



**TecnoCampus**  
**Escola Superior**  
**Politécnica**

*Centre adscrit a la*



**Universitat**  
**Pompeu Fabra**  
*Barcelona*

**Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica**

**Treball de Fi de Grau**

**Dispositiu-plataforma piezoelèctric com a Energy Harvester**

**AUTOR:** PABLO GONZÁLEZ ORTEGA  
**PONENT:** DRA. VIRGINIA ESPINOSA DURÓ  
**TUTORA:** DRA. CLAUDIA DELGADO SIMÃO  
**CURS ACADÈMIC:** 2021/2022

**eurecat**  
Centre Tecnològic de Catalunya

## AGRAÏMENTS

Primerament, voldria agrair a la ponent del present projecte Dra. Virginia Espinosa Duró per presentar-me la oportunitat de construir un treball en aquesta àrea tant important i desconeguda per mi com és la investigació i més concretament, l'*energy harvesting*. També agrair el seu suport i orientació durant tot el temps que ha durat el projecte.

En segona instància, gràcies al centre tecnològic Eurecat per acollir-me i guiar-me a través del seu teixit empresarial. He crescut molt com a enginyer gràcies a aquest esforç.

També donar les gràcies a la Dra. Claudia Delgado Simão, coordinadora del projecte.

I especialment a David Otero Chavez per la seva implicació, dedicació i paciència. Sens dubte, aquest treball no s'hauria pogut realitzar si no fos per la seva ajuda en els moments més crítics.

Per últim, i no menys important, voldria agrair a tots els amics i familiars que m'han donat suport durant tot el grau, especialment els últims mesos de treball amb el TFG.

Gràcies a tots.

## RESUM

El present projecte realitza un disseny d'una electrònica capaç de condicionar, emmagatzemar i usar l'energia generada per un dispositiu-plataforma piezoelèctric flexible per l'enviament de dades, a partir de la lectura d'un sensor de temperatura mitjançant una comunicació *wireless* BLE.

Es comença partint de la definició del concepte d'*energy harvesting*, estudiant les simulacions pertinents d'aquesta etapa i tots els càlculs necessaris observant la seva viabilitat energètica. Tot seguit es passa a la fase de disseny dels diferents esquemàtics. A més a més, es crea el codi del microcontrolador necessari per tractar les dades provinents del sensor i es finalitza amb la construcció d'una placa flexible en material Kapton compacta, encabint tots els circuits en ella.

**PARAULES CLAU:** Electrònica, Piezoelèctric flexible, BLE, Energy harvesting, Kapton.

## RESUMEN

El presente proyecto realiza un diseño de una electrónica capaz de acondicionar, almacenar y usar la energía generada por un dispositivo-plataforma piezoeléctrico flexible para el envío de datos, a partir de la lectura de un sensor de temperatura mediante una comunicación BLE.

Se comienza partiendo de la definición del concepto de *energy harvesting*, estudiando las simulaciones pertinentes de esta etapa y todos los cálculos necesarios observando su viabilidad energética. A continuación, se pasa a la fase de diseño de los diferentes esquemáticos. Además, se crea el código del microcontrolador necesario para tratar los datos provenientes del sensor y se finaliza con la construcción de una placa flexible en material Kapton compacta, encajando todos los circuitos en ella.

**PALABRAS CLAVE:** Electrónica, Piezoeléctrico flexible, BLE, Energy harvesting, Kapton.

## ABSTRACT

This project designs an electronic device capable of conditioning, storing and using the energy generated by a flexible piezoelectric platform-device to send data from the reading of a temperature sensor by means of a wireless BLE communication.

We start from the definition of the concept of energy harvesting, studying the relevant simulations of this stage and all the necessary calculations observing its energetic feasibility. Then, we move on to the design phase of the different schematics. In addition, the microcontroller code needed to process the data coming from the sensor is created and the final step is the construction of a flexible board in compact Kapton material, fitting all the circuits in it.

**KEY WORDS:** Electronic, Flexible piezoelectric, BLE, Energy harvesting, Kapton.

# Índex

Índex de Figures

Índex de Taules

Glossari de termes

1. Objectius.....	1
1.1. Propòsit.....	1
1.2. Finalitat.....	1
1.3. Objecte.....	1
1.4. Abast.....	2
1.5. Context de les línies de recerca i transferència de coneixement del Tecnocampus.....	2
1.6. Perspectiva de Gènere.....	2
2. Introducció al treball.....	3
3. Marc Conceptual.....	5
3.1. <i>Energy harvesting</i> .....	5
3.1.1. Introducció a l' <i>energy harvesting</i> (EH).....	5
3.1.2. Història de l'EH.....	6
3.1.3. Tipus d' <i>energy harvesters</i> .....	7
3.1.3.1. Materials tèrmics i les seves propietats aplicades a l'EH.....	7
3.1.3.2. Materials fotoelèctrics i les seves propietats aplicades a l'EH.....	9
3.1.3.3. Materials cinètics i les seves propietats aplicades a l'EH.....	10
3.2. Piezoelectricitat.....	14
3.2.1. Introducció a la piezoelectricitat.....	14
3.2.2. Història de la piezoelectricitat.....	15
3.2.3. Introducció als materials piezoeleèctrics.....	18
3.2.4. Fonamentació de la piezoelectricitat.....	22
3.2.4.1. Piezoelectricitat Directe o Indirecte.....	22
3.2.4.2. Direccions cristal·logràfiques i Naturalesa molecular.....	24
3.2.4.3. Polarització d'un material ferroelèctric.....	27
3.2.4.4. Modelització i parametrització d'un piezoeleèctric.....	31
3.3. Electrònica digital flexible.....	39
3.3.1. Introducció a la electrònica digital flexible.....	39
3.3.2. Tècniques d'impressió.....	40
3.3.2.1. Tècniques sense impacte (Digitals), Inkjet.....	41
3.3.2.2. Tècniques amb impacte (Analògiques).....	42
3.3.3. Piezoelectricitat en l'electrònica impresa.....	43
3.3.3.1. Materials i característiques.....	46
3.4. Emmagatzemament de l'energia.....	46
3.4.1. Introducció a l'emmagatzemament de l'energia.....	47
3.4.2. Història de les Bateria.....	47
3.4.3. Història dels Condensadors.....	48
4. Estat de l'art.....	49
4.1. Piezoelectricitat (EoA).....	50
4.1.1. Usos i aplicacions com a Sensors i Actuadors.....	50
4.1.2. Usos i Aplicacions de la piezoelectricitat en l'EH.....	54
4.2. Electrònica digital flexible (EoA).....	57
4.2.1. Dispositius piezoeleèctrics totalment impresos.....	57
4.2.2. Dispositius piezoeleèctrics totalment impresos en PVDF.....	59
4.3. Emmagatzemament de l'energia (EoA).....	63
4.3.1. Bateria.....	63

4.3.1.1. Actuals tecnologies aplicades a les bateries.....	63
4.3.2. Capacitadors.....	65
4.3.2.1. Actuals tecnologies aplicades als capacitadors.....	65
4.3.3. Diferències clau i usos de l'emmagatzemament d'energia elèctrica.....	67
5. Plantejament del problema i solució.....	69
5.1 Plantejament del problema.....	69
5.2. Primera aproximació a la solució.....	69
5.2.1. Etapa Rectificadora.....	70
5.2.2. Etapa del Regulador.....	71
5.2.3. Etapa de Emmagatzematge.....	71
5.3. Segona aproximació a la solució.....	73
5.3.1. <i>Kits</i> de desenvolupament.....	73
5.3.1.1. Definició dels <i>Kits</i> de desenvolupament.....	73
5.3.1.2. Kits de desenvolupament per les etapes Rectificadora i Reguladora.....	74
5.3.1.3. Kits de desenvolupament per l'etapa de sortida.....	77
5.4. Tercera aproximació a la solució.....	80
5.4.1. Disseny general i consum de l'etapa de l'aplicació I.....	80
5.4.2. Disseny del component LTC3588.....	82
5.4.3. Simulacions per a l'etapa de <i>Harvesting</i> .....	88
5.4.3.1. Simulacions del comportament lineal de càrrega.....	88
5.4.3.2. Simulació final amb els components calculats.....	91
5.5. Quarta aproximació i disseny de les etapes final.....	93
5.5.1. Disseny general i consum de l'etapa de l'aplicació II.....	93
5.5.2. Simulacions del regulador de tensió.....	94
5.5.2.1. Simulacions amb corrent nominal.....	95
5.5.2.1. Simulacions amb una corrent sobredimensionada.....	96
5.5.3. Disseny del Microcontrolador.....	97
5.5.4. Disseny del Mòdul wireless.....	100
5.5.5. Disseny de la etapa rectificadora, reguladora i d'emmagatzemament.....	102
5.5.6. Disseny del sensor de temperatura.....	106
5.5.7. Disseny del connector.....	107
5.6. Disseny i construcció de la PCB.....	109
5.6.1. Disseny de la PCB.....	109
5.6.2. Impressió de la PCB en Kapton.....	111
5.7. Programació del microcontrolador.....	115
5.7.1. Preparació de l'entorn de treball.....	115
5.7.2. Codi Font.....	116
6. Realització de proves i resultats finals.....	121
6.1. Prova del programa sobre el Kit Nucleo-32.....	121
6.2. Caracterització del piezoelèctric flexible com a generador d'energia.....	125
6.3. Prova del mòdul <i>harvesting</i> sobre el Kit LTC3588EMSE-1.....	129
6.4. Prova del comportament <i>harvesting</i> sobre la placa.....	132
6.5. Prova del microcontrolador sobre la placa.....	136
7. Estudi Econòmic i pressupost.....	138
8. Impacte mediambiental.....	139
9. Planificació i programació del projecte.....	141
9.1. Primera planificació del projecte.....	141
9.2. Segona planificació del projecte.....	145
9.3. Tercera planificació del projecte.....	147
10. Gestió de Riscos.....	149

10.1. Gestió de Riscos.....	149
10.2. Valoració dels Riscos.....	151
10.3. Plans de contingència.....	152
10.3.1. Pla de contingència - Planificació Deficient.....	152
10.3.2. Pla de contingència – Prototip físic desigual a la simulació.....	153
11. Conclusions.....	154
12. Bibliografia.....	156

# Índex de Figures

<b>Figura 3.1.</b>	Exemple de l'ús de la generació termoelèctrica	8
<b>Figura 3.2.</b>	Representació esquemàtica de l'efecte fotoelèctric	19
<b>Figura 3.3.</b>	Seqüència de l'efecte triboelèctric Vertical	11
<b>Figura 3.4.</b>	Seqüència de l'efecte triboelèctric Horitzontal	11
<b>Figura 3.5.</b>	Efecte de magnetostricció	12
<b>Figura 3.6.</b>	Fotografia dels científics a) Pierre Curie , b) Jacques Curie i c) Gabriel Lippmann	15
<b>Figura 3.7.</b>	Estructura d'un material policristal·lí	18
<b>Figura 3.8.</b>	Material piezoelèctric policristal·lí	19
<b>Figura 3.9.</b>	Material piezoelèctric monocristal·lí	19
<b>Figura 3.10.</b>	Tipus d'estructures en el material piezoelèctric compost	21
<b>Figura 3.11.</b>	Efecte piezoelèctric directe	22
<b>Figura 3.12.</b>	Efecte piezoelèctric invers	23
<b>Figura 3.13.</b>	Figura amb els índexs i direccions d'un material piezoelèctric	24
<b>Figura 3.14.</b>	Estructura molecular d'una cel·la de PbTiO <sub>3</sub> -PbZrO <sub>3</sub>	25
<b>Figura 3.15.</b>	Deformació de l'estructura cúbica	25
<b>Figura 3.16.</b>	Procés de polarització. a) Material policristal·lí abans del procés de polarització. b) Procés de polarització. c) Dominis resultants després del procés	27
<b>Figura 3.17.</b>	Cicle d'histeresi d'un material ferromagnètic	28
<b>Figura 3.18.</b>	Tècnica de polarització per contacte en la direcció $d_{31}$	29
<b>Figura 3.19.</b>	Tècnica de polarització per contacte en la direcció $d_{33}$	29
<b>Figura 3.20.</b>	Representació del mètode Corona Poling	29
<b>Figura 3.21.</b>	Representació del mètode Electron beam poling	30
<b>Figura 3.22.</b>	Model elèctric «ideal» d'un piezoelèctric PZT	31
<b>Figura 3.23.</b>	Model elèctric «equivalent» d'un piezoelèctric	32
<b>Figura 3.24.</b>	Representació d'un model massa-molla-esmorteïdor	32

<b>Figura 3.25.</b>	Estructura habitual d'un dispositiu EH per a moviments vibratoris .....	34
<b>Figura 3.26.</b>	Exemplificació de la resposta en ressonància .....	34
<b>Figura 3.27.</b>	Caracterització de la dependència de l'acceleració en un dispositiu piezoelèctric. a) Tensió de Sortida en diferents valors de freqüència. b) Tensió de sortida (V) i c) potència de sortida ( $\mu$ W) amb els diferents valors de resistència de càrrega a cada acceleració diferent .....	35
<b>Figura 3.28.</b>	Tipus d'EH. a) En mode $d_{31}$ . b) En mode $d_{33}$ .....	37
<b>Figura 3.29.</b>	Esquema de les principals tècniques d'impressió electrònica .....	40
<b>Figura 3.30.</b>	Sistemes Inkjet. a) Continu. b) Caiguda de gota sota demanda tèrmica (thermal drop-on-demand, bubble jet). c) Gota piezoelèctrica sota demanda, (piezoelectric drop-on-demand) i d) Mecànica d'impressió d'injecció de tinta electroestàtica (electrostatic inkjet printing mechanics) .....	41
<b>Figura 3.31.</b>	Sistemes d'impressió Analògics. a) Flexografia (Flexography). b) Litografia «Offset» (Offset). c) Gravació en forat (Gravure) i d) Electrografia (Electrography) .....	44
<b>Figura 3.32.</b>	Tipus Screen printing mechanics. a) Flat-to-Flat. b) Round-to-Round .....	45
<b>Figura 3.33.</b>	Fotografia dels científics a) A. Volta, b) Thomas Edison i c) G.N. Lewis .....	48
<b>Figura 3.34.</b>	Fotografia dels científics a) Benjamin Franklin i b) William Watson .....	49
<b>Figura 4.1.</b>	Esquema de l'ús del sonar .....	50
<b>Figura 4.2.</b>	Esquematització de la guia del disc .....	51
<b>Figura 4.3.</b>	Esquematització del moviment de l'agulla .....	51
<b>Figura 4.4.</b>	Esquematització del moviment de l'agulla .....	52
<b>Figura 4.5.</b>	Dibuix en representació d'un encenedor piezoelèctric .....	52
<b>Figura 4.6.</b>	Esquema d'un motor piezoelèctric de rotació .....	53
<b>Figura 4.7.</b>	Pista de ball de Sustainable Dance Club Company .....	54
<b>Figura 4.8.</b>	Imatge real de la rajola EH creada per Pavegen .....	55
<b>Figura 4.9.</b>	Imatge del segment EH al metro de Tòquio .....	56
<b>Figura 4.10.</b>	Esquema del sistema EH en carreteres .....	56
<b>Figura 4.11.</b>	Esquema del sistema de control de la mà sensoritzada .....	60
<b>Figura 4.12.</b>	Diagrama esquemàtic del voladís amb l'actuador PVDF distribuït .....	61



<b>Figura 4.13.</b>	Imatge esquemàtica d'un condensador electroestàtic de plaques planes	.....65
<b>Figura 4.14.</b>	Gràfic comparatiu Power density vs Energy density	.....67
<b>Figura 5.1.</b>	Diagrama de blocs general per a la resolució	.....69
<b>Figura 5.2.</b>	Dibuix simplificat del rectificador síncron	.....70
<b>Figura 5.3.</b>	Esquema del regulador reductor	.....71
<b>Figura 5.4.</b>	Imatge del kit LTC3588EMSE-1	.....74
<b>Figura 5.5.</b>	Imatge del kit TPS61094EVM-066	.....75
<b>Figura 5.6.</b>	Diagrama dels tres estats del dispositiu TPS61094	.....75
<b>Figura 5.7.</b>	Funcionament Buck del dispositiu TPS61094	.....76
<b>Figura 5.8.</b>	Funcionament Boost del dispositiu TPS61094	.....76
<b>Figura 5.9.</b>	Funcionament Suplementari del dispositiu TPS61094	.....77
<b>Figura 5.10.</b>	Imatge del kit RN4020 PICTail Plus Daughter Board	.....77
<b>Figura 5.11.</b>	Imatge del kit LoRa-E5 Dev Board	.....78
<b>Figura 5.12.</b>	Imatge del kit Nucleo-32	.....79
<b>Figura 5.13.</b>	Esquema general del sistema	.....80
<b>Figura 5.14.</b>	Esquemàtic del dispositiu LTC3588	.....82
<b>Figura 5.15.</b>	Simulació de l'esquemàtic LTC3588 amb els components calculats	.....83
<b>Figura 5.16.</b>	Imatge Simulació 1. Visió de $t_{cicle}$ i $t_{inici}$ . Vin (Verd), Vout (Blau)	.....89
<b>Figura 5.17.</b>	Imatge Simulació 2. Visió de $t_{cicle}$ i $t_{inici}$ . Vin (Verd), Vout (Blau)	.....90
<b>Figura 5.18.</b>	Imatge Simulació 3. Visió de $t_{cicle}$ i $t_{inici}$ . Vin (Verd), Vout (Blau Fosc), Iout (Vermell) i Pgood (Blau cel)	.....91
<b>Figura 5.19.</b>	Imatge Simulació 4. Visió de $t_{LOAD}$ . Vin (Verd), Vout (Blau Fosc), Iout (Vermell) i Pgood (Blau cel)	.....91
<b>Figura 5.20.</b>	Esquema general i final del sistema	.....93
<b>Figura 5.21.</b>	Components per a la simulació del regulador	.....94
<b>Figura 5.22.</b>	Simulació del regulador amb corrent nominal de 20uA. Vin (Verd), Vout (Blau Fosc), Vreg (Vermell)	.....95
<b>Figura 5.23.</b>	Simulació del regulador amb corrent de 100mA. Vin (Blau Fosc), Vout (Verd), Vreg (Vermell)	.....96

<b>Figura 5.24.</b>	Esquemàtic del component STM32L031 .....	97
<b>Figura 5.25.</b>	Bateria de condensadors per a la tensió VDD del mòdul STM32L031 .....	99
<b>Figura 5.26.</b>	Connexionat extern i intern del pin NRST .....	99
<b>Figura 5.27.</b>	Esquemàtic del mòdul BLE, RN4020 .....	101
<b>Figura 5.28.</b>	Disseny propi del component LTC3588 .....	102
<b>Figura 5.29.</b>	Figura del component LTC3588, a) En 3D b) En 2D .....	102
<b>Figura 5.30.</b>	Part esquerra de l'esquemàtic de LTC3588 .....	103
<b>Figura 5.31.</b>	Part dreta de l'esquemàtic de LTC3588 .....	104
<b>Figura 5.32.</b>	Esquemàtic general del component LTC3588 .....	105
<b>Figura 5.33.</b>	Esquemàtic del sensor. a) Separació tensions i b) Circuit divisor de tensió .....	106
<b>Figura 5.34.</b>	Connectors dels circuits I. Sensor, Piezoelèctric i I/O Auxiliars .....	107
<b>Figura 5.35.</b>	Connector USB .....	107
<b>Figura 5.36.</b>	Esquema general de la disposició en la PCB .....	109
<b>Figura 5.37.</b>	PCB «rutejada» amb tots els components incorporats .....	110
<b>Figura 5.38.</b>	Imatge de la PCB en blanc i negre, preparada per a la impressió .....	111
<b>Figura 5.39.</b>	Fotografies de: a) Impressió de tinta sobre la làmina de Kapton i b) Màquina de revelat del Kapton .....	112
<b>Figura 5.40.</b>	Fotografies de: a) Plaques impreses sobre Kapton i b) Flexibilitat del Kapton .....	113
<b>Figura 5.41.</b>	Placa sobre Kapton acabada .....	114
<b>Figura 5.42.</b>	Pinout del microcontrolador .....	115
<b>Figura 5.43.</b>	Curva característica de les sondes NTC .....	119
<b>Figura 6.1.</b>	Nucleo-32 connectat amb un potenciòmetre .....	121
<b>Figura 6.2.</b>	Potenciòmetre a 10Kohm, donant 1,65V de tensió a l'ADC .....	122

<b>Figura 6.3.</b>	Taula de valors amb tensió de 1.65V .....	122
<b>Figura 6.4.</b>	Offset observat en l'ADC .....	123
<b>Figura 6.5.</b>	Error en la variable temp100 .....	123
<b>Figura 6.6.</b>	Lectura correcta del potenciòmetre a 1.65V .....	124
<b>Figura 6.7.</b>	Imatges del piezoelèctric imprès en PVF2 a) curvat i b) en plà .....	125
<b>Figura 6.8.</b>	Màquina per a proves DMA .....	125
<b>Figura 6.9.</b>	Imatge de: a) l'altaveu usat a les proves i b) Tone Generator .....	126
<b>Figura 6.10.</b>	Tensions de sortida per tipus d'ona .....	127
<b>Figura 6.11.</b>	Intensitat de sortida per tipus d'ona .....	128
<b>Figura 6.12.</b>	Imatge del Kit en proves .....	129
<b>Figura 6.13.</b>	Gràfica càrrega-descarrega del condensador (experiment 1) .....	131
<b>Figura 6.14.</b>	Placa connectada a l'altaveu .....	132
<b>Figura 6.15.</b>	Gràfica càrrega-descarrega del condensador (experiment 2) .....	134
<b>Figura 6.16.</b>	Valors del piezoelèctric vibrant .....	135
<b>Figura 6.17.</b>	Esquema de connexió del Kit amb el microcontroladors .....	136
<b>Figura 9.1.</b>	Diagrama de Gantt de la programació Inicial .....	141
<b>Figura 9.2.</b>	Diagrama de Gantt de la programació Ideal .....	143
<b>Figura 9.3.</b>	Diagrama de Gantt de la segona programació .....	145
<b>Figura 9.4.</b>	Diagrama de Gantt de la tercera programació .....	147
<b>Figura 10.1.</b>	Pla de contingència sobre una planificació deficient del projecte .....	152
<b>Figura 10.2.</b>	Pla de contingència sobre el prototip físic desigual a la simulació .....	153

# Índex de Taules

<b>Taula 3.1.</b>	Tipus de materials piezoelèctrics amb característiques d33 i Mòdul de Young .....	21
<b>Taula 5.1.</b>	Condensadors comercials reals utilitzats en la simulació .....	85
<b>Taula 5.2.</b>	Selecció de Vout en funció dels pins D0 i D1 .....	87
<b>Taula 6.1.</b>	Caracterització del piezoelèctric com a generador d'energia .....	127
<b>Taula 6.2.</b>	Resultats experiment 1 .....	130
<b>Taula 6.3.</b>	Resultats experiment 2 .....	133
<b>Taula 7.1.</b>	Pressupost del projecte .....	138
<b>Taula 8.1.</b>	Taula d'accions impactants .....	139
<b>Taula 8.2.</b>	Taula de factors ambientals impactats .....	140
<b>Taula 9.1.</b>	Taula de la programació Inicial del projecte .....	142
<b>Taula 9.2.</b>	Taula de la programació Ideal del projecte .....	144
<b>Taula 9.3.</b>	Taula de la segona programació del projecte .....	146
<b>Taula 9.4.</b>	Taula de la tercera programació del projecte .....	148
<b>Taula 10.1.</b>	Matriu de Riscos .....	151

## Glossari de termes

<b>AC</b>	Altern Current (corrent alterna)
<b>ADC</b>	Analog-to-Digital Converter (Convertidor Analògic a Digital)
<b>ADN</b>	Àcid desoxirribonucleic
<b>AO</b>	Amplificador operacional
<b>API</b>	Application Programming Interfaces
<b>ASCII</b>	American Standard Code for Information Interchange
<b>BaTiO3</b>	Titanat de Bari
<b>BLE o BLTE</b>	Bluetooth Low Energy
<b>DC</b>	Direct Currentt (corrent contínua)
<b>DMA</b>	Dynamic Mechanical Analysis (Anàlisi mecànic dinàmic)
<b>EH</b>	Energy Harvester
<b>EoA</b>	Estate Of the Art
<b>EU</b>	Europe Union
<b>EUA</b>	Estates Unites of America
<b>FA</b>	Font d'Alimentació
<b>IoT</b>	Internet of Things (Internet de les Coses)
<b>MCU</b>	Microcontrolador
<b>MIT</b>	Massachussets Institute of Technology
<b>MOSFET</b>	Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor
<b>NFC</b>	Near-fild communication
<b>NMOS</b>	N-type metal-oxide-semiconductor
<b>NTC</b>	Negative Temperature Coefficients
<b>PbTiO3-PbZrO3</b>	Zirconat de Bari
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board ((Targeta de circuit imprès)
<b>PD</b>	Proporcional - Derivatiu
<b>PET</b>	Polietilè tereftalat

<b>PMN-PT</b>	Niobat de Níquel
<b>PMOS</b>	Positive Temperature Coefficients
<b>PNIEC</b>	Plan Nacional Integrado de Energía y Clima
<b>PVC</b>	Policlorur de Vinil
<b>PVDF</b>	Polifluorur de vinilidè
<b>PVDF-TrFE</b>	Poli (fluorur de vinilidè-co-trifluoroetilè)
<b>PZT</b>	Titani de Zirconat de plom
<b>RF</b>	Radio Freqüència
<b>T<sub>c</sub></b>	Temperatura de Curie
<b>TEC</b>	Thermoelectric Cooler (refrigerador termoelèctric)
<b>TEG</b>	Thermoelectric Generator (generador termoelèctric)
<b>TP</b>	Test Point
<b>UART o USART</b>	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
<b>uC</b>	Microcontroller (com MCU)
<b>URSS</b>	Unió de Républiques Socialistes Soviètiques
<b>WSN</b>	Wireless Sensor Network (xarxa de sensors sense fils)

# 1. Objectius

## 1.1. Propòsit

Aconseguir captar, tractar, emmagatzemar i usar l'energia generada per un dispositiu-plataforma piezoelèctric imprès en material flexible.

