

I finalment l'últim pressupost, anomenat pressupost de desenvolupament del projecte, fa referència a les hores de treball dedicades a tot el projecte de manera global. S'utilitza un preu estàndard per a totes les hores de treball.

Finalment es mostra un pressupost global on s'exposa el preu estimat del projecte, tenint en compte beneficis i IVA, que ha resultat ser de 10,093,54€.

## 6 Anàlisi i valoració de les implicacions ambientals i socials

En aquest apartat, es descriu l'impacte ambiental i social que comporta la realització d'aquest projecte.

Es divideixen les implicacions en dues fases:

- **Desenvolupament del projecte o d'investigació**, on es tenen en compte les investigacions inicials, els assajos realitzats i l'experimentació per al disseny dels circuits entre d'altres.

Per aquesta fase, cal tenir en compte l'impacte mediambiental que genera la utilització de l'electricitat. Habitualment aquesta prové de centrals termoelèctriques on es cremen combustibles fòssils per obtenir precisament electricitat, generant grans quantitats de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera. I no només la creació en té un impacte ambiental elevat, també el té la fase de transport, on gran part de l'energia es transforma i es perd. Es per això que per a una futura aplicació final, es tindran en compte aspectes com la ubicació de plaques solars com a font d'energia per evitar malbarataments.

Una altra implicació ambiental del projecte es la utilització de components com resistències, condensadors, amplificadors i cablejat. Per a la realització del mateix s'ha tingut en compte el procediment per al reciclatge dels components en desús, mitjançant els pertinents punts de recollida ubicats a la universitat.

En quant a la part mecànica, la implicació ambiental prové de realitzar assajos destructius, i per tant generar residus com els substrats trencats. Aquests seran portats al punt de reciclatge pertinent una vegada acabada l'execució d'aquest treball.

- **Aplicació final**, d'on se'n deriven diverses implicacions principalment socials. Com s'explica a l'objecte del treball, la finalitat d'aquesta investigació, es tenir la capacitat de determinar l'estat de dany d'un substrat a causa d'un impacte, i mitjançant aquest coneixement realitzar les pertinents accions com podria ser anticipar o denegar l'enderrocament d'una estructura danyada o no, o bé tallar la circulació d'un tram de trànsit que podria estar afectat.

Això té un clar impacte social positiu, facilitant tasques preventives amb la finalitat d'evitar els riscos humans que, són els més importants, i també una implicació ambiental si decidíssim per exemple denegar l'enderrocament d'una estructura que es troba en bon estat, ja que evitem el procés de destrucció-construcció.

## 7 Conclusions

En aquesta secció s'exposen les conclusions obtingudes de la síntesi de resultats mostrada a la secció anterior.

Durant l'exposició dels resultats, es plausible que els materials piezoelèctrics presenten un molt bon comportament com a sensors per a la detecció d'un impacte i la quantificació d'aquest. De la mateixa manera, amb l'exposat en aquest treball, es difícil demostrar que siguin capaços de determinar tots els paràmetres produïts a causa de l'impacte com ara la longitud exacta d'esquerda, la morfologia d'aquesta o la posició de l'impacte originat entre d'altres.

De l'execució de la matriu d'assajos d'aquest treball, i els conseqüents resultats se n'extreuen les següents conclusions.