## 1.2. Finalitat

Estudiar i formar un sistema de captació d'energia «*Energy Harvesting*» utilitzant els coneixements i l'experiència obtingudes al Grau en estreta col·laboració amb Eurecat.

## 1.3. Objecte

Aquest TFG es centrarà en dissenyar un sistema de tractament i emmagatzemament d'energia, així com en el seu posterior ús mitjançant una transferència de dades sense fils.

El sistema haurà d'aconseguir poder capturar l'energia provinent del dispositiu-plataforma piezoelèctric imprès en teixit flexible, emmagatzemar-la i posteriorment usar-la per enviar una dada d'un sensor mitjançant una transferència de dades Bluetooth, NFC o qualsevol altre protocol similar dissenyant l'electrònica necessària.

Aquesta ha d'ésser capaç de ser autosuficient energèticament i alimentar el conjunt sensor i mòdul de comunicació en el moment de la lectura i enviament de les dades.

## 1.4. Abast

En el present projecte es realitzaran, tant de forma teòrica com experimental una sèrie d'etapes per poder aconseguir emmagatzemar l'energia del dispositiu-plataforma piezoelèctric imprès en teixit flexible facilitat per Eurecat.

Això inclou simulacions amb programes informàtics com ara LTSpice mostrant les etapes, els components i els resultats al que s'arribi amb l'estudi.

Eurecat es farà responsable d'ensenyar a l'estudiant a utilitzar el programa Altium per poder arribar a concretar el disseny d'esquemàtics, així com disseny físic de PCBs i circuits elèctrics i electrònics.

Per fer possible el control del mòdul *wireless* es farà ús del software competent al microcontrolador escollit. Així doncs, es detallarà el codi necessari per fer aquesta comunicació.

La realització de les proves es farà amb la supervisió d'Eurecat i es realitzarà els assajos d'aquelles característiques i funcions vàlides mitjançant simulació. Tots els resultats teòrics es posaran a prova en laboratori i els resultats pràctics es documentaran degudament.

Queden fora del projecte tant la fabricació de la matriu piezoelèctrica com la compra de la matèria prima o els components per a la fabricació de l'equip electrònic dissenyat.

Com ja s'ha esmentat, tota la investigació pràctica i escrita es farà en els laboratoris d'Eurecat amb la supervisió i assessorament del seu equip de treball en col·laboració amb l'estudiant i el centre Tecnocampus.

## **1.5. Context de les línies de recerca i transferència de coneixement del Tecnocampus**

Aquest projecte beu directament d'assignatures com Analògica I i II, Instrumentació, Microprocessadors, Informàtica Industrial, Electrotècnia i Electrònica de potència.

També assignatures de caràcter transversal com Gestió de Projectes I i II i Sostenibilitat han aportat el coneixement necessari per desenvolupar aquest document.

El TFG ha sigut possible gràcies a la col·laboració de tot l'equip d'Eurecat al donar suport amb eines, espais, personal i coneixement de tot tipus. Aquesta col·laboració, a més, ha facilitat una metodologia de treball amb la qual no hauria sigut possible la finalització del present document.

## **1.6. Perspectiva de Gènere**

Aquest projecte es basa en l'estudi, caracterització i disseny d'un prototip funcional capaç de emmagatzemar energia generada per una cèl·lula piezoelèctrica. Com a tal, no aplica la perspectiva de gènere al ésser un projecte de característica neutre en aquest àmbit.

No hi ha cap aspecte que es redacti en el present document que faci discriminació sobre el gènere masculí, femení o altres. Així doncs, i tal i com s'ha esmentat anteriorment, en aquest TFG no es tindrà present.



## 2. Introducció al treball

Una de les fal·làcies més importants que han sigut esteses per mitjans i que té arrel fins i tot en el propi comportament de l'ésser humà és que el creixement és sempre positiu, aportant riquesa i benestar a la societat.

Actualment a Espanya, més del 46% de l'energia consumida és degut a productes derivats del petroli [1]. Aquesta dada es torna encara més rellevant si considerem que un creixement econòmic i social, sempre el segueix un creixement en consum d'energia.

Això és degut a que tot el sistema de vida actualment es basa en la producció i consumició de bens i serveis, impulsats literalment per energia elèctrica.

Per tant, pot ésser correcte dir que el creixement sempre (o com a mínim, fins a l'actualitat) inclou un augment en el consum energètic.

Degut als greus indicadors relacionats amb el canvi climàtic, a l'estat Espanyol se li ha marcat mitjançant el PNIEC una reducció d'energia anual primària de l'1,7% (2021-2030) [2]. Així doncs, i amb aquest objectiu en ment, s'han aconseguit els objectius marcats amb folgança. Segons el govern Espanyol, la eficiència energètica ha assolit els 35,4 punts dels 20 marcats així com la introducció amb força de l'ús d'energies renovables de 21.2 punts dels 20 marcats com a objectiu [3]. Cal remarcar que la pandèmia i l'aturada de la producció ha ajudat enormement a assolir aquests objectius

En el context actual, on la digitalització forma un paper clau en el canvi de paradigma de la indústria, s'hauran d'estudiar metodologies de treball i d'organització per que aquest increment en la producció no impacti directament en el consum de l'energia.

També cal destacar dintre del context actual i sobretot, futur, de l'IoT les anomenades Smart Cities. Actualment en el punt de mira.

No hi ha una definició objectiva i exacte del concepte, però és possible definir-la com una ciutat que combina la tecnologia per analitzar, optimitzar i actuar en funció de les dades captades en benefici dels ciutadans millorant els serveis que aquesta ofereix, així com l'objectiu de reduir el seu cost energètic i l'impacte mediambiental que ocasiona.

Així doncs, en aquestes Smart Cities serà necessari la captació massiva de dades per poder fer front als objectius plantejats.

Per poder fer front a aquesta «recol·lecta» massiva de dades, no només s'ha de canviar la forma actual de planificació urbanística incorporant canvis econòmics i socials de gran transcendència, si no que el sistema inclourà en una ciutat milers de petits (o no) actuadors i sensors capaços de generar aquest flux d'informació.

La qüestió és que el consum d'un actuator o sensor individualment, és fins i tot negligible en comparació amb altres sistemes que actualment ja existeixen en les ciutats. No obstant, la seva implementació massiva pot ocasionar que aquest consum es dispari, sent aquest contraproductiu en la pròpia definició de Smart city.

Altra nou camp d'aplicació amb una consolidada expansió són les anomenades WSN (Wireless Sensor Networks) o Xarxa de sensors sense fils. Aquesta, com el seu nom indica no tenen connexió a la xarxa ja sigui per a la seva situació física, de forma que són poc accessibles o per altres causes com ara la facilitat o comoditat.

Queda clar, doncs, ja sigui per la impossibilitat d'alimentar alguns d'ells al formar part de les WSN o formant d'una Smart City implica en qualsevol dels casos un augment substancial de sensors i actuadors. Tot això acaba materialitzant-se en un augment del consum elèctric, que com s'ha esmentat en aquest mateix capítol, ve clarament impulsat per energies fòssils o de caràcter no renovable.

Arribats a aquest punt, es planteja un problema de generació d'energia per a alimentar aquests sensors d'un sistema que ve impulsat únicament per l'avançament tecnològic.

El problema és difícil d'abordar, però;

I si la solució passés per fer que aquest consum extra no es reflectís directament sobre el de la ciutat? Es podria replantejar la definició de sensor?

Al cap i a la fi, els sensors poden convertir una variable d'energia en una altra amb injecció d'energia externa. Alguns d'ells inclús produeixen aquesta energia (en forma de tensió o intensitat) sense aquesta injecció «extra», i la usen per a la mesura. Per tant, si es reinterpretés aquest sistema com a generador, es podria arribar a generar energia d'una font que anteriorment només es podia mesurar.

En aquests termes va néixer l'*energy harvesting*, el qual sustenta aquest document i que més endavant es parlarà extensament.

El present TFG presenta una solució a un problema real. El concepte d'*energy harvester* i de WSN és una tecnologia àmpliament investigada en l'actualitat gràcies a les característiques que comporta la unió dels dos termes.

L'objectiu últim d'aquest escrit no és si no conscienciar i aportar una solució a la mesura de qualsevol sistema mitjançant un sensor. Aquest no només serà *wireless*, si no autosuficient i sense necessitat de connectar-lo a la xarxa o de carregar-lo amb electricitat externa. Per tant, sense aportar un augment del consum elèctric.

## 3. Marc Conceptual

### 3.1. *Energy harvesting*

#### 3.1.1. Introducció a l'*energy harvesting* (EH)

La demanda d'energia global no ha fet més que créixer. Això fa que la necessitat de produir, transportar i emmagatzemar aquesta sigui cada cop més alta.

Amb l'expectativa que les energies fòssils s'esgotin en un futur proper, s'han desenvolupat fonts d'energia alternativa per poder pal·liar aquesta manca de recursos.

Són les anomenades energies renovables.

Aquestes, amb forma de moviment, fluid, llum, calor capten l'energia generada pel propi planeta i la transformen en electricitat. Llevat de les seves pròpies limitacions, com per exemple l'energia solar que necessita inequívocament d'una font de llum per produir-se, són fonts d'energia inesgotables.

En les últimes dècades s'han produït enormes avanços en l'obtenció d'aquests recursos a macroescala ( $> \text{Watts}$ ). Tant és així, que actualment a Espanya aproximadament el 21% de l'energia produïda és «Verda» [3] [4].

Encara així, no va ser fins el 1984 que aquest camp de recol·lecció d'energia a microescala ( $< \text{W}$ , usualment  $\text{mW}$  o  $\mu\text{W}$ ) no va ser desenvolupat convertint un dispositiu captador de micro-moviments en energia [5].

Doncs, s'ha observat les infinites formes en que l'energia es dissipa de forma residual al nostre voltant. Ja sigui de forma tèrmica, de vibració o magnètica (són alguns de molts exemples) aquesta és recol·lectada, tractada i emmagatzemada per poder tornar-la a utilitzar.

D'aquesta tècnica se'n diu «*energy harvesting*».

Avui en dia, l'*energy harvesting* és considerat com una de les millors solucions a llarg termini a l'hora de produir energia i emmagatzemar-la. Com s'ha comentat abans, les seves aplicacions són molt nombroses, i per tant, els seus usos fàcilment escalables.

Inclús el cos humà allotja varies fonts d'energia en forma de rebuig, ja sigui per exemple la temperatura produïda pel propi cos que és dissipada a l'atmosfera o la cinètica al caminar. Aquests són uns dels exemples del cos humà, però això aplicat a la indústria o al transport la quantitat d'energia disponible és abundant.

En aquest camp tant extens hi ha molts tipus d'energies «residuals» que es poden aprofitar mitjançant l'*energy harvesting*. En aquest document es detallaran algunes d'aquestes, encara que de manera no exhaustiva, per poder situar la investigació que hi esdevindrà.

### 3.1.2. Història de l'EH

La primera contribució coneguda sobre l'EH de fonts naturals produir-se al 1821 a mans del físic alemany Thomas Johann Seebeck [6]. La generació d'aquesta energia es va basar en la creació de corrent elèctric en un circuit tancat conformat per dos metalls i temperatures diferents, anomenant aquest fenomen *Efecte Seebeck* [7].

Durant les següents dècades, científics com Peltier (1834), Lentz (1838) o Thomson (1851) van fondejar en aquest fonament termoelèctric i es va comprendre de manera més àmplia de forma macroscòpica. Així, van aportar a aquest camp estudis e investigacions importants referents a la termometria, la generació d'energia o la refrigeració [8].

Edmund Becquerel (1839), experimentant amb una cel·la electrolítica amb dos elèctrodes metàl·lics va descobrir l'efecte fotovoltaic [9]. Però no va ser fins el 1883 on Charles Fritts va crear la primera cel·la solar efectiva utilitzant unions formades recobrint el semiconductor (Seleni) d'una capa molt prima d'or [10].

Cap ressaltar que aquest l'efecte fotovoltaic no es va entendre fins que es va desenvolupar la Teoria Quàntica a principis del segle XX [9].

Paral·lelament, Joseph Henry i Michael Faraday van fer investigacions sobre l'obtenció d'energia elèctrica provinent del magnetisme. Aquest efecte, conegut com electromagnetisme, es va traduir en un generador real aquell mateix any a mans del propi Faraday. Va consistir en una simple placa de coure rotant entre pols magnètics, generant així una corrent en DC [8].

Però la primera invenció estretament relacionada amb l'EH i en el tema que ocupa aquest treball, la van descobrir els científics Pierres Curie i Jacques Curie al 1881 [11].

Aquests van descobrir, i posteriorment provar amb èxit, la característica que tenen certs materials cristal·lins d'exhibir un potencial elèctric al ser objectes de tensions mecàniques externes [8].

### 3.1.3. Tipus d'*energy harvesters*

En aquest camp tant extens hi ha molts tipus d'energies «residuals» que es poden aprofitar mitjançant l'*energy harvesting*. En aquest document es detallaran algunes d'aquestes, encara que de manera no exhaustiva, per poder situar la investigació que hi esdevindrà.

Aquests tipus són per exemple:

#### 3.1.3.1. Materials tèrmics i les seves propietats aplicades a l'EH

Un dels efectes més comuns al nostre entorn és la radiació d'energia en forma de calor. Per exemple, és produïda per fricció en qualsevol tipus de frens mecànics, calor residual en màquines industrials, de forma geotèrmica o inclús de forma natural en el cos humà.

Per recollir aquesta energia en forma de calor, hi ha principalment dues formes:

Primerament, l'*energy harvesting* Termoelèctric és basat en l'efecte Seebeck, que deu nom del descobridor d'aquest. Directament converteix directament el gradient de temperatura en electricitat. Aquests dispositius prenen el nom de TEGs.

L'efecte contrari a aquest (Seebeck), conegut com efecte Peltier, genera (incrementa o decrementa) una temperatura a partir d'una tensió aplicada. Com al cas invers, la tensió obtinguda és directament dependent de la temperatura diferencial. Aquests dispositius prenen el nom de TECs.

Posant el focus en l'*energy harvesting*, els dispositius que normalment s'utilitzen són els TEC ja que el seu entorn de treball és més proper a la temperatura ambient. En canvi, els dispositius TEG són optimitzats per treballar a temperatures més altes.

La tensió de sortida d'aquests dispositius-plataforma habitualment oscil·la entre els 10 mV/K fins 100 mV/K, però dependrà del fabricant. Aquests són valors de conversió força elevats i les seves aplicacions poden ser diverses.

Alguns avanços en aquest camp han arribat inclús a generar invencions en el món de la aviació [12]. Exemples com aquests suposen un gran avanç per l'*energy harvesting* ja que impulsen la idea de sostenibilitat energètica a àrees inexplorades anteriorment.

Aquest és un camp àmpliament investigat en l'última dècada per la seva fàcil implementació en Xarxes de Sensors Sense Fils (WSN). Aquests, al tenir una bateria limitada poden suportar poca càrrega de mòduls. Implementant aquest tipus de sistemes *energy harvesters* es pot allargar no només la bateria del circuit, si no fins i tot fer-la «indefinida».

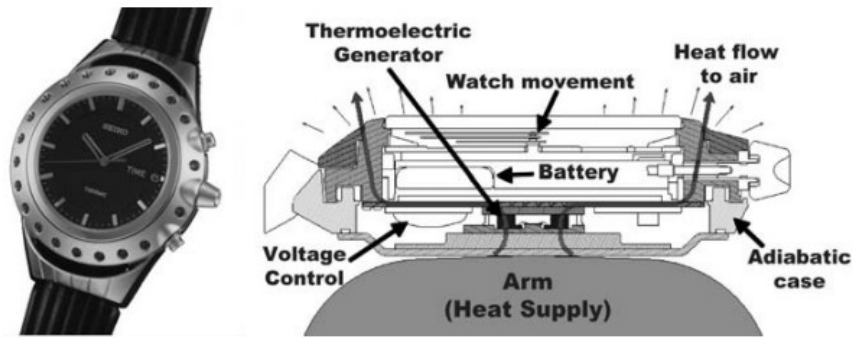


Figura 3.1. Exemple de l'ús de la generació termoelèctrica [13]

Com es pot veure a la Figura 3.1, La bateria és alimentada per un generador Termoelèctric que converteix l'energia del cos humà en electricitat útil.

Per altra banda, també existeixen equips que utilitzen el «Pyroelectric Energy Harvesting». Ón la diferència radica en que aquest efecte pot ser utilitzat per recollir l'energia que s'obté de la fluctuació d'energia.

Sigui com sigui, s'observa com l'energia tèrmica pot ser focus d'*energy harvesting* amb relativa facilitat.

### 3.1.3.2. Materials fotoelèctrics i les seves propietats aplicades a l'EH

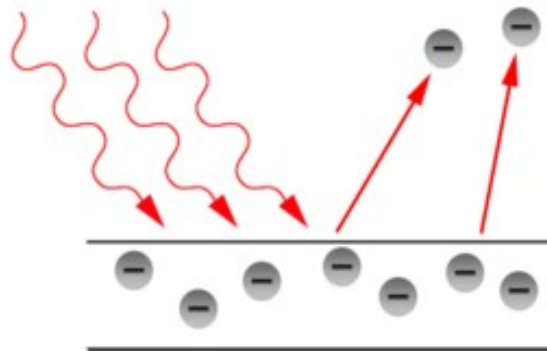
També existeixen materials que obtenen energia de la llum solar.

Durant les últimes dècades aquesta ha sigut una de les fonts d'energia més explotades comercialment gràcies a la facilitat d'obtenció i a la fàcil integració dins l'entorn.

Encara que s'hi ha desenvolupat tota una infraestructura comercial per l'obtenció a macroescala d'aquesta energia, també és fàcil d'implementar a petita escala, per petits circuits i usos.

La seva naturalesa per norma general impedeix que es pugui explotar com a dispositiu independent, ja que al dependre de la llum perd clara eficiència les hores de no-llum. Però combinant aquest tipus d'energia amb altres dispositius «*Harvesters*» es poden crear plataformes completament funcionals i amb un alt valor de recollida d'energia.

Fonamentalment, la freqüència de la llum determina una energia per fotó. En el procés de fotoemissió un electró absorbeix l'energia del fotó. Si aquest últim té més energia que l'electró, trenca l'enllaç de l'electró i l'expulsa de l'òrbita del nucli. Per tant, el material es descarrega.



*Figura 3.2. Representació esquemàtica de l'efecte fotoelèctric [14]*

Quan un element o material absorbeix el fotó, tota l'energia d'aquest és utilitzada per l'emissió de l'electró. Això vol dir que l'energia del fotó serà igual a la necessària per arrencar-lo del material, més la energia cinètica que aquest obtindrà al ser expulsat.

Actualment, s'estan desenvolupant tecnologies basades en el grafè [15] que poden incrementar substancialment l'eficiència de les cel·les fotovoltaïques. Això fa que cada cop es puguin implementar en altres aplicacions, com per exemple les esmentades a l'*energy harvesting*.

### 3.1.3.3. Materials cinètics i les seves propietats aplicades a l'EH

En el present treball es desenvoluparan principalment aquest tipus d'*energy harvester*.

L'energia cinètica és una de les principals fonts d'energia que tenim presents en el nostre entorn. Aquesta, és present a les acceleracions de qualsevol objecte, deformacions (siguin de tensió o pressió), vibracions o moviments de/en un fluid...

Com les anteriors, clarament ja s'ha utilitzat de forma macro per l'obtenció d'energia. Un clar exemple és les turbines. Siguin eòliques o utilitzada en les preses (d'aigua, com ara pantans) el fluït és utilitzat per empènyer una sèrie de pales. Aquestes, fan girar el rotor d'un generador i aquest mitjançant electromagnetisme transforma el moviment en electricitat.

Igual que l'energia solar, s'ha impulsat de forma important d'un temps en endavant per reduir de forma significativa la necessitat d'energies fòssils.

Així mateix, hi ha altres efectes cinètics que a microescala poden també captar energia i transformar-la per poder alimentar equips de baixa potència.

Un d'aquests efectes és l'anomenat Triboelèctric [16].

Comunament anomenat efecte electroestàtic per contacte que és provocat pel contacte entre dues superfícies de diferent material. Ambdues superfícies tenen polaritats i magnituds diferents, pel qual al entrar en contacte es produeix un intercanvi d'electrons.

Després d'entrar en contacte, algunes de les carregues s'adhereixen a l'altra superfície creant un desequilibri en el potencial elèctric del propi material.

Un cop carregat l'objecte, qualsevol contacte amb una altra superfície descarregada (o amb potencial diferent) produeix una descàrrega.

En la següents figura (Figura XX i Figura XXX) es pot observar com aquest efecte, al produir potencial pot ésser captat per algun dispositiu-plataforma per reaprofitar l'energia emmagatzemada.

Encara que pel seu nom (del Grec *tribein* «fregar») i per creença popular, no és necessari fregar les dues superfícies per aconseguir l'efecte (Figura 3.3).



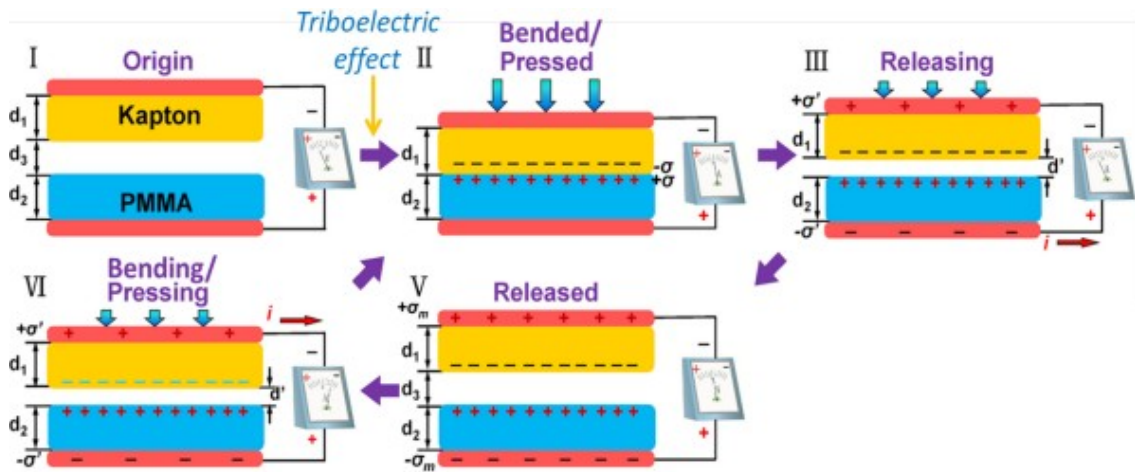


Figura 3.3. Seqüència de l'efecte triboelèctric Vertical [16]

Això sí, al fer-ho s'aconsegueix un augment de l'efecte. Això és degut a que fregant les dues superfícies s'aconsegueix una intensa triboelectricitat degut a la ràpida separació i posterior contacte. Aquest efecte facilita un canvi en els centres de càrrega dels materials.

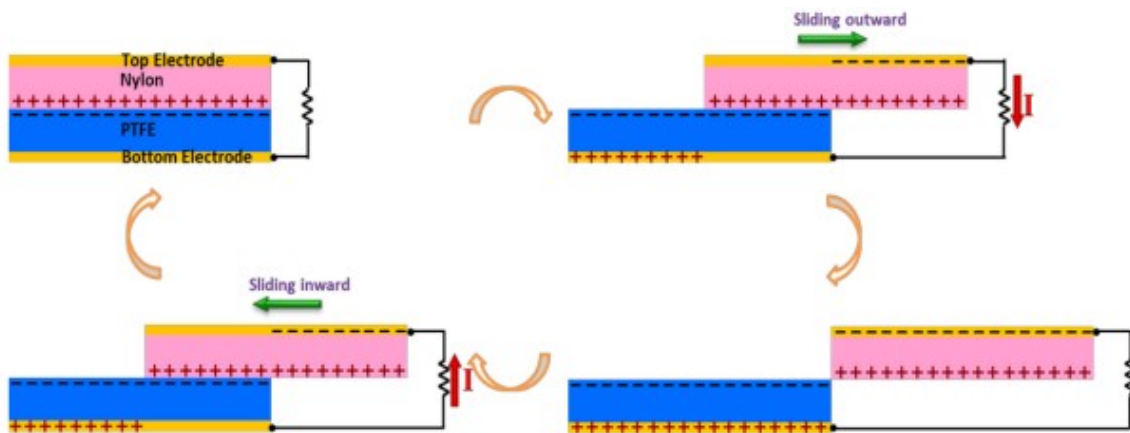


Figura 3.4. Seqüència de l'efecte triboelèctric Horitzontal [16]

Com es veu a la figura 3.4, aquesta distribució de càrregues mentre es llisca cap a un sentit dona com a resultat un moviment de càrregues.

Quan els materials deixen d'estar en contacte, la transferència d'electrons és nul·la i per tant no produeix energia.

Al lliscar cap a l'altra sentit, es produeix exactament el mateix efecte però a la inversa, donant lloc a una transferència d'electrons en sentit oposat a la primera.

En aquest sentit s'han fet diverses investigacions la respecte de com utilitzar aquestes propietats en sensors per captar energia. Com a exemple, s'ha pogut obtenir de les vibracions acústiques un sensor autosuficient que capta les ones i les transforma en electricitat mitjançant la Triboelectricitat [17].

Un altre efecte poc conegut per l'obtenció d'energia en petites quantitats mitjançant *energy harvesting* és l'efecte de Magnetoestricció [18].

Aquest és un efecte que apareix en alguns materials on la principal característica és la seva deformació davant camps magnètics (Figura 3.5).

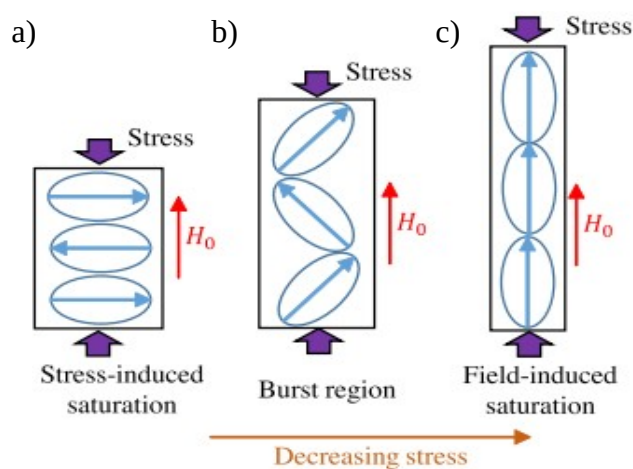


Figura 3.5. Efecte de magnetoestricció [18]

Clarament aquest efecte és invers, és a dir, que aplicant una certa deformació també produeix en ell canvis en el seu camp magnètic.

El funcionament d'aquests materials resideix en que el material magnetoestrictiu és un grup de dominis magnètics on entre ells no interactuen. Per tant cada domini magnètic té una magnetització local «independent». També val a dir que la magnetització global serà la suma dels dominis locals magnètics.

Llavors, quan el material és comprimit (figura 3.5 a) es força als dominis locals a alinear-se perpendicularment en sentit de la tensió rebuda. Així s'obté una magnetització global nul·la al contraposar-se els camps magnètics locals entre ells.

En contrapart, quan s'estira el material els camps s'alineen paral·lelament amb la tensió i creen una magnetització global màxima (Figura 3.5 c).

Per tant, si s'aprofita aquest camp magnètic (per exemple amb una bobina incorporada) per generar electricitat s'obté una forma de transformar l'energia cinètica d'una vibració en

electricitat. Això és molt útil per depèn quines aplicacions. Per exemple, aplicat a una via de tren, una sèrie d'aquests dispositius pot captar el moviment vibratori de la via i recol·lectar-la de manera autosuficient.

Com s'ha vist, hi ha multituds de formes de recol·lectar energia residual de l'entorn.

Com ja s'ha comentat, durant les últimes dècades s'han aconseguit avanços significatius en els diferents camps de l'*energy harvesting*. Això és degut a que cada cop la consciència sostenibilista és més profunda i es fa imperiós buscar solucions al problema energètic.

Com ja s'ha demostrat, les fonts d'energia residual són abundants. Per això es creu que ampliant la base de coneixement sobre els actuals sensors es pot arribar a crear dispositius-plataforma (ja són una realitat) que transformin aquesta energia històricament de rebuig i reaprofitar-la.

Encara així no ens hem centrat en el camp que ens ocupa en aquest document, i un dels que més en ús i aplicacions se li donen per les seves propietats i característiques físiques. Els materials i els dispositius-plataforma Piezoelèctrics.

## 3.2. Piezoelectricitat

### 3.2.1. Introducció a la piezoelectricitat

La piezoelectricitat és una característica física que tenen alguns materials de forma intrínseca.

Com més endavant es fonamentarà amb tot detall guarda relació amb la descentralització dels centres de gravetat de les càrregues elèctriques.

Això ve donat pel un estímul de compressió o estirament del material de forma externa. Com tots els anteriors, també succeeix a la inversa. Un material piezoelèctric es comprimeix o s'estira depenent del camp elèctric aplicat en els seus extrems.

A diferència dels materials fotoelèctrics o cinètics per moviment de fluid, no perden eficàcia per exemple quan no existeix llum solar o fluid per empènyer les pales, respectivament parlant.

Durant les últimes dècades és un dels camps que més aplicacions es donen en l'àmbit de l'*energy harvesting*. Això és gràcies a que les seves propietats com a dispositiu sensor ha sigut molt útil donant moltes aplicacions domèstiques o industrials.

### 3.2.2. Història de la piezoelectricitat

Primerament, Sir David Brewster va demostrar la piezoelectricitat utilitzant la sal de Rochelle el 1824. Aquest, va anomenar a aquest efecte piroelectricitat, que com s'ha explicat en el capítol anterior («3.1.3.1. Materials tèrmics i les seves propietats aplicades a l'EH») és la propietat d'alguns materials a generar una tensió temporal quan s'escalfen o es refreden [19].

Com també s'ha esmentat en anteriorment, el fenomen piezoelèctric va ser investigat i provat extensament pels germans Pierre i Jacques Curie, a l'any 1881 [11].

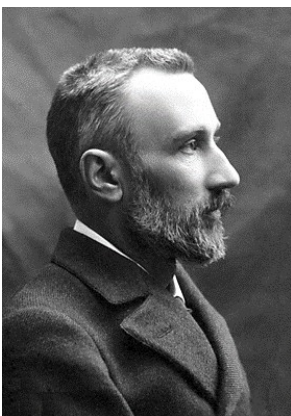
Els científics van descobrir que al pressionar certs materials (en el seu cas, van veure l'efecte sobre el quars), s'originava un camp elèctric entre les capes superficials del material perpendiculars a aquesta força.

Aquell mateix any, Hermann Hankel va posar nom a aquest efecte, anomenant-lo piezoelèctric. El nom deriva directament del Grec, on *piezein* «πιέζειν» significa pressionar o estirar, i *ēlektron* «ἤλεκτρον» que deriva d'ambre, una antiga font d'electricitat [20].

El fenomen piezoelèctric va portar a molts científics a investigar-lo, ja que un nou descobriment sempre obre moltes vies de desenvolupament totalment inexplorades.

L'efecte invers, on l'aplicació d'un camp elèctric a aquests materials provoca la generació interna d'una deformació mecànica, va ser teoritzat per Gabriel Lippmann el 1881, mitjançant la deducció matemàtica dels principis termodinàmics fonamentals. Aquest efecte piezoelèctric invers s'atribueix als germans Curie ja que va ser ràpidament demostrat mitjançant l'experimentació [21].

a)



b)



c)



Figura 3.6. Fotografia dels científics a) Pierre Curie [22], b) Jacques Curie [23] i c) Gabriel Lippmann [24].

Aquesta investigació va culminar amb el Lehrbuch der Kristallphysik de Woldemar Voigt, publicat el 1910, que descrivia les 20 classes de cristalls naturals en què es produeixen efectes piezoelèctrics [21].

La primera aplicació comercial va arribar a l'època de la Primera Guerra Mundial, utilitzant aquesta tècnica per a detectors ultrasònics per a submarins [25]. Paul Langevin *et al.* varen construir el detector submarí amb un transductor fet de cristall de quars prim enganxat entre dues plaques d'acer [21].

Moltes aplicacions van néixer els anys entre la Primera i la Segona Guerra Mundial. Al llarg de les dues dècades dels anys 1920-1940 van sorgir invencions com ara els transductors ultrasònics, els quals permetien el mesurament de la viscositat en sòlids i fluids [26]. També es va perfeccionar el detector d'ultrasons, així com investigar i crear noves aplicacions com per exemple acceleròmetres, filtres o micròfons piezoelèctrics.

Durant la Segona Guerra Mundial, grups de recerca de tres països diferents (EUA, Japó i la URSS) van descobrir les propietats piezoelèctriques del titanat de bari de material ceràmic ferroelèctric ( $\text{BaTiO}_3$ ) [21].

Després de la Guerra, les investigacions es van succeir de manera molt elevada.

A Japó, la investigació va fer-se de forma lliure. És a dir, els fabricants que investigaven les propietats piezoelèctriques dels materials compartien la informació. Això va provocar que els reptes tècnics es superessin ràpidament i es creessin nous mercats [21].

La investigació de materials també va conduir a la creació de noves famílies piezo-ceràmiques que estaven lliures de restriccions de patent. Els desenvolupaments dels fabricants japonesos van incloure filtres de senyal de televisió i ràdio, així com ignitors piezoelèctrics (més endavant es veuran) [21].

En aquesta direcció, el titanat de zirconat de plom (PZT) va ser descobert després de la guerra, al 1952. Aquest, presenta una millor sensibilitat i millors prestacions enfront a temperatura que el titanat de bari. L'Institut Tecnològic de Tòquio va emportar-se el mèrit del descobriment [27].

D'altra banda, als EUA també es van fer importants desenvolupaments tècnics. Però, el desenvolupament del mercat dels dispositius piezoelèctrics va quedar enrere en comparació al mercat japonès. Això es pot atribuir a una naturalesa de «secret» que operava dins de les empreses que feien el desenvolupament. Això va ocórrer en gran part per la creença que les patents i els processos secrets portarien a grans beneficis, ocultant així els resultats de les investigacions per la resta de companyies [21].

En conseqüència al constant treball de desenvolupament de nous materials i aplicacions iniciat el 1951, les empreses japoneses van començar a obtenir els primers beneficis a partir dels anys 60 [28].

Des d'una perspectiva internacional, el Japó va passar a liderar aquest camp, desenvolupant nou coneixement, noves aplicacions, nous processos i noves àrees de negoci [28].

L'èxit comercial dels japonesos va atreure l'atenció de la indústria de les primeres potències mundials, com ara EUA o la URSS (posterior i actualment Rússia), estimulants així la creació de nous materials i productes amb característiques piezoelèctriques. Aquest fet és fàcilment demostrable amb el gran augment del nombre de patents registrades en les darreres dècades [28].

Una altra evidència de la gran activitat que es desenvolupa al voltant dels materials i dispositius piezoelèctrics és el gran nombre de *papers* publicats en els darrers anys. Tant països emergents com la Xina o Índia, o primeres potències com Japó, Rússia, EUA o EU han experimentat un creixement elevat pel que fa a publicacions en els últims anys [28].

Així doncs, es creu convenient indicar que l'evolució d'aquesta tècnica, ja sigui com sensor, actuator o fent tasques d'*energy harvester* no ha fet més que començar. Com en aquest treball es demostra, hi ha multitud de recerques, comercials o d'investigació bàsica en aquest sentit les quals doten a aquesta tecnologia de molta força per afrontar els reptes p.e. energètics dels pròxims anys.

### 3.2.3. Introducció als materials piezoelèctrics

La piezoelectricitat és un fenomen intrínsec dels materials.

Com ja s'ha vist anteriorment, hi ha molts fenòmens que fan que les propietats dels materials canviïn. La piezoelectricitat es pot comparar fàcilment amb la magnetoestricció, per exemple.

Quan un material és comprès o estirat, en el cas de la magnetoestricció els seus pols magnètics locals variaven i es reorganitzaven. Aquí el fenomen és similar. Al comprimir o estirar un material piezoelèctric les càrregues del material es polaritzen i hi esdevé un camp elèctric.

Aquests materials són materials (en general) cristal·lins, és a dir, que la seva estructura és ordenada i amb patrons concrets i homogenis que s'estenen en els tres eixos de l'espai. Aquesta estructura cristal·lina es pot descriure com cel·la unitària. Aquesta la conforma un espai cúbic el qual conté un conjunt d'àtoms formats en una disposició concreta, la qual es replicarà per formar el cristall.

Així, podem fer una primera classificació en referència als materials piezoelèctrics:

#### Materials piezoelèctrics policristal·lins

La majoria dels sòlids cristal·lins inclouen una col·lecció de petits cristalls de diferents orientacions i mides aleatòries (figura 3.7).

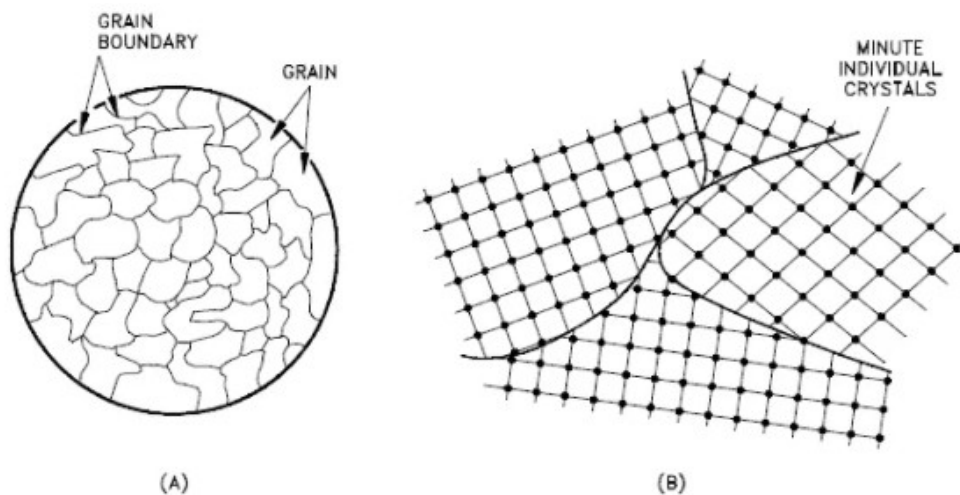
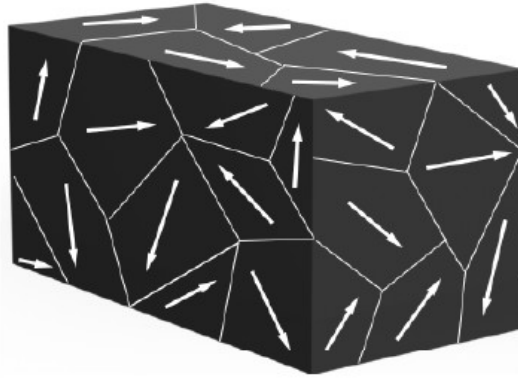


Figura 3.7. Estructura d'un material policristal·lí [29]

Cadascun dels petits grans serà un conjunt de cel·les unitàries amb la mateixa orientació. Però, aquest policristal·lí no té una disposició constant d'àtoms ja que el patró periòdic es trenca en els contorns del gra. La disposició dels grans, tant en mida com en orientació conformaran les propietats del material en conjunt.



Així doncs, en la següent figura (Figura 3.8) es pot observar l'estructura d'un material piezoelèctric policristal·lí. També s'hi ha representat les direccions dels seus camps elèctrics per cada gra.

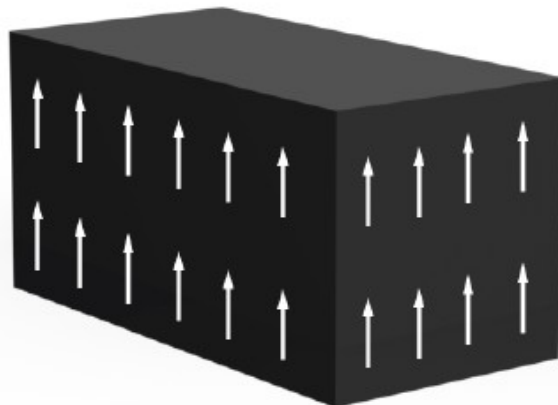


*Figura 3.8. Material piezoelèctric policristal·lí [30]*

### **Materials piezoelèctrics monocristal·lins**

A diferència dels materials policristal·lins, aquests no presenten diferències en la seva pròpia distribució dels àtoms. Això vol dir que aquests materials només presenten un gra o cristall.

Al no presentar imperfeccions o no-alineaments de les seves molècules tenen propietats piezoelèctriques superiors als policristal·lins.



*Figura 3.9. Material piezoelèctric monocristal·lí [30].*

Aquests materials, encara que es subdivideixin presenten la mateixa estructura monocristal·lina i les orientacions de les seves càrregues seguirien sent unidireccionals.

Com a materials, ja no només piezoelèctrics, són elements buscats gràcies a les seves propietats (per exemple elèctriques).

Tant és així, que enfocats a l'*energy harvesting* la energia fotovoltaica a micro-escala passi per aquest tipus de material i no policristal·lins per maximitzar l'eficiència del generador.

### **Polímers piezoelèctrics**

El concepte de polímer prové de l'expressió Grega *Poly*, de significat «moltes» i *Mers*, de significat «Parts».

Aquests són materials compostos per grans molècules o macromolècules. Aquestes macromolècules són alhora formades per una unió de molècules més petites denominades «monòmers».

Aquests polímers poden formar-se de manera natural, com per exemple les proteïnes o el propi ADN o es poden crear de forma sintètica. Un gran exemple d'aquest grup és el PVC, polímer plàstic molt conegut industrialment present en enorme quantitat de productes.

Més concretament en el cas que ens ocupa, un gran exponent de material polímer piezoelèctric és el PVDF. En els últims anys, i ampliant el camp de la robòtica col·laborativa s'han implementat aquest tipus de materials en sensors de contacte per aplicacions industrials [31].

### **Materials piezoelèctrics compostos**

Com a la majoria de camps d'estudi, al combinar dues solucions a un únic problema és possible millorar certes característiques o defectes que obtindríem al aplicar cada solució per separat.

Tan és així, que aquests últims materials són àmpliament estudiats i utilitzats.

Això es fa combinant les excel·lents propietats piezoelèctriques dels materials policristal·lins o monocristal·lins amb la flexibilitat del polímer. Aquests compostos es componen combinant estructuralment l'element polímer en un patró determinat. Doncs, la ceràmica (poli o monocristal·lina) segueix mantenint la seva estructura però el polímer, més elàstic, omple l'espai restant.

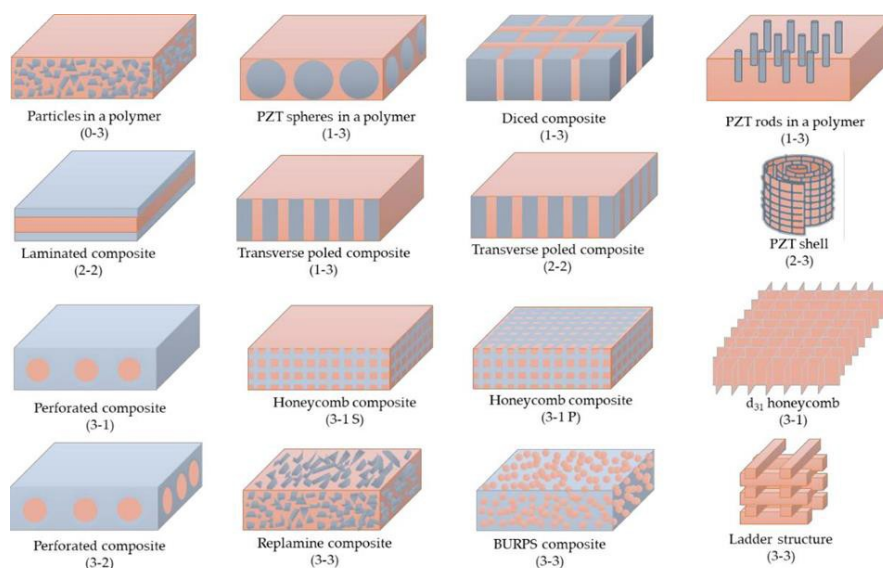


Figura 3.10. Tipus d'estructures en el material piezoelèctric compost [32].