- El circuit elèctric dissenyat, anomenat amplificador de càrrega, es capaç de convertir la càrrega elèctrica generada per el piezoelèctric en un voltatge proporcional de manera satisfactòria.  
Concloem doncs que és útil per a aquesta aplicació concreta i utilitzable per a possibles investigacions futures.
- La comunicació amb el microcontrolador Arduino i el programa LabView, incloent el circuit elèctric d'acondicionament dissenyat, es capaç de monitoritzar el procediment de lectura per ser controlat directament des de un ordinador.
- El procediment electrònic utilitzat per a la realització dels assajos, incloent targeta d'adquisició de dades, ha estat capaç de realitzar la tasca proposada i es conclou que es aplicable com a sistema alternatiu a l'ús d'Arduino i Labview per al control remot.
- L'evolució dels voltatges pic generats pel piezoelèctric mostra una clara linealitat fins aproximadament els 3J d'energia d'impacte. A partir d'aquest punt el voltatge sembla presentar saturació entre els 5V i els 6V. Serien necessaris mes assajos des de l'energia de 3J en endavant per determinar el punt exacte de saturació.
- L'evolució de l'energia elèctrica del senyal presenta un elevat grau de linealitat amb l'increment de l'energia d'impacte. D'aquesta manera pot posicionar-se com la variable encarregada de quantificar l'assaig rebut per a qualsevol rand d'energia d'impacte. Serien necessaris mes assajos en el rang de 3J en endavant per acabar de confirmar la hipòtesi i verificar-ne el comportament.
- Observant el comportament de les gràfiques, es diferencien dues etapes en el comportament del substrat que caracteritzen les variables no llegibles com son el rebot i l'esquerda produïda.
  - Una primera etapa on el material actua en el rang elàstic proporcionant energia de retorn a l'entitat d'impacte i sent capaç de generar un rebot que incrementa linealment amb l'energia d'impacte. En aquesta etapa NO hi a aparició d'esquerdes i es considera un substrat NO deteriorat a causa de l'impacte. Les variables quantitatives de sortida també mostren una evolució d'increment lineal amb l'increment de l'energia d'impacte.
  - Una segona etapa on el material comença a deteriorar-se, deixant de treballar en el rang elàstic, per tant no es capaç de retornar tota la energia possible la entitat d'impacte i proporciona doncs, un rebot cada vegada inferior. En aquesta etapa, l'aparició d'esquerdes presenta un increment gradual amb l'increment de l'energia d'impacte. Les variables quantitatives de sortida mostren comportaments diversos, com s'exposa als punts anteriors l'energia del senyal augmenta de forma lineal i el voltatge arriba a un punt, que es creu, correspon a una saturació i que NO coincideix amb el punt de canvi de comportament en el substrat.

- Podria existir una tercera etapa en la qual a partir d'un determinat valor d'energia d'impacte el material rep una deformació i ruptura notablement més ràpida on el rebot es nul, l'estat del substrat es totalment deteriorat. En aquesta fase serien necessaris mes assajos per determinar si realment l'energia elèctrica del senyal continua mantenint la linealitat.
- S'ha demostrat que per a una mateixa energia potencial d'impacte, s'obté major excitació en el piezoelèctric per a l'impacte que es produeix amb major velocitat. Aquesta velocitat d'impacte, alhora, estableix una relació amb la força impulsiva, queda per clarificar si el paràmetre que afecta la lectura realment es la força impulsiva aplicada sobre el substrat i no la velocitat d'impacte en si mateixa.
- La morfologia del senyal, es capaç de clarificar de manera molt visual i intuïtiva la magnitud de l'impacte ocorregut. Això per exemple podria ser molt útil tant per a la monitorització de l'esdeveniment en remot, per exemple des de una sala de control.  
Aquesta morfologia també es capaç de determinar si hi han aparegut esquerdes quan es pot comparar la resposta envers una resposta patró sense ruptura. Per al cas d'un esdeveniment puntual sense una resposta patró contra la que comparar, l'aparició d'esquerdes no es quantificable utilitzant com a única font la morfologia del senyal, segons l'estudiat en aquesta investigació.
- El posicionat anterior o posterior del piezoelèctric envers el substrat, afecta el senyal elèctric obtingut, produint valors amb signe contrari. Reforçant així l'exposat a l'estat de l'art on s'exposa que sotmetre el piezoelèctric a compressió o a tracció, genera càrregues elèctriques oposades.
- En el desenvolupament d'aquest treball, no ha estat possible establir una clara diferenciació en el senyal quan s'ubica a el piezoelèctric a diferents distàncies del punt d'impacte. Caldria realitzar mes assajos amb diferents ubicacions per determinar la manera de precisar en quin punt es produeix l'impacte, fent servir com a eina de mesura l'energia del senyal, els voltatges pic i la morfologia del senyal.  
Es creu que la distància del punt d'impacte al piezoelèctric, fa variar l'espectre freqüencial del senyal capturat, i això implica una variació de la morfologia. Si això fos correcte, existiria una morfologia tipus, que variaria en funció de la distancia del punt d'impacte al piezoelèctric.
- El sistema d'assaig, ha estat capaç de captar l'aplicació d'una energia d'impacte molt elevada, i consegüentment una ruptura molt abrupta en el substrat, obtenint una energia elèctrica del senyal que presenta linealitat amb la resta d'energies d'impacte. No ha estat així per a la lectura dels voltatges pic, que com s'exposa al primer apartat, presenten saturació. Caldria realitzar mes assajos a energies d'impacte elevades per acabar de confirmar les hipòtesis presentades.