Aquesta unió d'elements es presenta en dues fases molt diferenciades:

Primerament es troba la primera fase, o fase activa. Aquesta correspon a l'element cristal·lí amb un major coeficient piezoelèctric. Aquesta donarà forma a l'estructura del material i formarà la base per sustentar la següent fase.

La segona fase, o fase passiva, s'encarrega d'omplir l'estructura de material polimèric. La flexibilitat d'aquests compostos fa doncs que el seu rendiment piezoelèctric baixi. Això es deu al fet que un volum important del material es substitueix per polímers inactius, en comparació amb els piezoelèctrics actius, que tot el seu volum manté aquesta alta eficiència piezoelèctrica.

Per poder comparar els diferents materials, la taula següent mostrarà el coeficient ( $d_{33}$ , el qual ja es detallarà més endavant) que mesura l'efecte piezoelèctric d'aquest a més del mòdul de Young, molt important ja que mesura l'elasticitat del material en qüestió.

Piezoelectric material	Material type	$d_{33}$ coefficient [pC N <sup>-1</sup> ]	Young's modulus [GPa]
PVDF	Anisotropic, Polymer	-33	1.0-3.2
P(VDF-TrFE)	Anisotropic, Copolymer	-58	1.1-3
ZnO	Anisotropic, Crystal	27	201
BaTiO <sub>3</sub>	Anisotropic (Orthotropic), Ceramic	460	94-120
PZT	Anisotropic (Orthotropic), Ceramic	593	60
AlN	Anisotropic, Ceramic	6	308
PMN-PT	Anisotropic, Single Crystal	2000	1000

Taula 3.1. Tipus de materials piezoelèctrics amb característiques  $d_{33}$  i Mòdul de Young [32]

## 3.2.4. Fonamentació de la piezoelectricitat

### 3.2.4.1. Piezoelectricitat Directe o Indirecte

Com ja s'ha comentat en capítols anteriors, la piezoelectricitat és la propietat de certs materials cristal·lins per generar un potencial elèctric responnent a una força mecànica aplicada als mateixos. Aquest potencial elèctric és directament proporcional a la amplitud i magnitud de la força generada. Val a dir que només generen aquestes carregues quan es produeix un canvi en l'esforç mecànic aplicat. És a dir, no mantenen en el temps el potencial elèctric derivat d'una càrrega constant aplicada.

Es poden descriure dos fenòmens derivats d'aquesta propietat. Els efectes piezoelèctrics directes i els indirectes.

Un efecte piezoelèctric directe (Figura 3.11) es pot considerar que treballa com a generador. L'efecte d'aplicar-li una força mecànica i obtenir-ne una tensió elèctrica.

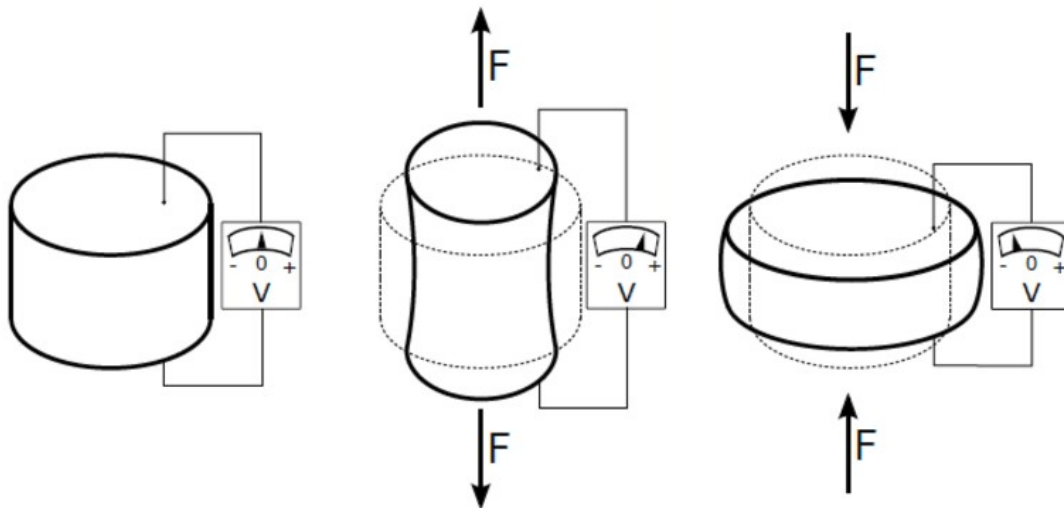
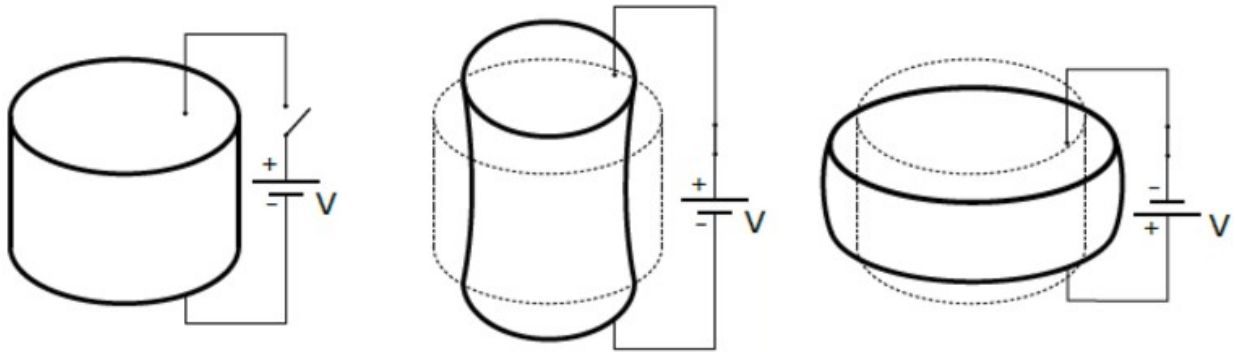


Figura 3.11. Efecte piezoelèctric directe [33]

El sentit d'aquesta tensió resultant serà el resultat d'aplicar-li una força compressora o tensional. Aquest fenomen serà molt útil quan es necessiti el dispositiu com a sensor o EH, per exemple.

D'altra banda, el fenomen invers (Figura 3.12) consisteix en convertir una tensió elèctrica en una deformació mecànica del propi material.



*Figura 3.12. Efecte piezoelèctric Invers [33]*

Aquesta característica és extremadament útil quan el que volem és un actuator mecànic. Actualment existeixen micro-motors amb aplicacions diverses que usen aquesta propietat [34].

### 3.2.4.2. Direccions cristal·logràfiques i Naturalesa molecular

Els materials cristal·lins amb propietats piezoelèctriques exhibeixen una naturalesa anisotròpica. Això és rellevant ja que en les seves propietats electromecàniques s'observa al llarg d'una direcció específica i en aquesta mostren un potencial màxim.

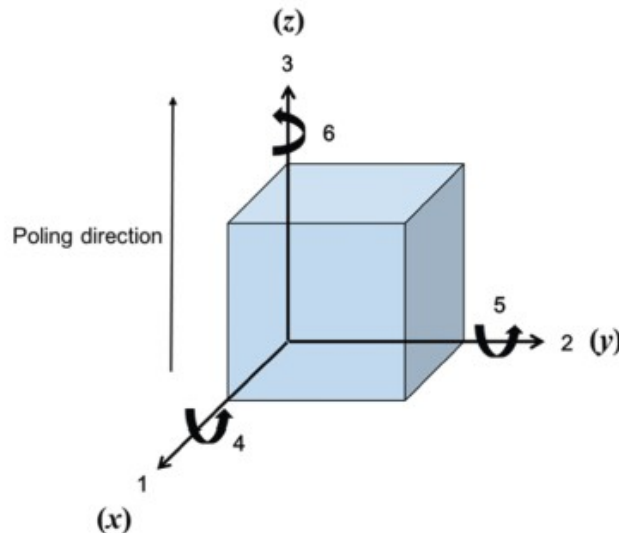


Figura 3.13. Figura amb els índexs i direccions d'un material piezoelèctric [35]

Aquestes propietats s'especifiquen generalment amb dos subíndexs els quals indiquen la direcció específica (Figura 3.13) dels paràmetres mecànics i elèctrics.

Les principals propietats es descriuen utilitzant els subíndexs 1, 2 i 3 referenciant als eixos X, Y i Z respectivament. També es poden descriure les propietats de deformació tangencial, utilitzant també respectivament els números 4, 5 i 6.

Per posar un exemple (més endavant es posarà en context), la constant piezoelèctrica  $d_{33}$  indica que els elèctrodes són perpendiculars a l'eix 3 i l'aplicació d'una compressió o estirament també en l'eix 3.

Per observar el fenomen de la piezoelectricitat és necessari un desalineament de les càrregues a nivell molecular i la generació de dipols creada per una tensió mecànica.

Això es fa mitjançant un procés de polarització el qual més endavant es detallarà.

Un determinat material, en aquest cas el  $\text{PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3$ , en un rang de temperatura les molècules es troben en equilibri. Aquí, la seva energia és mínima i per tant la distribució de càrregues també ho és.

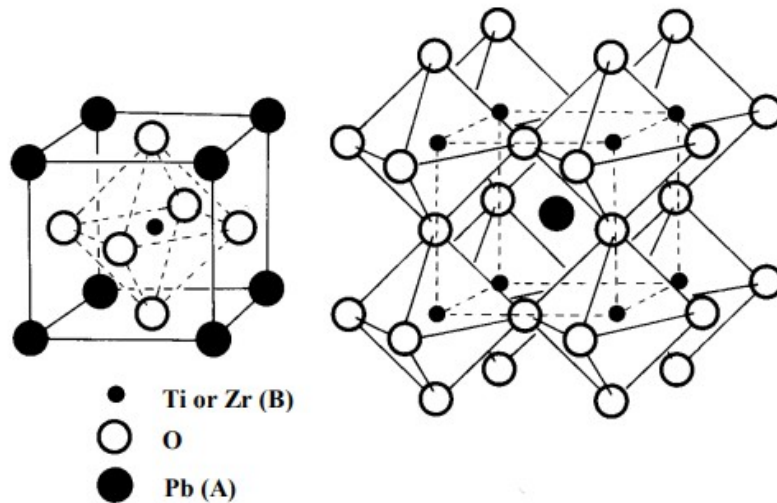


Figura 3.14. Estructura molecular d'una cel·la de  $PbTiO_3$ - $PbZrO_3$  [36]

Aquest límit de temperatura és anomenat Temperatura de Curie ( $T_c$ ). En aquest cas en concret, per sobre de  $120^\circ\text{C}$  s'observa una estructura cristal·lina perfectament cúbica.

Si es forma el material per sota d'aquesta  $T_c$ , l'estructura cúbica es deforma lleugerament. En el cas d'exemple, els ions de Plom (Pb) i de Titani / Zircó (Ti i Zr, respectivament) es van desplaçant respecte els d'Oxigen (O). Així és creat el dipol que donarà lloc al desalineament de les càrregues comentat anteriorment [36].

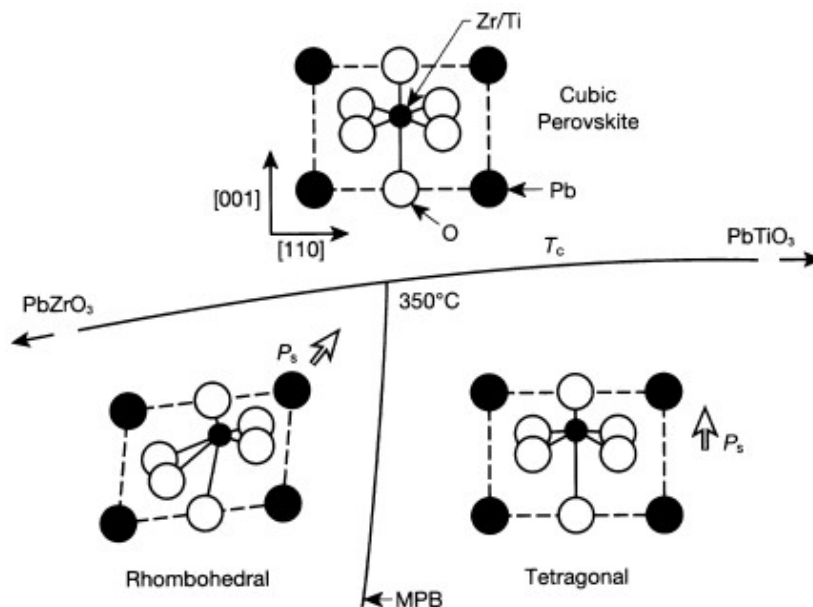


Figura 3.15. Deformació de l'estructura cúbica [36]

Aquests materials cristal·lins ara presentaran un moment dipolar, i per tant, una polarització espontània a conseqüència del conjunt alineat de dipols.

Si aquest valor de polarització ( $P_s$ ) depèn de la propietat temperatura, el material és anomenat piroelèctric. En canvi, si la direcció i magnitud d'aquest camp és variable a partir d'un camp elèctric extern, el material és anomenat ferromagnètic. És important remarcar que no tots els materials piezoelèctrics són ferromagnètics, però sí que tots els ferromagnètics tenen la propietat piezoelèctrica.

Com ja s'ha vist en la unitat «3.2.3. Introducció als materials piezoelèctrics», els cristalls ferroelèctrics tenen regions polaritzades anomenades dominis. En aquest cas la polarització és uniforme en el gra del material. Aquests dominis s'anomenen dominis ferroelèctrics.



### 3.2.4.3. Polarització d'un material ferroelèctric

Al «crear» un material ferroelèctric, obté múltiples dominis ferroelèctrics amb diferents orientacions.

En la ceràmica policristal·lina, un dels materials piezoelèctrics més importants, la tècnica de polarització és extremadament important. Aquestes ceràmiques, en general i d'entrada no posseeixen cap característica piezoelèctrica. Això és degut a les esmentades orientacions aleatòries dels seus dominis (Figura 3.16).

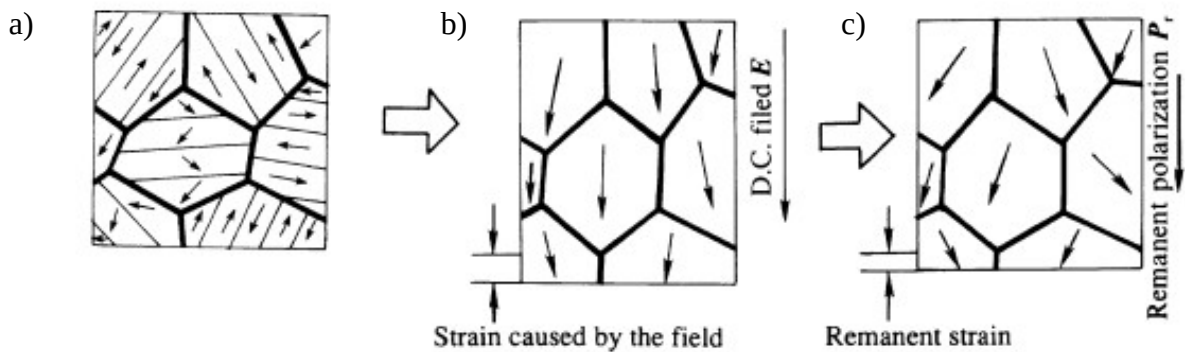


Figura 3.16. Procés de polarització. a) Material policristal·lí abans del procés de polarització. b) Procés de polarització. c) Dominis resultants després del procés [36]

El procés de polarització o *poling* consisteix en moure aquestes parets de domini aplicant un camp elèctric suficientment elevat.

Aplicant aquest camp elèctric (en DC), els seus dominis s'alineen (encara que no perfectament) per alinear-se amb el camp elèctric induït.

Quan el camp elèctric induït és eliminat, es manté una polarització. La restant tensió romanent no deixa els dipols tant alineats com durant l'aplicació del corrent continu en el moment de la polarització. Encara així, els dipols queden orientats, macroscòpicament parlant, amb la mateixa direcció i sentit.

Només un camp elèctric molt fort podria provocar la inversió de la polarització en els dominis, coneguda com a canvi de domini.

Encara que per a la inversió sí que és necessari l'aplicació d'un camp elèctric contrari (i fort) al dels dominis romanents, al cap del temps els dominis van perdent la seva orientació «induïda». Per tant, el material ferromagnètic pot acabar perdent aquesta propietat.

Per forçar un canvi d'orientació en els dominis cal esmentar que no és lineal. Aquesta corba característica té forma d'histèresi.

Això fa que la polarització ( $P$ ) és una funció de valor doble sobre el camp elèctric ( $E$ ), per tant no és directament reversible amb qualsevol camp. En la següent figura s'examinarà aquest cicle amb detall (Figura 3.17).

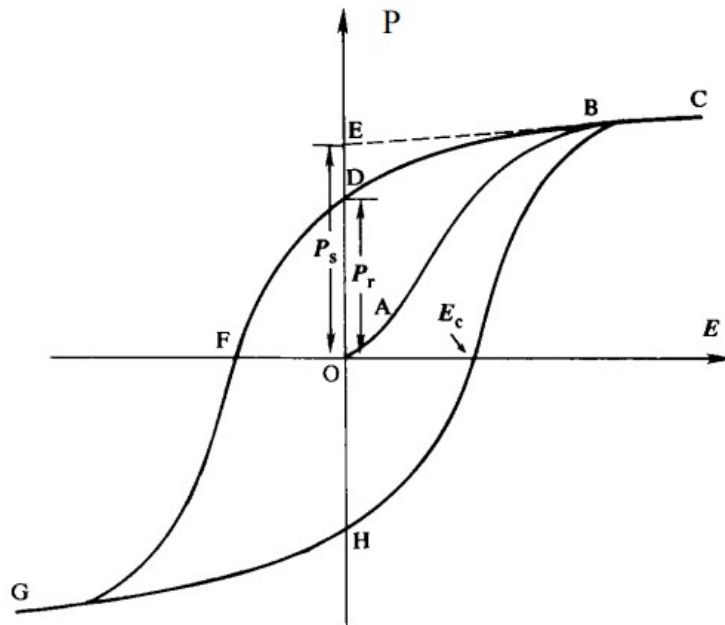


Figura 3.17. Cicle d'histèresi d'un material ferromagnètic.

En el cas que ens ocupa, un material policristal·lí ferroelèctric, partim del punt d'origen  $O$  (tota la explicació es basarà en la Figura 3.17). En aquest punt, fem una tècnica de *poling* i hi apliquem un camp elèctric ( $E$ , eix horitzontal). Aquest material anirà guanyant polaritat a mesura que aquest camp  $E$  augmenta. Això serà així fins que el material estigui completament polaritzat, i per tant, es saturi.

En aquest moment (punt  $C$ ), s'elimina el camp elèctric  $E$ . Llavors els dipols del material van reorientant-se i desalineant-se fins que arriba el punt de la tensió o polarització romanent ( $P_r$ ). En aquest punt no s'hi està aplicant un camp elèctric extern que «mogui» els dipols, però aquests queden orientats amb una certa tensió (punt  $D$ ).

Aquesta polarització romanent no pot ser eliminada a no ser, com anteriorment s'ha observat, que s'apliqui un camp elèctric denominat camp coercitiu ( $E_c$ ).

Si el camp aplicat és fort i en sentit contrari, s'arribaria al punt de saturació invers al primer cas (punt  $G$ ).

Per aconseguir aquesta polarització del material es consideren diferents metodologies, les quals s'explicaran molt breument a continuació. En qualsevol dels casos és necessari l'ús d'elèctrodes.

**Contact poling** (Polarització per contacte) El material (piezoelèctric) és connectat per dos elèctrodes en els seus extrems. Doncs, s'aplica un fort camp elèctric (normalment superior a 50 V  $\mu\text{m}^{-1}$  per als polímers piezoelèctrics al voltant de 10 V  $\mu\text{m}^{-1}$  per als compostos). Aquest camp elèctric es limita a la tensió de ruptura de l'aire, per que és habitual realitzar aquesta prova sota condicions de buit o atmosfera inerta [32].

Depenent de la direcció dels dipols i de la tensió (elèctrica) aplicada es distingiran dos mètodes:

- Si el camp aplicat és perpendicular (Figura 3.18), el coeficient dielèctric  $d_{31}$  serà el dominant i el material mostrarà un desplaçament d'estirament unidireccional a causa de l'efecte piezoelèctric [32].

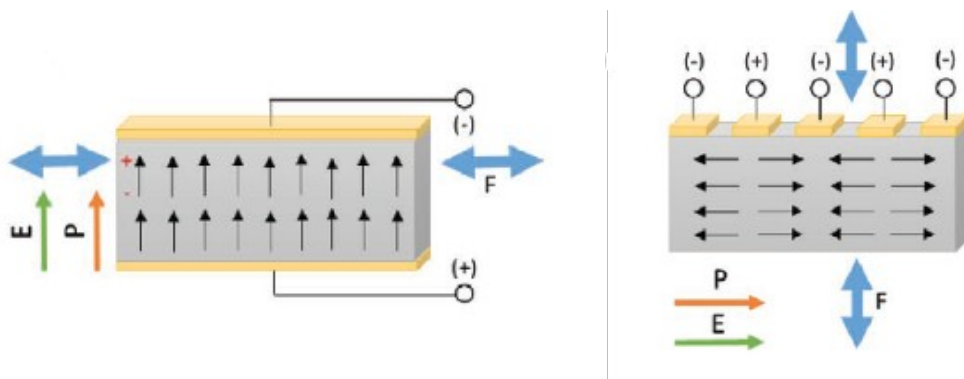


Figura 3.18. Tècnica de polarització per contacte en la direcció  $d_{31}$  [32]

- En canvi, quan la força aplicada està en el pla de la direcció polar (Figura 3.19), la constant piezoelèctrica  $d_{33}$  és dominant [32]

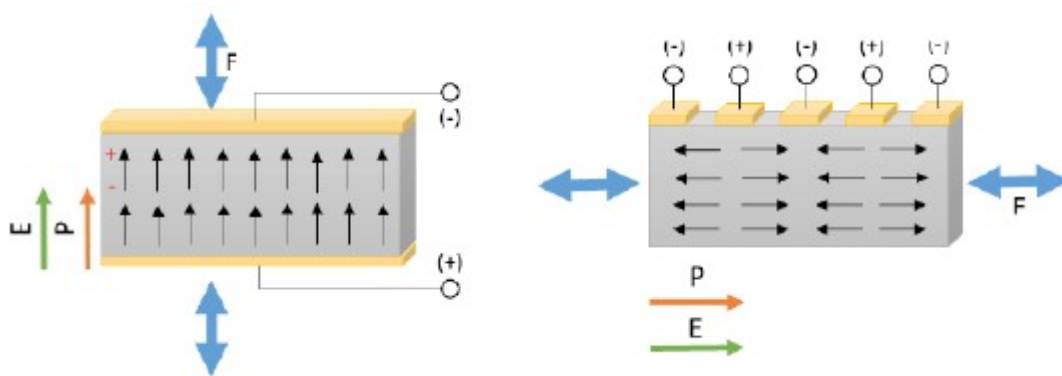


Figura 3.19. Tècnica de polarització per contacte en la direcció  $d_{33}$  [32]

**Corona poling:** Aquesta tècnica sol necessitar un important voltatge (6-8 kV) amb l'elèctrode d'agulla amb corona situat a aproximadament 2 cm de la superfície de la capa piezoelèctrica.

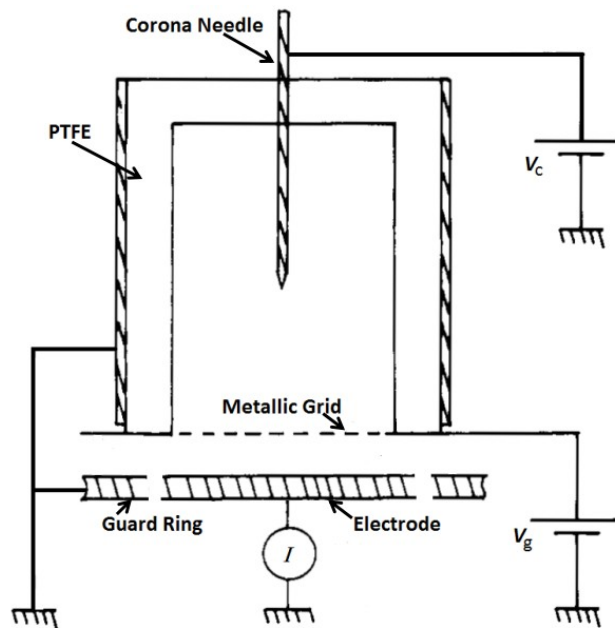


Figura 3.20. Representació del mètode Corona Poling [37]

**Photothermal poling** (Polarització fototèrmic): Es tracta d'una variació del *poling* d'elèctrodes convencionals, on el material s'escalfa mitjançant un raig làser. Això permet polaritzar el material en punts molt localitzats en zones del rang de mida  $\mu\text{m}^2$  [32].

**Electron beam poling** (Polarització per feix d'electrons): El corrent constant creat per un feix d'electrons monoenergètics amb una energia que oscil·la entre 2 i 40 kV alinea els dipòls del material. Aquesta tècnica permet polir àrees molt petites de l'ordre de  $\mu\text{m}^2$  [32].

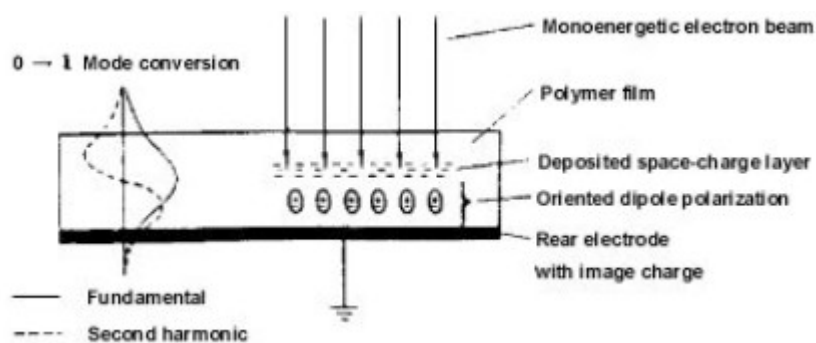


Figura 3.21. Representació del mètode Electron beam poling [37]

### 3.2.4.4. Modelització i parametrització d'un piezoelèctric

#### Modelització i funció de transferència

Per estudiar el comportament de qualsevol sistema, una tècnica molt útil és la de la modelització. Així doncs, a partir de la resposta temporal que un sistema té, es modelitza i es troben les equacions que el regeixen.

Si un material piezoelèctric és sotmès a una sèrie de vibracions, per exemple acústiques, generarà en els seus extrems un camp elèctric de la mateixa forma (freqüència i amplitud) que la vibració acústica induïda.

Com és natural, la resposta en freqüència no és plana. Hi ha freqüències a les quals el sistema maximitza l'energia elèctrica produïda per les vibracions mecàniques i altres en que aquesta és mínima.

Per tant, en aquest sentit el sistema podem dir que es comporta com un circuit RLC sotmès a una corrent alterna [38]. En la Figura 3.22 podem veure la caracterització d'aquest model «ideal».

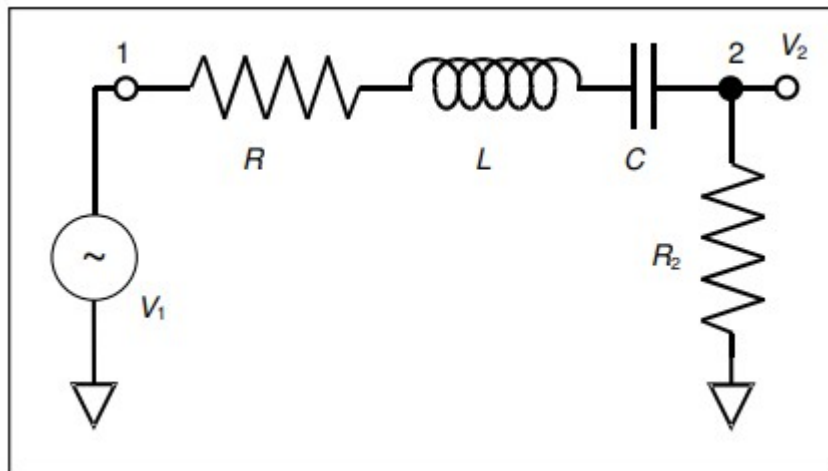


Figura 3.22. Model elèctric «ideal» d'un piezoelèctric PZT. [38]

Si ara s'usa Kirchoff per trobar les equacions del sistema, s'obté:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = \frac{dV_1}{dt} \quad (3.1)$$

També és important remarcar que aquest és un model ideal, ja que el model real comporta que els dos elèctrodes que són per sota i per sobre el material piezoelèctric funcionen com una capacitat addicional.

Així, el circuit equivalent encara que segueixi consistint en els mateixos components (R-L-C) seria el següent:

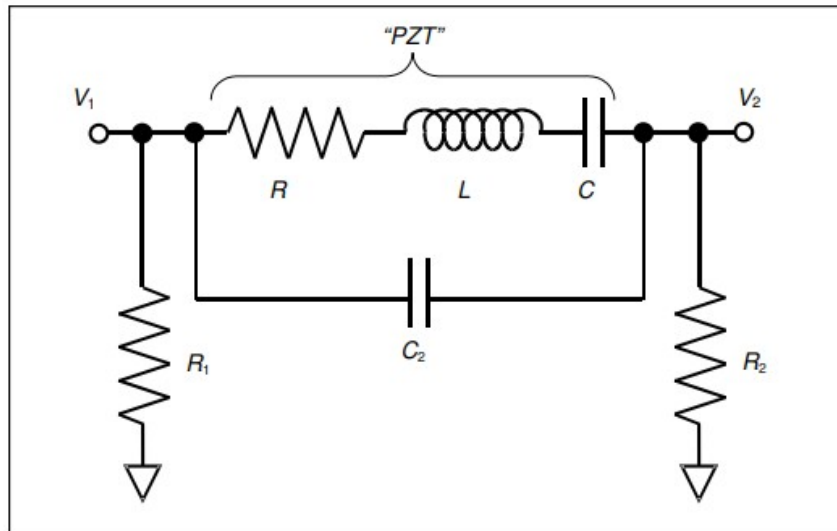


Figura 3.23. Model elèctric «equivalent» d'un piezoelèctric PZT. [38]

Un cop observat el comportament del dispositiu-plataforma piezoelèctric i fet un primer model (elèctric), és senzill deduir de (3.1) que aquest sistema té el mateix comportament que un sistema mecànic de massa-molla-esmorteïdor (Figura 3.24).

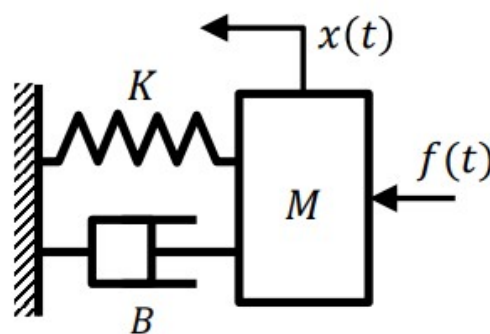


Figura 3.24. Representació d'un model massa-molla-esmorteïdor. [39]

L'analogia és clara si es recorda que l'equació del moviment d'un sistema massa-molla-esmorteïdor vibrant a causa d'una força externa dependent del temps és:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F(t) \quad (3.2)$$

Com s'ha vist en el capítol «2.2.3.2. Direccions cristal·logràfiques i Naturalesa molecular», l'espai cristal·logràfic és en tres dimensions. Per tant per poder continuar amb la formulació simplement introduïrem una altra dimensió a la formula:

$$m \cdot \frac{d^2z(t)}{dt^2} + b \cdot \frac{dz(t)}{dt} + k \cdot z(t) = -m \cdot \frac{d^2y(t)}{dt^2} \quad (3.3)$$

Per poder tractar els models amb més claredat, passem (3.3) al pla «s» usant Laplace:

$$m \cdot s^2z(s) + b \cdot s \cdot z(s) + k \cdot z(s) = -m \cdot a(s) \quad (3.4)$$

Sent  $a(s)$ :

$$a(t) = \frac{d^2y(t)}{dt^2} \quad (3.5)$$

La funció de transferència del sistema serà doncs:

$$\frac{z(s)}{a(s)} = \frac{1}{(s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m})} = \frac{1}{(s^2 + \omega_r Qs + \omega_r^2)} \quad (3.6)$$

On  $Q$ :

$$Q = \sqrt{km}/b \quad (3.7)$$

$Q$  és un paràmetre important ja que representa el factor de qualitat del sistema.  $\omega_r$  serà doncs la freqüència de ressonància del dispositiu *energy harvester*.

La freqüència natural del sistema vindrà determinada per:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (3.8)$$

$K$  és la rigidesa transversal del material i  $M$  la seva massa efectiva.

La rigidesa  $K$  es pot calcular a partir de les condicions de càrrega. Depenent de la forma que tingui el material, s'obindrà una formula o una altra. Per sistemes d'EH vibratoris, és molt comuna l'estructura de biga en voladís simple (Figura 3.24). Per tant, la seva rigidesa transversal es pot expressar com:

$$K = 3EI/L^3 \quad (3.9)$$

On E és el seu mòdul d'elasticitat, I el seu moment d'inèrcia i L és la llargada de la viga.

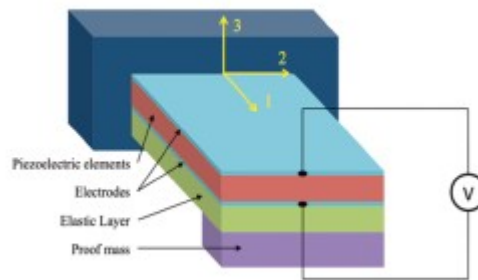


Figura 3.25. Estructura habitual d'un dispositiu EH per a moviments vibratoris [35]

En aquest cas en concret, el moment d'inèrcia per a una secció rectangular transversal és:

$$I = \left(\frac{1}{12}\right)bh^3 \quad (3.10)$$

On  $b$  i  $h$  són l'amplada i el gruix de la biga en direcció transversal, respectivament.

### Dependència freqüencial

Un cop vista la formulació necessària per modelitzar el sistema, es farà un repàs per la resposta freqüencial.

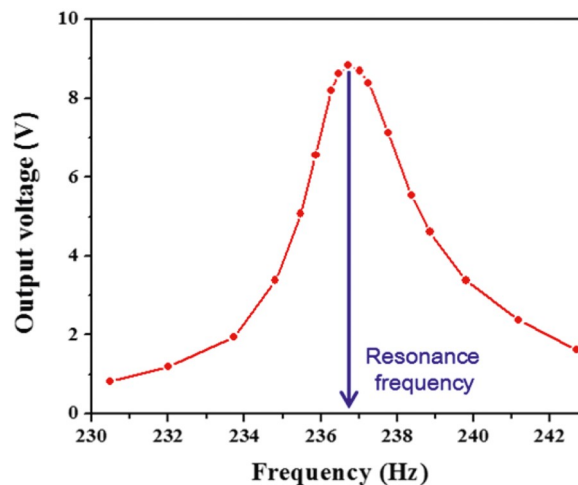


Figura 3.26. Exemplificació de la resposta en ressonància ( $V/f$ ) [35]

Com ja s'ha esmentat anteriorment, el dispositiu harvester convertirà de forma més eficaç l'energia mecànica en elèctrica quan la freqüència de vibració aplicada sigui més a prop de la seva freqüència natural.

Tant és així, que s'observa (Figura 3.25) com una oscil·lació a una freqüència allunyada de la de ressonància produeix un descens molt elevat en la tensió de sortida del dispositiu.



Doncs, crear un dispositiu per que s'ajusti a la freqüència natural del sistema en el que s'implantarà és crucial per obtenir un EH eficient.

Com es pot deduir de l'expressió (3.8) també és extremadament important escollir adequadament la dimensió i la massa efectiva del dispositiu. Habitualment es pot ajustar la seva freqüència natural ( $\omega_n$ ) ajustant aquests paràmetres.

No obstant, és possible que al obtenir-se una banda tant estreta (de freqüències) al voltant de  $\omega_r$  siguin necessaris mecanismes addicionals per capturar l'energia vibratòria. A no ser que el dispositiu es sintonitzi per una  $f$  en concret, les vibracions ambientals varien amb el temps i són relativament irregulars [35].

### Cinemàtica de la vibració

Focalitzant el dispositiu-plataforma piezoelèctric com a EH, s'haurà d'aconseguir una potència màxima a la hora de la «recol·lecció» d'energia.

Com s'acaba d'esmentar, la potència màxima s'aconsegueix quan la freqüència d'oscil·lació del material és igual a  $\omega_n$ . La potència elèctrica màxima extraïble en relació al coeficient d'esmoreïment mecànic ( $\zeta_m$ ), d'esmoreïment elèctric ( $\zeta_e$ ), massa ( $m$ ) i acceleració ( $A$ ) [35] serà regida per:

$$P = \frac{\zeta_e}{4\omega_n(\zeta_e + \zeta_m)^2} mA^2 \quad (3.11)$$

Observant (3.11) s'arriben a conclusions elementals de gran importància.

Primerament, si considerem el factor acceleració ( $A$ ) constant, s'obté que  $\omega_n$  és inversament proporcional a la potència produïda ( $P$ ). Això vol dir que s'hauran de buscar o crear dispositius que la seva freqüència natural sigui el més baixa possible per maximitzar-la.

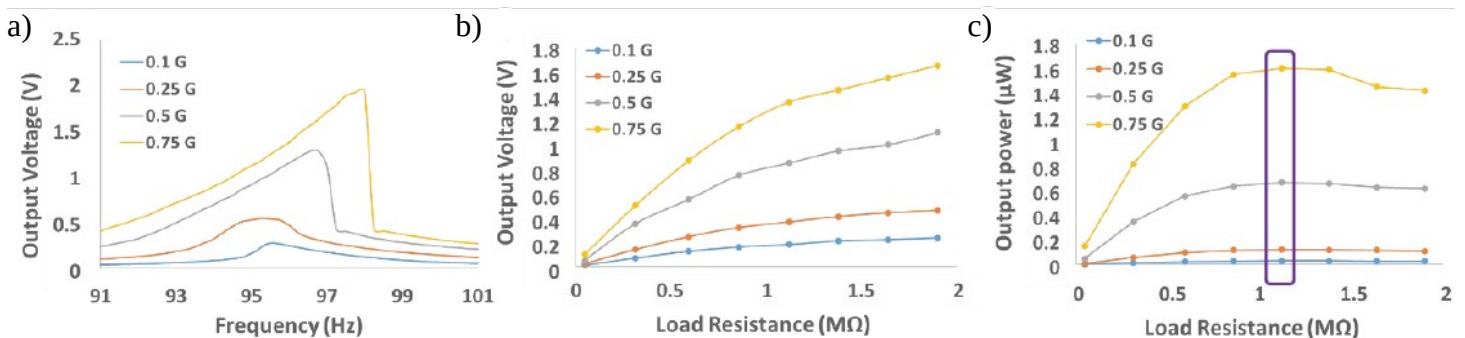


Figura 3.27. Caracterització de la dependència de l'acceleració en un dispositiu piezoelèctric. a) Tensió de Sortida en diferents valors de freqüència. b) Tensió de sortida (V) i c) potència de sortida ( $\mu W$ ) amb els diferents valors de resistència de càrrega a cada acceleració diferent.[32]

Una altra consideració és que  $P$  és directament proporcional al quadrat de l'acceleració. Això fa que es limiti la potència extreta de l'EH dependent de quina  $A$  es triï. Per exemple, com es pot comprovar a la Figura 3.26 a, b i c), La potència (o la tensió) generada a forces  $G$  més baixes és també més baixa, i viceversa.

Per últim, si ens fixem en els termes d'esmoreïment s'observa com la capacitat de generar energia (potència) és més elevada si  $\zeta_m = \zeta_e$ .

Per tant:

$$P_{e, \max}(\omega_n) = \frac{mA^2}{16\omega_n\zeta_m} = \frac{mY^2\omega_n^3}{16\zeta_m} \quad (3.12)$$

Relacionant el factor de l'amplitud de l'acceleració ( $A$ ) amb la deflexió de la massa ( $Y$ ):

$$A = \omega_n^2 Y \quad (3.13)$$

D'acord amb la fórmula (3.12), aquesta és la potència mecànica màxima que pot transformar un material piezoelèctric de les característiques esmentades a energia elèctrica per una freqüència de ressonància en concret.

### Parametrització de l'efecte piezoelèctric

Un cop coneixem les propietats dels dispositius piezoelèctrics (vibratoris, en aquest cas) i les fórmules que regeixen el seu model, podem caracteritzar aquests mateixos materials amb una sèrie de paràmetres que permetran quantificar l'efecte piezoelèctric.

Principalment hi ha dues equacions que constitueixen aquest efecte:

$$D_i = d_{ij}\sigma_j + \epsilon_{ii}^T E_i \quad \text{or} \quad D_i = e_{ij}S_j + \epsilon_{ii}^S E_i \quad (3.14)$$

$$S_j = s_{ij}^E \sigma_j + d_{ij} E_i \quad \text{or} \quad T_j = c_{ij}^E S_j - e_{ij} E_i \quad (3.15)$$

En aquestes dues equacions, s'hi observen diferents termes.

$D$  és el desplaçament elèctric,  $S$  la deformació mecànica del material,  $\sigma$  és la tensió mecànica,  $E$  el camp elèctric,  $c$  el coeficient de rigidesa elàstica,  $s$  el coeficient de compliment elàstic i per últim  $\epsilon$ , que és la permitivitat del dispositiu.

Els superíndex utilitzats en (3.14) i (3.15) es refereixen a les mesures preses sota aquell superíndex constant. Per exemple,  $s^E$  indica que aquest paràmetre es mesura amb un camp elèctric  $E$  constant.

Els paràmetres  $d$  i  $e$  són paràmetres de coeficients elèctrics de tercer rang.

Aquests mateixos paràmetres es poden formular amb les equacions:

$$d_{ij} = \left( \frac{\partial D_i}{\partial T_j} \right)^E = \left( \frac{\partial S_j}{\partial E_i} \right)^T \quad (3.16)$$

$$e_{ij} = \left( \frac{\partial D_i}{\partial S_j} \right)^E = \left( \frac{\partial T_j}{\partial E_i} \right)^S \quad (3.17)$$

*Nota:* T indica en aquest cas la tensió mecànica zero a la que es fa la mesura o càlcul.

A més la primera igualtat correspon a l'efecte directe (superíndexs E) i la segona a l'efecte invers (superíndexs S i T)

L'equació (3.16) correspon a la polarització per unitat de tensió mecànica generada aplicada a un material amb característiques piezoelèctriques. Aquest efecte (piezoelectricitat), al ser possible de forma inversa, fa correspondre aquest paràmetre a la capacitat de generar tensió mecànica a partir d'una unitat de camp elèctric aplicat [40].

Tot i que, generalment, els materials piezoelèctrics tenen uns coeficients més baixos en mode  $d_{31}$  que en el mode  $d_{33}$ , El primer és més utilitzat gràcies a que les formes més usades en EH vibrants són las de biga volant (Figura 3.24). Això es deu a que aquesta estructura, al doblegar-se produeix més esforç lateral que vertical (Figura 3.27) [41].

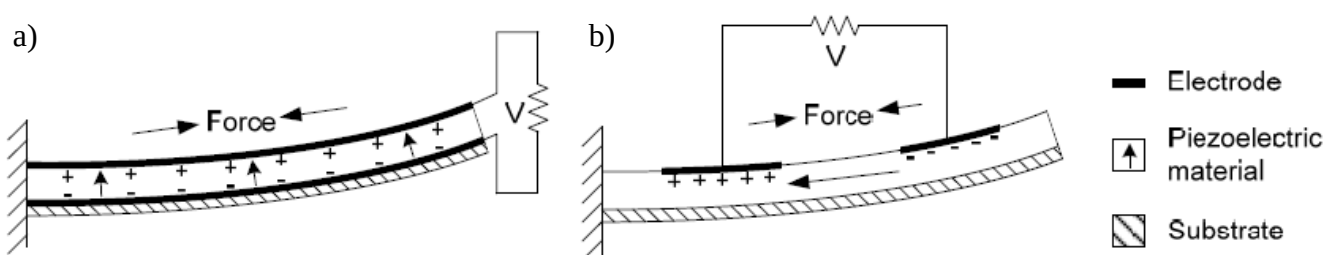


Figura 3.28. Tipus d'EH. a) En mode  $d_{31}$ . b) En mode  $d_{33}$  [41]

Un altre factor molt important és el coeficient d'acoblament electromecànic  $k$ , el qual indica el ràtio d'energia mecànica que és capaç de transformar en energia elèctrica. Com tots els

paràmetres, també funciona a la inversa. És a dir, també indica el ràtio d'energia elèctrica que és capaç de transformar en energia mecànica.

Les equacions que relacionen aquest comportament són:

$$k_{33}^2 = \frac{\text{Stored energy}}{\text{Input mechanical energy}} \quad (3.18)$$

La qual deriva en:

$$k_{33} = \sqrt{\frac{d_{33}^2}{e_{33}^T s_{33}^E}} \quad (3.19)$$

*Nota:* Les equacions són formulades per als subíndex 33. Però es poden completament extrapolar a altres subíndexs, com ara l'esmentat i comunament utilitzat 31.

Altres paràmetres importants és per exemple la constant piezoelèctrica efectiva  $g$ . Aquest és referit al camp elèctric que genera un material piezoelèctric per unitat de tracció mecànica. Com anteriorment, també és aplicable de forma inversa [40].

S'expressa com:

$$g_{ij} = \left( \frac{\partial E_i}{\partial T_j} \right)^D = \left( \frac{\partial S_j}{\partial D_i} \right)^T \quad (3.20)$$

*Nota:* Com a l'expressió (3.16) i (3.17), primera igualtat correspon a l'efecte directe (superíndexs D) i la segona a l'efecte invers (superíndexs T).

La tensió generada per un dispositiu convencional d'EH utilitzant la configuració d31 és:

$$V_{31} = \sigma_{xx} g_{31} t_{xx} \quad (3.21)$$

Sent  $t$  el gruix de la capa piezoelèctrica.

Clarament és visible una dependència proporcional a l'energia capturada pel dispositiu i aquest gruix  $t$ .

Per tant, a mesura que aquest gruix va disminuint, pot arribar a no obtenir suficient tensió elèctrica el dispositiu per superar el circuit rectificador (si es vol capturar en DC). Així doncs, per dispositius amb una capa inferior a d'1  $\mu\text{m}$  (principalment menys de 0,5  $\mu\text{m}$ ) és molt difícil que s'utilitzin com a EH [35].