**Segons l'estudi realitzat, els dispositius piezoelèctrics, son capaços d'actuar com a sensors en un esdeveniment d'impacte, i mitjançant un corresponent circuit elèctric d'adaptació, proporcionar variables quantitatives que quantifiquin l'impacte rebut. Així doncs, SI son aplicables com a sensors de detecció del dany per un impacte.**

**D'igual manera, cal continuar amb la investigació, per aclarir algunes de les variables de les quals no ha estat possible estandarditzar el comportament com les esquerdes produïdes, el posicionat de l'impacte, etc.**

Serà necessari augmentar el número d'espècimens d'assaig per esclarir el comportament del piezoelèctric en regions no estudiades i confirmar el comportament de l'estudiat durant aquest treball, ja que determinades variables presenten una elevada variabilitat. Augmentant doncs el número de mostres, les mitjanes prendrien un valor mes clar que ajudaria a la síntesi de resultats.





Tenint en compte les conclusions extretes, i amb la finalitat de clarificar l'aplicabilitat de piezoelèctrics com a sensors per a la previsió del dany en impacte, es clau la continuació en la investigació per reafirmar les hipòtesis plantejades, escalar el procés i estandarditzar-lo amb la finalitat de fer-lo aplicable a situacions reals, generant així un **avanç científic** que contribueix a resoldre problemes als que els éssers humans ens enfrontem.

En cas de prosperació de la investigació, es podria aplicar la metodologia per monitoritzar esdeveniments com impactes en accidents de transit, en construccions, en mobiliari urbà, etc. Això contribuiria a incrementar la seguretat i salut pública, podent realitzar accions preventives com inspeccions, reparacions o talls de trànsit entre d'altres.

## 8 Investigacions futures

A continuació, s'exposen propostes d'investigació futures per, com s'explica a la conclusió, escalar i estandarditzar el procés amb la finalitat de confirmar hipòtesis i fer-lo aplicable a situacions reals.

- Com a primera proposta d'investigació futura, es planteja l'aplicació de la Transformada Ràpida de Fourier sobre el senyal elèctric obtingut. Això proporcionaria una visió concreta de l'espectre freqüencial obtingut.  
Aquest rang de freqüències presents en el senyal, pot presentar variació a partir de la anomenada "segona etapa" on apareixen esquerdes, ja que com s'ha exposat anteriorment l'aparició d'esquerdes provoca una variació de la resposta en freqüència allunyant-la d'una resposta patró.
- En cas de confirmar que el dispositiu pateix una saturació aproximadament als 7V, i fent cas a la equació 22, es pot variar la sortida de tensió, variant el valor de  $R_2$  per obtenir en tots els casos una tensió més baixa dificultant la saturació. O si més no retardant-la.
- Iniciar la mesura de la deformació màxima del substrat. Fent us d'aquesta variable, i de la equació X exposada a l'estat de l'art, podríem obtenir la força impulsiva d'impacte i intentar relacionar aquest paràmetre amb el comportament de la resposta del piezoelèctric.
- Mitjançant l'alçada de rebot obtinguda en assajos, trobar el valor de la velocitat final (en l'instant just després de l'impacte) de l'impactador, per calcular el coeficient de restitució existent en el xoc, i relacionar-lo amb la resta de variables.
- Estudiar la resposta en freqüència del circuit, per intentar clarificar si l'atenuació o saturació del voltatge pic, pot estar relacionada amb l'aparició de freqüències massa altes o massa baixes fora de la zona de treball.
- Com s'exposa anteriorment, caldrà augmentar el número d'espècimens d'assaig per confirmar hipòtesis i estudiar noves zones de resposta.
- Iniciar l'assaig en altres materials per observar quina es la dinàmica de les variables i el comportament de les anomenades "etapes" quan canvia el substrat.
- Preparar un procés de "Scale-Up" dels assajos per apropar la configuració a l'escala real.