## **3.3. Electrònica digital flexible**

### **3.3.1. Introducció a la electrònica digital flexible**

La electrònica flexible és una tecnologia dissenyada per a la fabricació de tot tipus de circuits elèctrics utilitzant materials plàstics. Això permet crear dispositius d'alta eficiència, compactes i resistents.

Un dispositiu que utilitza aquesta tecnologia obté una sèrie d'avantatges al adquirir aquesta característica flexible. Primerament permet a aquest circuit; t ajustar-se a les necessitats d'espai requerides, a més d'obtenir un alt grau de resistència.

Centrant-no en el tema que ens ocupa, els dispositius piezoelèctrics també poden mantenir aquestes propietats dins de l'electrònica impresa sent aquests peces clau per al futur de la robòtica col·laborativa. La possibilitat de crear una pell artificial flexible amb sensibilitat augmentarà el grau, per exemple, de seguretat en l'entorn de treball.

També serà important per dispositius mèdics que requereixin un alt grau d'adaptabilitat i sensibilitat en les operacions cirurgies.

Durant dècades hi ha hagut un enorme progrès en les tècniques d'impressió, i en concret d'impressió de circuits i dispositius electrònics ja siguin d'àmbit digital o analògic.

Aquesta tecnologia utilitza un conjunt de tècniques de fabricació additiva on capes de material funcional es dipositen sobre un substrat amb un determinat disseny o patró [32].

Les següents línies descriuran els tipus d'impressions d'electrònica en materials flexibles que hi ha referenciant també als materials piezoelèctrics.

### 3.3.2. Tècniques d'impressió

En la electrònica digital impresa es poden distingir clarament dos grups.

El primer, anomenant impressió sense impacte (impressió digital) no utilitza un patró fixe per ser imprès i es controla aquesta mitjançant tècniques digitals. Com es pot observar a la Figura 3.29, aquesta tècnica integra l'electrofotografia, la magneto-grafia i la Inkjet, per expulsió de raig de tinta. Aquesta última serà estudiada amb més profunditat més endavant.

El segon grup s'anomena impressió per impacte (o impressió analògica). Aquest tipus necessita d'una màscara o patró per ser impresa. I es poden destacar tècniques tan variades com poden ser la Gravure (o gravació en forat), la litografia, la flexografia o la serigrafia. Com en el cas de la impressió sense impacte s'examinarà més a fons una de les tècniques, la serigrafia.

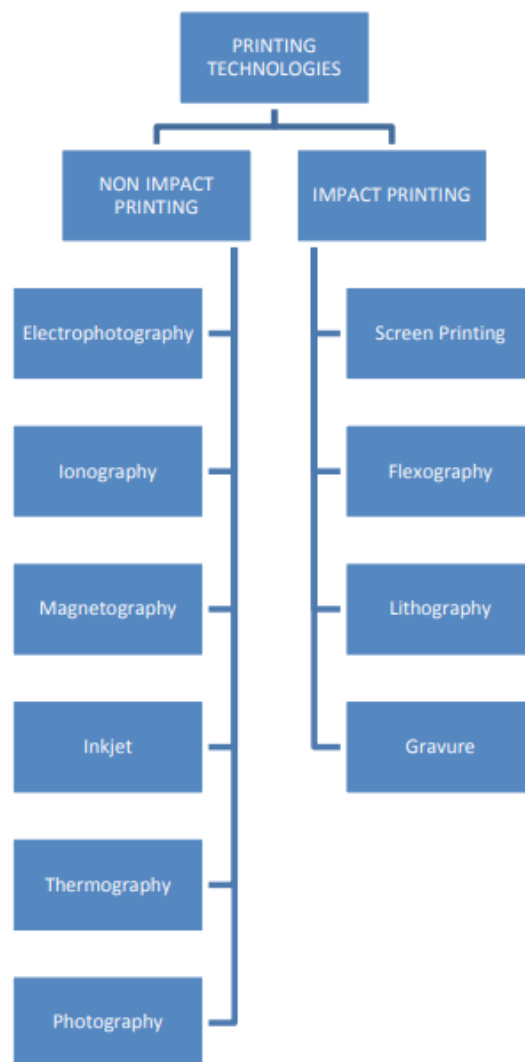


Figura 3.29. Esquema de les principals tècniques d'impressió electrònica [42]

### 3.3.2.1. Tècniques sense impacte (Digitals), Inkjet

En general, es poden distingir dues categories importants a l'hora de descriure els sistemes per raig de tinta (*Inkjet*): Sistema de raig continu (*Continus Inkjet*) i sistemes d'injecció de tinta sota demanda (*Drop-on-demand Inkjet*).

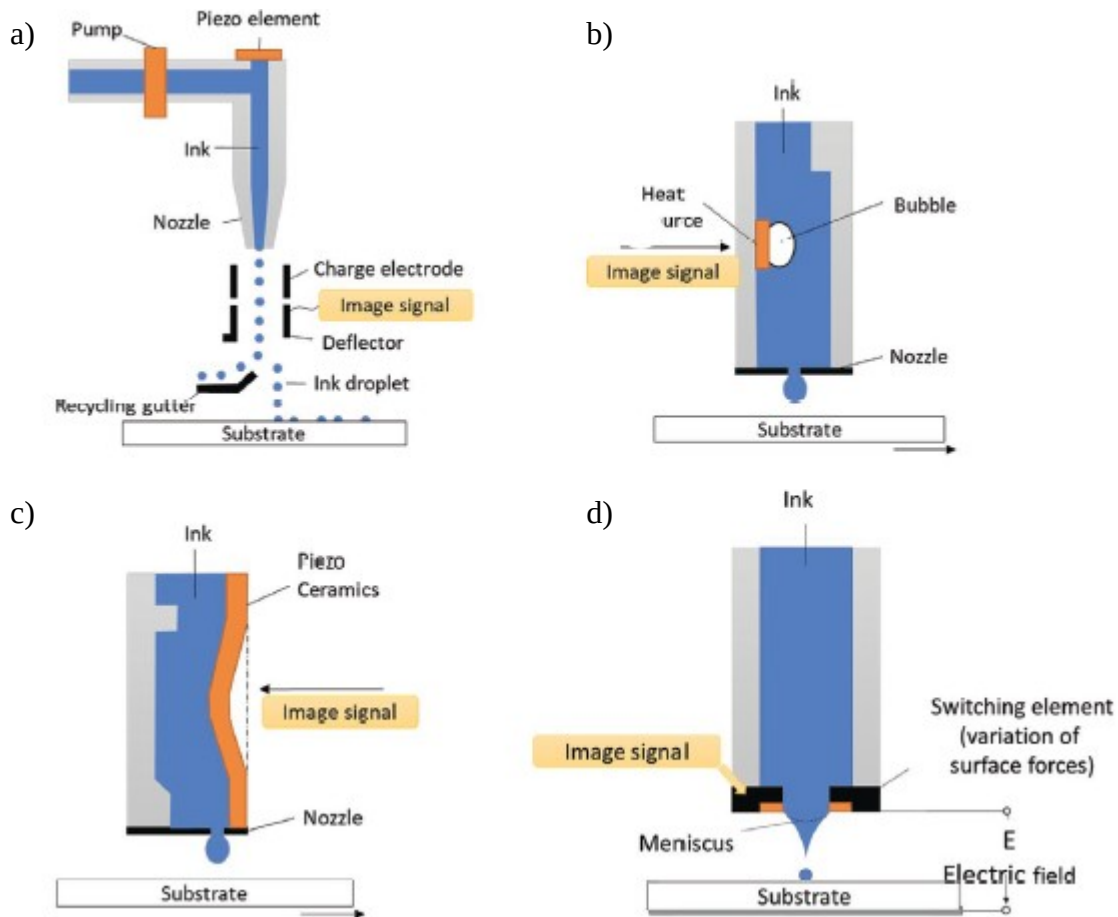


Figura 3.30. Sistemes Inkjet. a) Continu. b) Caiguda de gota sota demanda tèrmica (*thermal drop-on-demand, bubble jet*). c) Gota piezoelèctrica sota demanda, (*piezoelectric drop-on-demand*) i d) Mecànica d'impressió d'injecció de tinta electroestàtica (*electrostatic inkjet printing mechanics*).

En el primer grup, el procés es tracta d'un sistema d'*injecció de tinta continuu* (Figura 3.30 a). Això ve a dir que només una part del flux de tinta (en forma de petites gotes) acaben en el substrat durant d'impressió del component.

En canvi, els processos d'impressió Inkjet sota demanda són més variats. En aquest grup la tinta es servirà només si el sistema ho requereix.

Així, es poden classificar i diferenciar per el mecanisme pel qual una gota de tinta és generada. Alguns d'aquests exemples són:

***Thermal drop-on-demand*** (Figura 3.30 b)

Aquest mètode utilitza l'energia tèrmica escalfant la tinta fins el seu punt d'ebullició. Així, la tinta és expulsada per l'orifici «en contacte» amb el substrat a conseqüència de la pressió exercida per la bombolla de vapor creada.

***Piezoelectric drop-on-demand*** (Figura 3.30 c)

Aquest mètode utilitza un canvi de volum en la càmera de la tinta per expulsar un volum igual de tinta al substrat. Això és possible gràcies al desplaçament de part de la cambra degut a la piezoelectricitat (àmpliament estudiada en el present document). Llavors, les ones de pressió es converteixen en la velocitat del propi fluid, desencadenant l'expulsió de la tinta i facilitant així la impressió.

***Electrostatic inkjet printing mechanics*** (Figura 3.30 d)

Per últim, d'impressió del raig de tinta electroestàtic es basa en la creació (intencional) d'un camp elèctric entre el substrat i el propi raig de tinta. La gota és generada degut a la atracció d'aquest camp cap el substrat. Al aplicar aquest camp, la gota es atreta i mitjançant un pols (una senyal elèctrica o per calor) s'allibera de la cambra de tinta i impregna el propi substrat.



### 3.3.2.2. Tècniques amb impacte (Analògiques)

En aquest grup de tècniques analògiques podem trobar tècniques com la flexografia (*Flexography*), Litografia «Offset» (també coneguda com *Offset*), gravació en forat (*Gravure*), Electrografia (*Electrography*) o la serigrafia (*Screen printing*).

Més endavant detallarem amb més detall l'*Screen Printing*, però primerament s'explicarà (no en profunditat) algunes de les tècniques existents.

#### ***Flexography*** (Figura 3.31 a)

Amb un funcionament semblant a la impremta de Gutenberg [42], on la superfície elevada es tinta, i aquesta és transferida al substrat mitjançant corròns. Encara que sigui una tècnica fàcil d'implementar, s'ha de tenir cura de que la pressió aplicada sigui la necessària per transferir la tinta al substrat. Si no, la electrònica impresa podria perdre/canviar alguna de les seves propietats. Degut al material utilitzat (actualment) en les planxes, la impressió també és possible fer-la sobre material rugós [42].

#### ***Offset*** (Figura 3.31 b)

Aquest procés transfereix la tinta al substrat mitjançant un procés plano-gràfic. Així, utilitza una forma d'impressió amb una plantilla amb regions hidrofòbiques o hidrofíliques per tal de repel·lir o atraure la tinta. A la electrònica impresa, al utilitzar aquests dos tipus de fluïts, tant els problemes de contaminació creuada com el tipus de materials utilitzats com a substrats no són absorbents es pot produir una pèrdua de fidelitat en el patró. Per aquest motiu, encara que és viable, no és un mètode gaire utilitzat en aquest camp d'aplicació [32].

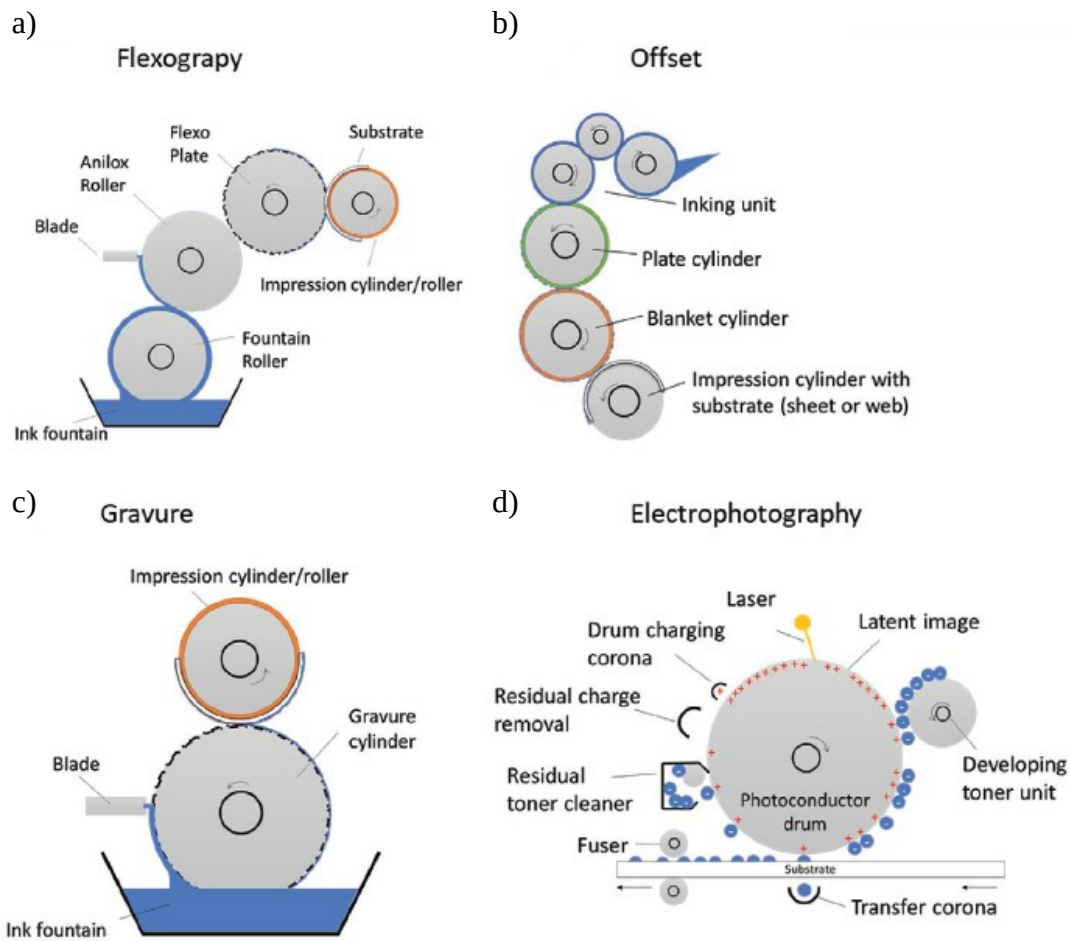


Figura 3.31. Sistemes d'impressió Analògics. a) Flexografia (Flexography). b) Litografia «Offset» (Offset). c) Gravació en forat (Gravure) i d) Electrografia (Electrography).

### **Gravure** (Figura 3.31 c)

Aquesta tècnica es pot entendre com la contraposició a la Flexografia. Aquí els patrons de dibuix són gravats al mateix cilindre. Aquest gravat crea petits forats de tinta que s'omplen quan el cilindre gira. Un cop la tinta és al cilindre, l'excés d'ella és eliminat per una fulla (*Blade* in picture). Aquest mètode té una gran avantatge ja que proporciona una fidelitat al patró molt elevada a més de reduir el nombre de fases intermèdies. La principal desavantatge és que aquesta tècnica és molt cara, ja que s'ha de gravar el cilindre per a cada patró [42].

Però si alguna de les tècniques en la impressió d'electrònica és coneguda i utilitzada, aquesta és la de serigrafia o *Screen Printing*.

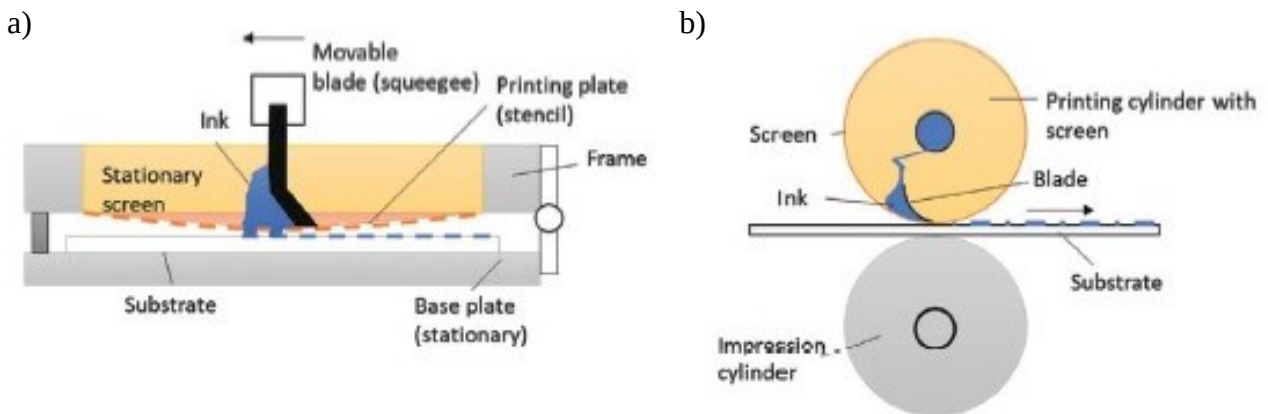


Figura 3.32. Tipus Screen printing mechanics. a) Flat-to-Flat. b) Round-to-Round [32]

### **Screen Printing** (Figures 3.32 a i b)

És la tècnica d'impressió que més desenvolupament ha obtingut en els últims anys. Això és possible gràcies al seu baix cost, simple i amb la possibilitat de fabricar superfícies importants. Com a mètode analògic, segueix requerint d'un patró per poder imprimir, i serà mitjançant una fulla la que forçarà la tinta. Clarament això requerirà una viscositat especial per part de la tinta [32].

Les tècniques més usades d'*Screen Printing* són:

*Flat-to-Flat Method* (Figura 3.32 a), el qual una fulla mòbil (o rasqueta) obliga la tinta a passar per les obertures de la pantalla cap al substrat d'impressió [32]

*Round-to-Round Method* (Figura 3.32 b), La pantalla d'impressió és cilíndrica amb tinta dins del cilindre d'impressió. La màscara d'impressió, el substrat i el cilindre d'impressió es mouen alhora que es produeix la transferència de tinta al substrat [32].

Però també existeix el mètode mixt,

*Flat-to-Round Method*, Barreja d'ambdues tècniques. La planxa d'impressió és plana i la impressió sobre el substrat es realitza mitjançant un cilindre d'impressió giratori que es mou de manera sincrònica. Una fulla estàtica s'adapta a la superfície del substrat transferint la tinta [32].

### 3.3.3. Piezoelectricitat en l'electrònica impresa

#### 3.3.3.1. Materials i característiques

Com ja s'ha explicat extensament, hi ha diferents tipus de materials amb la capacitat piezoelèctrica. Així doncs, en aquest apartat es detallarà la diferència en la seva aplicació a la impressió electrònica.

Una de les principals característiques que han de tenir els materials és l'anomenat coeficient piezoelèctric ( $d_{33}$ ). Un elevat  $d_{33}$  proporciona al material la capacitat de detectar i transformar petites deformacions. Si es treballa en INVERSA, aquesta propietat permet que només amb senyals molt petites de tensió s'obtingui una «gran» deformació.

Per treballar en entorns flexibles, com pot ser el cas de l'electrònica impresa, també interessa el paràmetre *mòdul de Young*. Aquest, és un paràmetre que caracteritza el comportament d'un material elàstic segons la direcció en què s'aplica una força.

Així doncs, a la taula 3.1 es posa de relleu alguns materials conjuntament amb les seves propietats.

Primerament es pot comprovar que materials com el Titanat de bari ( $\text{BaTiO}_3$ ), el zirconat de plom titanat (PZT) i monocristal PMN-PT (amb estructura  $(1-x)\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_{3-x}\text{PbTiO}_3$ ) són materials amb un alt coeficient  $d_{33}$  [32]. Per tant, aquests materials tenen un alt valor en aplicacions sensòriques i presenten una alta capacitat de detectar valors de pressió de baixa amplitud. Aquests són els adients per treballar, pe-r exemple, en aplicacions a temps real gràcies a aquesta mateixa sensibilitat.

No obstant això, també s'observa que aquests components tenen un alt *mòdul de Young*. Això es tradueix en que l'aplicació de capes individuals dels mateixos a teixits o capes de substrat flexible i/o tou actualment, encara sent investigada, no és fàcil. Aquests materials, a més, tampoc són fàcilment solubles el qual dificulta la integració del material també al substrat [32].

També s'ha detallat en el present document la possibilitat de crear estructures piezoelèctriques a partir de compostos polimèrics. Enfront de la seva gran desavantatge, un baix coeficient piezoelèctric, presenten un molt baix *mòdul de Young* i una bona solubilitat. Així doncs, en l'electrònica flexible s'han desenvolupat ràpidament.

## **3.4. Emmagatzemament de l'energia**

### **3.4.1 Introducció a l'emmagatzemament de l'energia**

El significatiu creixement de demanda elèctrica experimentat en les últimes dècades, afegit a la problemàtica de les energies renovables en quant els daltabaixos de producció (per exemple, l'energia solar només produeix energia durant el dia, i no sempre amb la mateixa intensitat), cada cop més hi ha diferències entre el consum i la capacitat de producció d'aquesta.

És necessari doncs, trobar una forma d'emmagatzemament d'energia suficientment econòmica, sostenible i amb una gran densitat energètica que pugui fer front a aquest repte. El professor del MIT (EUA), cofundador i principal científic de Form, Yet-Ming Chiang, ho té clar: "Creiem que podem aconseguir-ho, podem adaptar la tecnologia a aquests requisits" [43].

Avui en dia, les subestacions d'emmagatzemament d'energia usen bateries de tipus electrolític o d'ions per poder capturar energia elèctrica. Les propietats d'aquestes bateries ofereixen una densitat d'energia relativament bona enfront a altres tecnologies històriques com per exemple els condensadors.

No obstant això, avanços en la tecnologia dels capacitadors proporcionen una nova via de conservació d'energia amb unes característiques més semblants a les bateries convencionals en quant a capacitat d'emmagatzemament es refereix. Aquesta nova incorporació són els anomenats ultracondensadors o supercondensadors (la última forma serà la més utilitzada, i la que en aquest treball es referirà).

En aquest capítol es contemplarà l'evolució d'aquestes tecnologies al llarg del temps fins l'actualitat.

### 3.4.2. Història de les Bateries

Encara que la primera encunyació del terme «bateria» fou del cèlebre inventor i estadista Benjamin Franklin al 1748 [44], i posterior demostració de com la base elèctrica dels impulsos nerviosos per part de Luigi Galvani [45], les que va assentar les bases del primer acumulador elèctric.

Alessandro Volta, l'inventor, va construir-lo en 1800 a partir de dos discos de coure i zinc separats mitjançant una peça de cartró impregnada d'una solució salina [46].

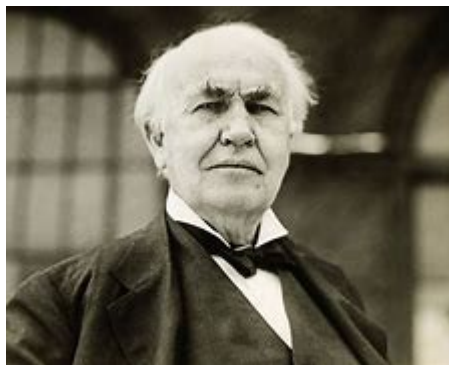
Durant els posteriors anys, inventors com William Robert Grove o Robert Wilhelm Bunsen van aconseguir cretes capacitats d'emmagatzemament creant les seves pròpies bateries.

Però la primera bateria recarregable, en aquest cas de plom-àcid, amb un fort impacte la va crear l'inventor francès Gaston Plante al 1859. Encara que va ser una invenció de gran importància (avui en dia encara s'utilitza) no va tenir èxit atès a que l'ús de la electricitat no estava del tot arrelat als costums quotidians. Al 1879 va tornar a presentar l'invent, amb una millor acollida per part del públic [47].

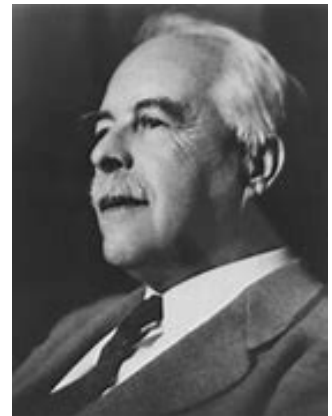
a)



b)



c)



*Figura 3.33. Fotografia dels científics A. Volta (a) [48], Thomas Edison (b) [49] i G.N. Lewis (c) [50].*

Thomas Alva Edison, inventor àmpliament reconegut, va tornar a fer un salt quantitatiu en 1906 en quant a bateries es refereix creant la pila alcalina. La patent consistia en una cèl·lula de ferro com a material d'ànode i òxid níquel com a material càtode [51]. G.N. Lewis va començar la experimentació amb bateries de liti l'any 1912, comercialitzant-se finalment a 1970. Gràcies a la carrera espacial, el desenvolupament de bateries per a satèl·lits i les diferents aplicacions espacials, ajudar al desenvolupament de les bateries, així com a les bateries NiMH i níquel-hidrogen. Aquesta investigació va acabar l'any 1980 amb el químic nord-americà John B. Goodenough que desenvoluparà la primera bateria d'ions de liti [47].

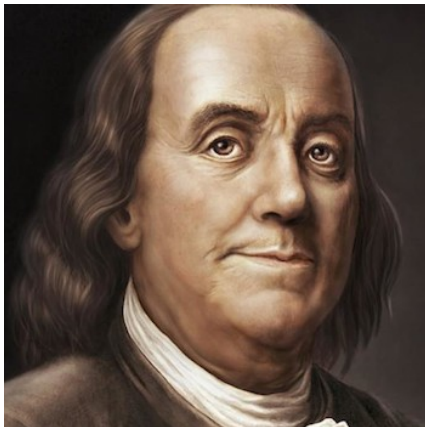
### 3.4.3. Història dels Condensadors

El primer condensador conegut el va crear el científic Pieter van Musschenbroek a l'any 1746. L'experiment va consistir en una ampolla de vidre mig plena d'aigua amb un tap travessat per una vareta metàl·lica. Aquesta, se submergia parcialment a l'aigua. Aquesta vareta tenia forma de ganxo a la part superior, al qual se li acostava un conductor elèctricament carregat. Durant l'experiment, el conductor de la vareta es va separar i Pieter va rebre una forta descàrrega en acostar la mà a la vareta, adonant-se així del seu efecte capturator d'energia [47].

Posteriorment (1752), William Watson i Benjamin Franklin descobriren de forma independent i, curiosament, paral·lela que s'augmentava aquest efecte si s'envoltava l'ampolla amb una làmina de plom [52].

Més tard, Jean Antonie Nollet reemplaçà l'aigua per fulles d'estany, donant forma de configuració d'ampolla àmpliament utilitzada en l'actualitat [53].

a)



b)



*Figura 3.34. Fotografia dels científics a) Benjamin Franklin [54] i b) William Watson [55].*

Durant els subsegüents anys fins a l'actualitat la investigació dels condensadors ha consistit en millorar el seu rendiment i característiques, així com la mida i els costos de fabricació.

El supercondensador basat en el concepte de la doble capa, apareix per primera vegada el 1853 pel físic Herman von Helmholtz, però, fins l'any 1957 no va aparèixer la primera patent a mans de l'enginyer H. E. Becker treballant per General Electric [47].

El 1966, la companyia Standard Oil va patentar l'ús pràctic dels supercondensadors com un sistema d'emmagatzematge d'energia usat per al back-up de memòria per a ordinadors [47].

## 4. Estat de l'art

### 4.1. Piezoelectricitat (EoA)

#### 4.1.1. Usos i aplicacions com a Sensors i Actuadors

##### Altaveus i micròfons, hidròfons i sonar

Com a dispositius piezoelèctrics el fonament, àmpliament estudiat en els apartats anteriors, en qualsevol dels casos és el mateix. Generar un moviment a partir d'impulsos elèctrics o viceversa.

En el cas dels micròfons les ones sonores transmeses per l'aire fan vibrar el diafragma i, el moviment d'aquest, mou el material piezoelèctric que conté. Aquesta fa fricció entre les partícules del material generen sobre la superfície del mateix potencial elèctric.

Aquest potencial és anàleg en quant a freqüència i amplitud a l'ona sonora que la va generar.

L'altaveu en canvi utilitza la funció Inversa. Per tant aprofita la forma de la ona elèctrica (freqüència i amplitud) per generar impulsos mecànics a través d'aquests materials piezoelèctrics. Aquests impulsos es traslladen al fluid (aire) i generen les ones sonores.

Per altra banda existixen els seus homòlegs marins. El sonar i l'hidròfon han sigut dissenyats exclusivament per al medi marí. A l'aigua, el so es transmet aproximadament 4 vegades més ràpid que a l'aire.

Així doncs, la majoria dels hidròfons es basen en un transductor piezoelèctric, de comportament idèntic als micròfons. L'hidròfon genera un potencial elèctric quan és sotmès a un canvi de pressió, com una ona de so.

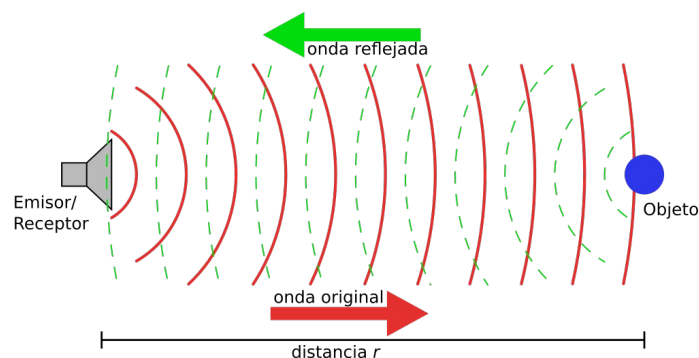


Figura 4.1. Esquema de l'ús del sonar [56].

Per la seva banda, el sonar (acrònim de *Sound Navigation and Ranging*) emet ones de pressió que són transmises per l'aigua. Quan aquestes impacten contra un objecte, les reflecta.



Aquestes ones de pressió són capturades llavors per l'hidròfon i es processen per localitzar l'objecte.

### Toca-disc Piezoelèctric

El toca-disc és un invent àmpliament utilitzat i conegut arreu del món.

El seu funcionament té un fonament relativament simple. Utilitzant les «ranures» del disc com a guia, quan el disc gira l'agulla el recorre formant una espiral amb diferents alçades per a que quan passi aquesta, oscil·li (Figura 3.35). Aquesta agulla és formada per una càpsula de cristall, piezoelèctric o ceràmic, basada en les propietats de certs materials, com ara les sals de Rochelle o el Titanat de bari.

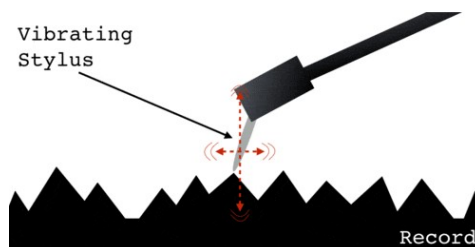


Figura 4.2. Esquematització de la guia del disc [57].

D'aquesta manera es transmet una vibració al cristall piezoelèctric de l'agulla, creant així un seguit de tensions de la mateixa freqüència i amplitud que els solcs de la guia.

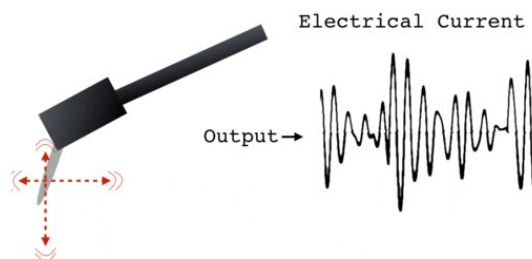


Figura 4.3. Esquematització del moviment de l'agulla [57].

Aquestes ones elèctriques es transmeten i es tracten per arribar als altaveus.

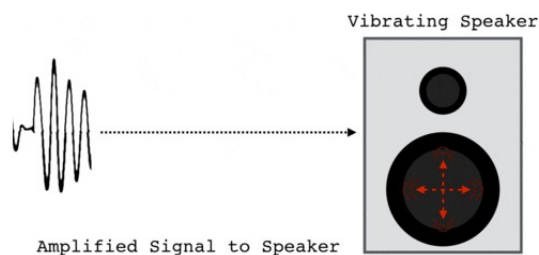


Figura 4.4. Esquematzació del moviment de l'agulla [57].

### Relotge de quars

El rellotge de quars, com el seu propi nom indica, porta al seu interior una petita peça de quars. Aquesta peça s'encarrega de generar impulsos de freqüència constant els quals fan possible mesurar el temps de forma molt precisa. Aquest material (quars) és conegut per les seves propietats piezoelèctriques. Així doncs, utilitza l'efecte invers per generar els impulsos a través d'alguns tipus de font d'energia. En aquest cas en concret parlem d'una pila de mida de botó.

La potència energètica de la pila combinat amb el quars fa que aquest estabilitzi la freqüència dels impulsos generats permetent mesurar-los de manera que obtenim les hores, minuts i segons [58].

La utilització d'aquest tipus de font d'energia és el que fa que el funcionament d'aquest tipus de rellotges es diferenciï de rellotges com els automàtics i els mecànics, la maquinària i funcionament dels quals resulta força més complex, i en moltes ocasions, més costós [58].

### Encenedor

Un ignitor piezoelèctric consta d'un petit martell amb un ressort que, en polsar un botó, colpeja amb força un cristall de PZT o de quars (ambdós casos, materials piezoelèctrics) [59].

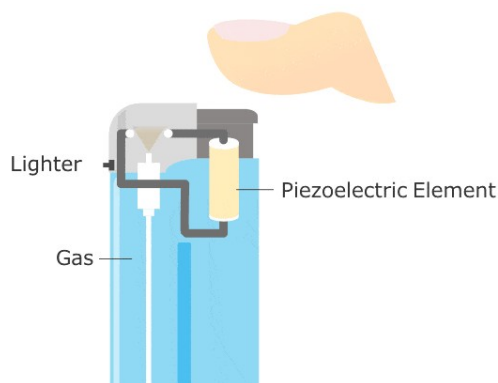


Figura 4.5. Dibuix en representació d'un encenedor piezoelèctric [59].

La deformació enèrgica i sobtada produeix un voltatge elevat amb la descàrrega elèctrica consegüent entre els elèctrodes connectats als extrems del material piezoelèctric.

Aquesta alta tensió aplicada generen espurnes, que conjuntament amb l'expulsió de gas emmagatzemat en el dipòsit de l'encenedor, generen la flama característica d'aquests dispositius.

### Motor Piezoelèctric

Els motors piezoelèctrics utilitzen actuadors que aprofiten l'efecte piezoelèctric invers, ja esmentat extensament amb anterioritat.

Aquests actuadors s'utilitzen cada vegada més en diverses aplicacions de nano-posicionament i aplicacions on la miniaturització és important. Això és possible a les seves característiques úniques, que inclouen la seva molt alta precisió i una mida extremadament compacte [60].

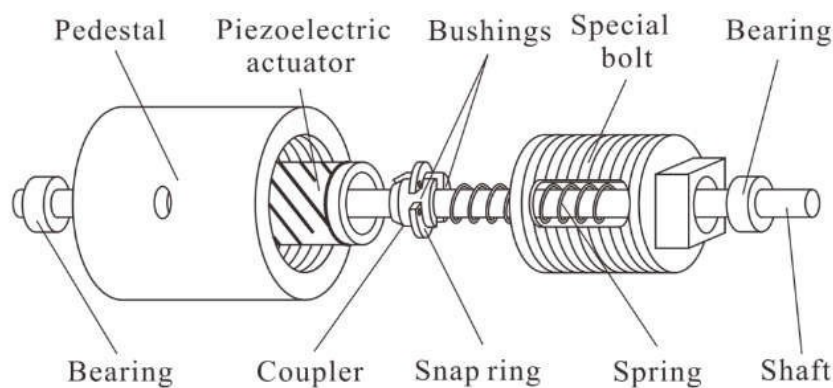


Figura 4.6. Esquema d'un motor piezoelèctric de rotació [61].

A més d'una relació mida/potència molt positiva, els motors piezoelèctrics tenen un parell de retenció alt que es manté amb una potència d'entrada nul·la. A més, ofereixen una molt baixa inèrcia dels seus rotors, cosa que proporciona un cicle de treball elevat (característiques d'arrencada i parada ràpids) [62].

A més, no es veuen afectats pels camps electromagnètics, que poden obstaculitzar a altres tipus de motors. Els motors piezoelèctrics no solen produir camps magnètics i tampoc no es veuen afectats per camps magnètics externs. Com que operen a freqüències ultrasòniques, aquests motors no produeixen so durant l'operació [62].

## 4.1.2. Usos i Aplicacions de la piezoelectricitat en l'EH

Com s'acaba de veure en el capítol anterior («2.2.4. Usos i aplicacions com a Sensors i Actuadors») existeixen solucions mitjançant materials piezoelèctrics. Però aquestes no es troben dins de l'àmbit que ocupa aquest treball. L'*energy harvesting* a partir de materials piezoelèctrics.

Així doncs i seguint aquesta línia, en aquest apartat s'exposaran diferents solucions actuals que utilitzen la tecnologia usant la piezoelectricitat per generar, d'una manera o una altra, energia elèctrica.

### Pista de Ball

Fonamentat en l'efecte directe, aquest terra (o pista de ball) es nodreix de l'energia potencial i cinètica de la gent ballant per generar energia elèctrica.



*Figura 4.7. Pista de ball de Sustainable Dance Club Company [63].*

El dispositiu consta d'una rajola la qual absorbeix l'energia que generen les persones al ballar mitjançant un material ceràmic piezoelèctric. Aquest genera una tensió la qual és regulada i convertida en energia elèctrica usable pel club.

Amb aquest dispositiu (entre altres), el club nocturn de Rotterdam aconsegueix estalviar un 30 per cent en l'energia necessària per fer-lo funcionar. Això ha sigut possible gràcies a l'equip «Döll – Atelier voor Bouwkunst» conjuntament amb el grup de recerca ambiental Enviu. Junts han creat la Sustainable Dance Club Company, una firma amb una vocació molt inusual de promoure nous estils de vida més respectuosos amb el medi ambient [63].

## Rajoles en Westfield Stratforf City

Igual que el punt anterior, aquesta tecnologia es basa en capturar l'energia cinètica de les persones. En aquest cas, la petjada al caminar.

Aquesta tecnologia està protegida per la marca de patent, però sí es pot entreveure un component piezoelèctric en el seu funcionament. Així i tot els seus creadors, l'empresa Pavegen, no revelen res llevat que és una tecnologia híbrida i única [64].



*Figura 4.8. Imatge real de la rajola EH creada per Pavegen [65].*

De mitjana, s'estima que cada petjada (dependrà del pes de la persona) genera 7W de potència elèctrica. Per poder veure aquest efecte *harvester*, durant els Jocs Olímpics de Londres van generar aproximadament 20kW/h. Això va fer possible mantenir la il·luminació exterior del centre comercial, amb un sobrant extraordinari [65].

Aquest èxit ha fet que l'empresa tingui varis projectes en marxa arreu del món, associant-se fins i tot amb la multinacional alemanya SIEMENS, per a la instal·lació d'aquestes rajoles a Federation Square en Melbourne [64].

## Japan railway

D'una forma similar a l'anterior East Japan Railway Company (JR East) ha instal·lat elements piezoelèctrics als pisos de les portes d'entrada i altres àrees de l'estació de Tòquio per provar un sistema que genera energia utilitzant l'energia creada pels passatgers que passen per les portes [66].

El sòl generador d'energia està format d'elements piezoelèctrics, de 35 mil·límetres de diàmetre. Utilitza 600 d'aquests elements per metre quadrat [67].



Figura 4.9. Imatge del segment EH al metro de Tòquio [66].

JR East espera una capacitat per generar energia de 1.400kW per segment i per dia. La perspectiva és utilitzar aquesta energia per fer funcionar les portes automàtiques de butlletes i els sistemes de visualització electrònica, segons l'empresa [66].

### Highways of Power

També hi ha diverses investigacions en curs en el camp de l'EH amb piezoelèctrics aplicats a les carreteres.

Segons Prasad Gurunath *et al.* [68] carreteres com Rajiv Gandhi Sea Link, Western Express Highway, Eastern Express Highway, Mumbai-Pune Express Way són el bon exemple d'aquesta generació d'electricitat. Un cotxe normal d'una tona de pes que recorre 1 km per aquestes carreteres, podria generar 100 Kw d'electricitat en el seu recorregut.

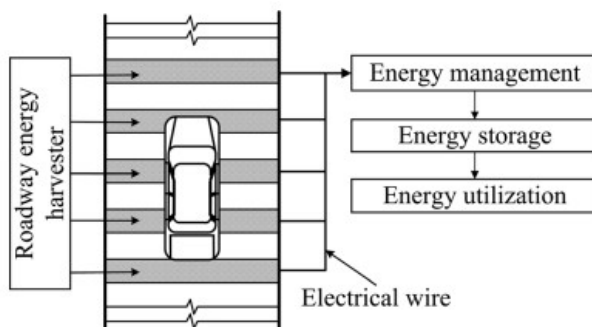


Figura 4.10. Esquema del sistema EH en carreteres [69].

El mecanisme és molt similar als esmentats anteriorment, una bateria de cristalls piezoelèctrics es posen en contacte amb el sòl de la carretera. El cotxe, al passar per sobre genera una tensió mecànica sobre aquests els quals generen una tensió elèctrica. Ja hi ha publicacions on es prova el funcionament teòric d'aquest tipus de sistema, el qual promet una quantitat de recollida d'energia important [69].

## 4.2. Electrònica digital flexible (EoA)

### 4.2.1. Dispositius piezoelèctrics totalment impresos

En aquesta secció es detallarà, encara que molt breument els diferents materials i dispositius piezoelèctrics en l'àmbit de la impressió electrònica.

#### *Printed Electrodes*

La estructura multicapa del dispositiu piezoelèctric en l'electrònica impresa sol ser inferior als 200µm. Així, aquest dispositiu se li atorga una gran flexibilitat. Inclús també, depèn de les aplicacions, ofereix un gran estirament (fins a cert punt, clar) [32].

Les diferents tintes usades depenen de les aplicacions o rendibilitat econòmica. Per exemple les tintes amb nanopartícules metàl·liques responen a aquesta última característica. Un altre tipus són les tintes organogenètiques, que eviten el problema que tenen les primeres ja que no incorporen aquestes nanopartícules metàl·liques, però clarament són més costoses [32].

Per últim, la forma del propi elèctrode dependrà de la seva aplicació futura. És a dir, si es vol utilitzar com a sensor és més adient fer aquest més petit. Això reportarà en una major precisió en l'àrea de detecció. La pròpia forma dependrà del seu ús, encara que és més habitual trobar *energy harvesters* amb forma quadrada [32].

#### *Full Inkjet-Printed Piezoelectric Devices (Dispositius piezoelèctrics impresos per injecció)*

Encara que aquest mètode ofereixi la possibilitat de poder imprimir el dispositiu en una àmplia gamma de substrats, la principal dificultat en aquests tipus de dispositius segueix sent el compliment dels paràmetres de viscositat, tensió superficial i mida de partícula.

S'ha de tenir en compte que, els components principals són el material funcional, el solvent i altres additius [32] i que aquests dos últims s'han d'eliminar després de la impressió del dispositiu.

Encara així, hi ha diversos estudis els quals demostren que és una tecnologia viable, i que promet bons resultats si es troba un bon mètode i disseny.

### ***Full Screen-Printed Piezoelectric Devices (Dispositius piezoelèctrics impresos per serigrafia)***

També s'ha comentat que aquest mètode és un dels més escalables per a la producció en massa de dispositius electrònics impresos. La seva senzillesa en les operacions, encara que depèn del mètode sigui car, en grans operacions pot ser molt rendible.

S'han fet esforços per avançar en el camp de la serigrafia en l'electrònica impresa, com poden ser Zirkl, que va crear una matriu sensora amb un molt baix cost per serigrafia. O també Chlahawi, qui va informar d'un dispositiu EH serigrafiat capaç d'arribar als  $639,6 \mu\text{W cm}^{-3}$  [32].

### ***Hybrid Devices (Dispositius híbrids)***

Com és habitual, l'aplicació de la electrònica impresa (enfocada als dispositius-plataforma piezoelèctrics) només usant un tipus de tècnica és complicada. Per tant, combinant diferents tècniques es pot aconseguir dispositius multicapa molt més eficients [32].

Però, si alguna tècnica i material és considerada per les seves apropiades característiques aplicades en l'àmbit de l'electrònica flexible, i en particularment relacionada amb l'*energy harvesting* usant piezoelèctrics, sens dubte són els dispositius basats en PVDF.



## 4.2.2. Dispositius piezoelèctrics totalment impresos en PVDF

### Material PVDF

El fluorur de polivinilidè (PVDF), també conegut com a difluorur de polivinilidè ó PVF<sub>2</sub>, forma part de la família de fluoropolímers; un grup de materials polimèrics especialitzats i versàtils amb propietats diferents que resulten del fort enllaç entre els seus àtoms de carboni i els àtoms de fluor i el blindatge de fluor de la columna vertebral de carboni [70].

El PVDF és un polímer propietats piroelèctriques i piezoelèctriques especials, i s'utilitza en la fabricació de diversos productes d'alta puresa i alta resistència mecànica i química per a aplicacions en àmbits tant diversos com l'electricitat, electrònica, biomèdica, construcció, sistemes de fluids, petroli. i la indústria del gas i l'alimentació [70].

### PVDF en l'EH mitjançant piezoelectricitat

Com ja s'ha esmentat anteriorment, aquests tipus de materials són els més adients per ser impresos deguts a la seva gran flexibilitat i solubilitat per formar les tintes.

Els *Printing PVDF-Based Polymers* o els polímers impresos basats en PVDF són polímers molt usats gràcies al seu coeficient piezoelèctric de caire elevat (en comparació amb altres polímers). A més, la seva solubilitat permet també crear tintes de diferents viscositats pel que és adient per imprimir sobre substrats tous com ara el polietilè (PET) o el paper [32].

També són aptes per l'*energy harvesting* formant capes d'entre 3 i 10µm obtenint així bons resultats [32].

### PVDF en la sensòrica

L'aplicació del fluorur de polivinilidè aplicada a la sensòrica pot ser molt diversa gràcies a aquestes propietats de solubilitat i flexibilitat esmentades anteriorment. Actualment hi ha molts estudis que investiguen aplicacions en diversos àmbits tant diferents, des de la robòtica fins a la biotecnologia.

En els primer dels casos, d'uns anys a aquesta part, en l'àmbit general de la robòtica s'han fet enormes avanços tècnics de en quant a robòtica col·laborativa es refereix.

Un exemple clar de l'ús d'aquesta tecnologia es troba en les pells sensibles que incorporen els robots col·laboratius per a poder desenvolupar tasques conjuntament amb les persones.