## 9 Referències

1. American Society for Testing and Materials (2018). *Determination of the Impact Resistance of Thermoplastic Pipe and Fittings by Means of a Tup (Falling Weight)* (ASTM D 2444).
2. American Society for Testing and Materials (2015). *Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event* (ASTM D 7136).
3. Borda García, O. J., Mendoza Valero, L. C. (2019). *Modelo Matemático de un generador piezoeléctrico*. [Tesis de Doctorado, Universidad Santo Tomás ] Repositorio Institucional – Universidad Santo Tomás.
4. Castro Rios, R. S., (2015). *Estudio e implementación de un convertidor analógico digital y digital analógico sigma delta*. [Projecte Final de Grau, Universitat Politècnica de Catalunya] UPCommons.
5. Choudhary, A. (s.f.). *Top 4 Characteristics of a Good Test*. Your Article Library.[Consulta 05 Novembre 2021]  
  
Disponible a: <https://www.yourarticlelibrary.com/education/test/top-4-characteristics-of-a-good-test/64804>
6. Dragasius, E., Eidukynas, D., Jurenas, V., et al. (2021). Piezoelectric transducer based diagnostic system for composite structure health monitoring. *Sensors* [en línia]. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2 de Gener de 2021, núm. 253, pp. 14 - 19. ISSN 1424-8220. [Consulta: 10 Agost 2021]  
  
Disponible a: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/1/253>
7. Espanya, Real Decret 773/1997, del 12 de Juny, Regulació de les disposicions mínimes de seguretat i salut relatives a la utilització pels treballadors d'equips de protecció individual. Butlletí Oficial de l'Estat. Madrid 12 de Juny de 1997, núm. 140, pp. 18000 a 18017.
8. Han, J., Li, D., Zhao, C., Li, J. & Wu, X. (2021). Highly sensitive impact sensor based on PVDF-TrFE/Nano-ZnO composite thin film. *Sensors* [en línia]. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 15 de Febrer de 2019, no 830, pp. 1 - 13. ISSN 1424-8220. [Consulta: 10 Agost 2021]  
  
Disponible a: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/4/830>
9. Monje Centeno, D. (2010) *Conceptos electrónicos en la medida de la aceleración y la vibración* [Treball final de grau no publicat] Escuela Politécnica de Sevilla - Universidad de Sevilla.
10. Pérez García, M. A., Álvarez Antón, J. C., Campo Rodríguez, Ferrero Martín, F, J., Grillo Ortega, G, J., (2004). *Sensores Piezoeléctricos*. A Instrumentación Electrónica (pp. 347 - 364). España: Thomson Editores.
11. *Que es la fuerza de impacto y como se calcula* (30 Maig 2020) Ingeniería y mecánica automotriz. [Consulta: 20 Setembre 2021]  
  
Disponible a : <https://www.ingenieriaymecanicaautomotriz.com/que-es-la-fuerza-de-impacto-y-como-se-calcula/>
12. Sánchez, C. (25 d'abril de 2020). *Citar Normes Tècniques o de Qualitat – Referències Bibliogràfiques*. Normes APA (7a edició). [Consulta: 5 Octubre 2021]  
  
Disponible a: <http://normas-apa.org/referencias/citar-normas-tecnicas-o-de-calidad/>

13. Soin, N., & Shah, T. (s.f.). (2016). *Piezoelectric Effect Energy harvesting and storage textiles 12.1 Introduction*.
14. Vitola Oyaga, J., Pozo Montero, F., Tibaduiza Burgos, D., & Anaya Bejar, M,. Distributed Piezoelectric Sensor System for Damage Identification in Structures Subjected to Temperature Changes. *Sensors* [en línia]. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 31 de Maig 2017, núm. 1252, pp. 9 - 17. ISSN 1424-8220. [Consulta: 6 Setembre 2021]  
Disponible a: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/6/1252>