La capacitat de detectar el contacte a tot el cos d'un robot és un pas important per permetre interaccions humà-robot segures, més avançades i intuïtives. Així doncs. Cobrint cada braç robòtic amb una pell sensible al tacte, els robots podrien augmentar la consciència de les seves

interaccions físiques amb entorns impredecibles o amb l'activitat humana. Això permetria als humans i als robots col·laborar de manera més segura en una gran varietat de situacions [71].

Però no només el camp de la robòtica col·laborativa ha experimentat avenços mitjançant aquest tipus de material. Negin Nikafrooz *et al.* presenten un avenç significatiu al crear una tela flexible basada en PVDF que prevé el lliscament d'objectes quan són agafats per una mà robòtica. En la següent figura (Figura 4.11) es pot veure l'esquema de control usat en l'experiment així com la implementació del sensor PVDF.

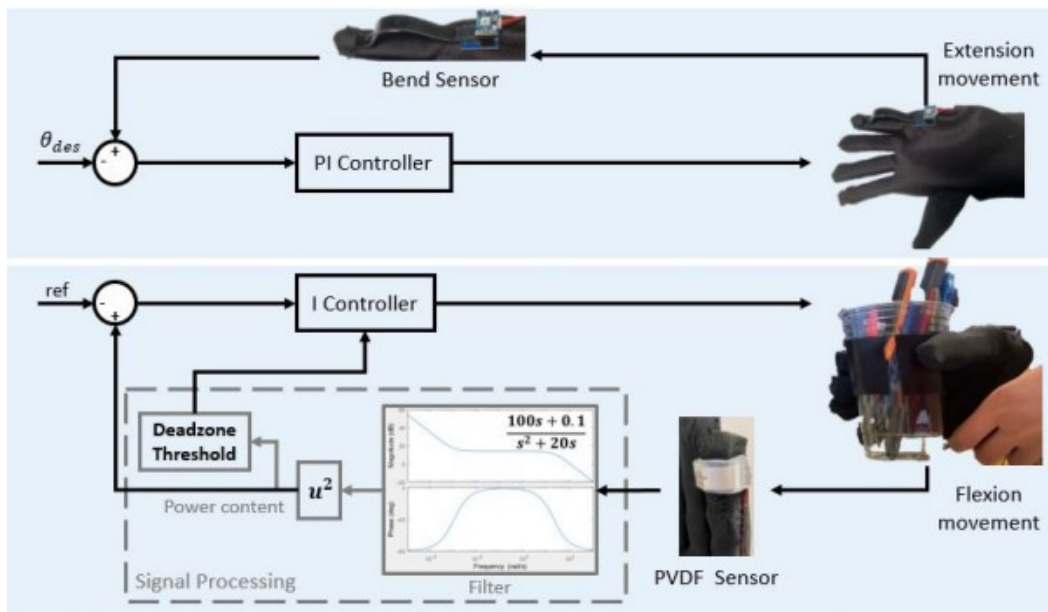


Figura 4.11. Esquema del sistema de control de la mà sensoritzada [72]

Segons els autors, la detecció i la prevenció del lliscament és un repte important en l'operació manual robòtica, que sustenta la capacitat del robot per realitzar *pick ups* segures i fiables. El focus a la detecció del lliscament utilitza un sensor de vibració piezoelèctric fet de fluorur de polivinilidè, el qual és un material flexible, prim, econòmic i altament sensible [72]. Després d'una retroalimentació i un control, es troba una solució tècnica al problema plantejat mitjançant sensòtica piezoelèctrica flexible.

Però com s'ha plantejat abans, inclús en el camp de la medicina s'han trobat aplicacions on la sensòrica és important. Un d'aquests *papers* es detalla la monotonització de la respiració, el sismocardiograma i els sons del cor mitjançant una fina pel·lícula d'aquest material [73].

Així doncs es demostra com l'aplicació d'aquest material utilitzat per sensoritzar no és sinó en vies de clares de desenvolupament.

Així i tot, no només hi ha sensors que utilitzen PVDF, també s'estan investigant actuadors per petites aplicacions com es veurà en el pròxim punt.

## PVDF en actuadors

Al igual que en el camp dels sensors flexibles, els actuadors és un altre dels camps més estudiats per aquest tipus de material.

Les seves característiques el fan extremadament apropiats p.e. per a vibracions a microescala utilitzant una membrana de PVDF.

En aquest sentit hi ha diversos articles que recullen una sèrie d'investigacions que usen el fluorur de polivinilidè per a crear actuadors per aplicacions molt diverses.

Un d'aquests *papers* descriu una membrana per a petites aplicacions de bombeig.

En aquest article, Yagmur Akin Yildirim *et al.* descriu com les investigacions en micro-fluídica han impulsat el desenvolupament sobre aplicacions biomèdiques de la tecnologia. Com a resultat, molts sensors biomèdics, sistemes de lliurament de fàrmacs o dispositius de síntesi cel·lular i de proteïnes entre altres han sigut estudiats [74].

En la majoria d'aquestes aplicacions, hi ha una necessitat de transportar els fluids de forma controlada. Per atendre aquesta necessitat, hi ha un esforç de recerca important per desenvolupar dissenys eficients de micro-bombes. Tanmateix, d'aquestes investigacions no compleixen totes les necessitats d'aplicacions biomèdiques. Això és degut a que la normativa és estricta en quant a tensions de treball, mida dels dispositius i biocompatibilitat d'aquests es refereix [74].

En el paper mencionat, es crea una micro-bomba a partir d'una membrana fina de PVDF-TrFE la qual mitjançant petits polsos elèctrics s'obté un desplaçament elevat, i per tant, «grans» oscil·lacions i els conseqüents moviments en el fluid gràcies al component piezoelèctric del propi material.

Però, l'aplicació d'actuadors piezoelèctrics també ha estat un tema d'interès recent en els camps de l'estructura intel·ligent i el control de vibracions estructurals [75].

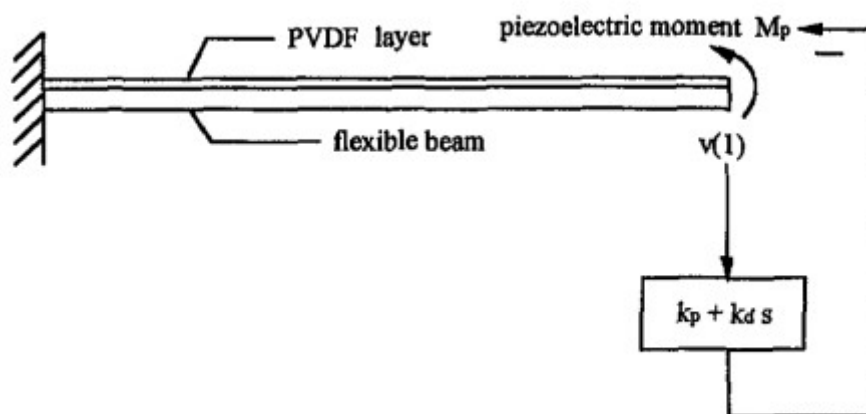


Figura 4.12. Diagrama esquemàtic del voladís amb l'actuator PVDF distribuït [75]

Amb una tensió aplicada, l'actuador piezoelèctric produeix una deformació que de manera equivalent resulta en un moment de flexió. Així doncs es pot suprimir la vibració d'una biga en voladís amb actuador piezoelèctric distribuït. També s'observa que es pot fer un control PD fent estable el sistema, i per tant, es demostra que és possible aplicar aquest tipus de solucions piezoelèctriques a certs problemes estructurals [75].

## **PVDF en l'EH**

Però també hi ha hagut recerca en l'àmbit de l'*energy harvesting* usant aquest material.

Una d'aquestes investigacions, molt prometedora és la de recol·lecció d'energia a través de la corrent dinàmica d'un fluid. En aquest cas en concret, aigua.

En el *paper*, Pooja Rani<sup>1</sup> i Deepak Chhabra expliquen com a través de l'aigua colpejant a través d'una tovera, el material piezoelèctric fabricat en PVDF. Així es genera un potencial elèctric que pot ésser utilitzat.

Durant l'experiment es calcula l'energia capturada variant els paràmetres com ara les distàncies del piezo a la tovera, el nombre i l'angle d'aquesta, i dos circuits rectificadors diferents [76].

Així doncs, feta una comparació entre l'energia extreta mitjançant l'ús de diferents paràmetres, s'observa que el circuit doblador de tensió proporciona més energia que el circuit rectificador de pont complet en les mateixes condicions [76].

Un altre *paper* relacionat amb l'EH i el material PVDF el presenta Anja Lund *et al.* [77]. Aquesta és una investigació basada en la recol·lecció d'energia a partir de la pluja usant un teixit fabricat conjuntament amb aquest material, el qual presenta propietats piezoelèctriques.

Clarament, un teixit amb aquestes característiques té una alta funcionalitat en tot tipus d'aplicacions, no solament la descrita en el document.

Aquest teixit és possible gràcies a la fusió del material polimèric  $\alpha$ -PVDF amb polietilè o components similars textils, creant un teixit elàstic amb propietats piezoelèctriques [77].

Així doncs, es demostra la importància del PVDF en l'àmbit de l'*energy harvesting* en l'actualitat.

## **4.3. Emmagatzemament de l'energia (EoA)**

En aquest capítol es veuran alguns exemples d'aquestes tecnologies, amb les seves característiques i diferències per a poder concretar quina serà la forma d'aplicació adient pel present projecte.

### **4.3.1. Bateries**

#### **4.3.1.1. Actuals tecnologies aplicades a les bateries**

Una bateria està formada per dos elèctrodes, un càtode positiu i un ànode negatiu, amb un altre tipus de material intercalat entre els dos. Pel que fa a la càrrega i descàrrega de la bateria, la velocitat està determinada per la capacitat mil·liamperes hora (mAh).

Aquesta tecnologia és investigada constantment per les ja molt esmentades necessitats d'emmagatzemament d'energia elèctrica. Aquesta constant investigació ha donat lloc a bateries més petites, confiablès i potents per a l'ús quotidià, industrial o militar (entre altres).

A data del present treball, gairebé tots els petits dispositius electrònics portàtils s'alimenten amb algun tipus de bateria recarregable. Així doncs, segueix sent una tecnologia indispensable pel nostre dia a dia.

Actualment trobem molts tipus de tècniques d'implementació per formar les bateries. Es farà un repàs de les més importants aplicades als dispositius electrònics, donant les característiques bàsiques i una fonamentació bàsica del seu funcionament.

#### **Bateria de Níquel-metalhidrur**

Les bateries d'hidrur metàl·lic de níquel (NiMH) utilitzen hidrogen, absorbit en un aliatge metàl·lic com a material negatiu actiu.

S'observa un parell d'avantatges predominants en l'ús d'aquesta tecnologia:

Primerament pel seu cost mediambiental de fabricació. Bàsicament en aquestes bateries s'elimina el cadmi, material altament contaminant a més de ser un material costós.

La segona és que no presenta signes de l'anomenat "efecte memòria". Aquest és conegut per minimitzar la capacitat de càrrega al carregar la bateria quan no s'ha descarregat al 100% [78].

El mètode de càrrega més comú per a bateries NiMH és una càrrega de corrent constant, però amb el corrent limitat per evitar un augment massa gran de la temperatura de la bateria o per evitar superar la velocitat de la reacció de recombinació d'oxigen [79].

Tot i que les bateries d'hidrur metàl·lic de níquel estan disponibles, el seu ús per emmagatzemar quantitats relativament petites d'energia és qüestionable, ja que són conegudes per la seva taxa de descàrrega extremadament alta [79].

### **Bateria de ió de Liti**

Aquest tipus de bateries tenen un funcionament químic diferent dels anteriors, per això, es parla d'una tipologia diferent de bateria.

Així com les bateries electrolítiques es basen en una reacció química d'oxidació-reducció a l'ànode i el càtode, les bateries iòniques basen el seu funcionament en un procés d'inserció-desinserció d'ions. Per tant, són els ions dissolts en l'electròlit els que es van movent i acoblant-se als elèctrodes [47].

Les pèrdues de capacitat d'aquest tipus de bateria augmenten amb la quantitat de descàrrega per cicle. Algunes arriben a molts cicles, però només en condicions de descàrrega molt superficial. Per tant, mentre que la majoria de les bateries basades en liti oscil·len entre els 500 i 1000 cicles de càrrega de vida teòrica, la vida útil real de la bateria sol ser molt inferior a aquest límit superior [79].

Una qüestió fonamental sobre la tecnologia del liti és el fet que el punt de fusió del metall de liti és de 180 °C.

El metall líquid és altament reactiu, contràriament al que passa en el seu estat sòlid. Així doncs, al arribar a aquest punt de fusió, el liti tendeix a reaccionar amb el material del càtode i els components de l'electròlit, proporcionant una gran quantitat d'energia tèrmica. Per a aplicacions comercials, aeroespacials i/o militars, aquest esdeveniment podria significar un desastre podent inclús arribar a la destrucció [79].

Per això, en comparació amb les bateries de Níquel-metalhidrur, la càrrega d'ions de liti requereix circuits addicionals per garantir que la cèl·lula no estigui sobrecarregada ni sobredescarregada. La sobrecàrrega pot ser perillosa com s'ha descrit anteriorment, i ambdues condicions poden reduir la vida útil de la bateria. Malgrat els perills, aquestes segueixen sent la bateria recarregable portàtil preferida a causa de la seva energia específica i densitat energètica relativament alta [79].

## 4.3.2. Capacitors

### 4.3.2.1. Actual technologies applied to capacitors

A capacitor, whatever its type, is formed by two metal (or material) conductive plates separated by an insulating material. This construction is so simple that it gives it a great robustness, versatility, a great advantage in terms of size, a priori, and a certain ease in its construction.

Unlike batteries, the operating voltages of which depend on the materials of the electrodes. What defines the capacitance in a capacitor is the dielectric (the insulating material between the two plates), the distance between the plates, the number of plates and the operating temperature.

Capacitors can be classified into three «categories», being these electrostatic capacitors, electrolytic, and finally, supercapacitors.

As in the case of batteries, we will do a review of the most important technologies applied to capacitors, giving the basic characteristics and a basic foundation of their operation.

#### Electrostatic capacitors

Capacitors are defined, in terms of their operating voltage, by their capacitance.

This is determined by the area of the facing electrodes ( $A$ ) and the distance that separates them ( $d$ ), as well as by the permeability of free space ( $\epsilon_0$ ) and that of the dielectric ( $\epsilon_r$ ):

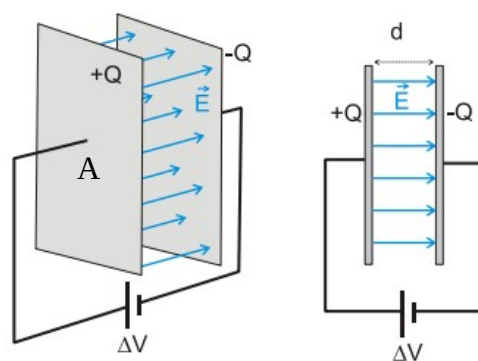


Figura 4.13. Imatge esquemàtica d'un condensador electroestàtic de plaques planes [80].

The capacitance of a capacitor is formulated, therefore, as follows:

$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (4.1)$$

On l'energia del camp elèctric emmagatzemada per unitat de volum (densitat d'energia,  $u$ ) serà:

$$u = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot E^2 \quad (4.2)$$

El seu funcionament és fonamentalment bàsic. Durant el període de càrrega, les càrregues es van acumulant a les plaques. Després, durant la descàrrega aquestes càrregues s'alliberen creant una corrent elèctrica.

Els condensadors electroestàtics són els que conserven una menor capacitat, però també són més senzills de fabricar. A més, permeten tensions de treball més elevades.

Com s'ha esmentat abans, els condensadors tenen una densitat de potència molt elevada, cosa que els permet descarregar-se en un lapse de temps relativament petit, alliberant una gran quantitat de corrent elèctrica.

### Condensadors electrolítics

El condensador electrolític difereix dels electroestàtics en que una de les plaques metàl·liques es substitueix per un compost químic o electrolít.

El dielèctric utilitzat en la seva fabricació és una pel·lícula molt fina d'òxid del metall que constitueix l'única placa metàl·lica utilitzada en l'estructura. Per a un condensador electrolític d'alumini, la formació de la pel·lícula d'òxid s'aconsegueix introduint el metall en un electrolít adequat i fent-hi passar un corrent elèctric, de manera que l'oxigen traspasa al pol positiu on oxida la superfície d'alumini [79].

Un condensador electrolític típic està en el rang de milers de mF (micro Farads). Per això, a la majoria de petites aplicacions electròniques aplicades a l'*energy harvesting*, aquesta capacitat és massa petita per emmagatzemar prou energia [79].

Teòricament, es podrien connectar diversos condensadors en paral·lel per augmentar la capacitat. Però la mida d'aquest dispositiu no seria pràctica. Encara així, depenent de l'aplicació i l'ús pot ser útil.

### Supercondensadors

Els supercondensadors, es diferencien dels condensadors electroestàtics i electrolítics convencionals al contenir un electrolít que permet que la càrrega electroestàtica també s'emmagatzemi en forma d'ions. Aquests dispositius es regeixen per les mateixes equacions fonamentals que els condensadors convencionals, però utilitzen elèctrodes de superfície més gran i dielèctrics més primers per aconseguir capacitats més elevades [79]. Tanmateix, malgrat les capacitats més grans que els condensadors convencionals, els supercondensadors encara no poden igualar les densitats d'energia de les bateries de gamma mitjana i alta [81].



### 4.3.3. Diferències clau i usos de l'emmagatzemament d'energia elèctrica

#### Densitat d'energia contra Densitat de potència

Per saber en quines aplicacions són més útils unes tecnologies o unes altres, dos dels factors clau a tenir en compte en l'emmagatzemament de l'energia elèctrica són; la densitat d'energia (*energy density*) i la densitat de potència (*power density*).

Aquestes definicions són un factor diferencial a l'hora d'escollir les especificacions tècniques d'un dispositiu.

Per una banda, la densitat d'energia és la quantitat d'energia emmagatzemada en un sistema per unitat de volum. Per altra banda, la densitat de potència serà la taxa de quantitat d'energia que un sistema pot lliurar en un espai de temps per unitat de volum.

En el cas que ens ocupa, la família dels condensadors tenen una excel·lent densitat de potència degut a les característiques físiques del dispositiu. En canvi, la seva densitat d'energia, és a dir, la quantitat d'energia que poden guardar són baixes.

Així es pot veure en la Figura 4.14, on els condensadors obtenen avantatge.

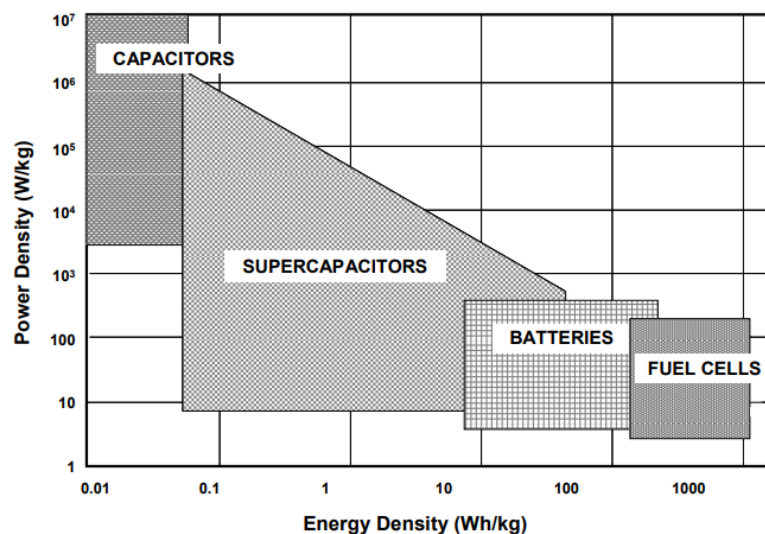


Figura 4.14. Gràfic comparatiu Power density vs Energy density [81]

En canvi, aquests dispositius es queden molt enrere en quan a densitat d'energia es refereix.

Les bateries en canvi, obtenen les característiques oposades amb un molt bona densitat d'energia, podent capturar gran quantitat d'ella. Però aquestes tenen una gran deficiència comparativa en quan a densitat de potència.

Com la majoria de tecnologies, aplicacions o tècniques, hi ha tota una escala de grisos que cobreixen les mancances de les dues anteriors.

Així doncs, i seguint amb la Figura 4.14, els supercondensadors ofereixen característiques intermèdies en quant a densitat d'energia i potència.

En el capítol «7. Plantejament del problema i metodologia per a la solució», es decideix quina aplicació serà la que finalment es posarà a prova i quin mètode d'emmagatzemament s'utilitzarà en el present projecte.

## 5. Plantejament del problema i solució

### 5.1 Plantejament del problema

Com ja s'ha definit en el capítol «1. Objectius», l'objectiu és poder captar l'energia elèctrica generada per un dispositiu-plataforma piezoelèctric i usar-a per transmetre una sèrie de dades mitjançant una comunicació *wireless*, de forma autosuficient. Aquest dispositiu-plataforma serà una conjunció de dispositius piezoelèctrics flexibles individuals, creant així una matriu amb la qual poder treballar.

Les principals característiques per poder emmagatzemar aquesta energia són que la matriu piezoelèctrica, encara que sigui la unió de varis dispositius, la seva potència serà limitada. Per tant s'hauran d'usar elements electrònics i dispositius de molt baixa potència per poder minimitzar les pèrdues en el control i la captura d'aquesta (provinent del dispositiu).

Un problema addicional, encara que agregat a l'anterior són les baixes tensions que generen aquests dispositius, així que s'haurà de tenir en compte aquesta característica addicional.

Com encara no es té constància de la potència, tensió i capacitat (capacitància) de la matriu a estudiar, aquest capítol serà a nivell qualitatiu i no pas quantificatiu. S'estudiaran les possibles etapes a seguir, així com algun dels components necessaris per al desenvolupament de la solució.

### 5.2. Primera aproximació a la solució

Com a primera aproximació a la solució, el circuit recollidor es basarà seguint l'esquema de la Figura 5.1:

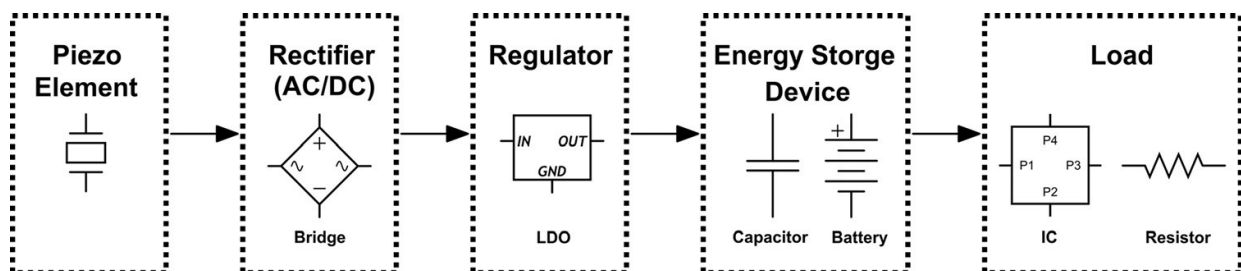


Figura 5.1. Diagrama de blocs general per a la resolució [82]

Com es pot observar, 3 etapes poden donar una solució a l'objecte proposat en aquest projecte. Aquestes etapes són la rectificació de la senyal, el regulador i la bateria (o emmagatzemament).

La càrrega a subministrar, depenent dels resultats podrà ser més o menys elevada, i no compta com etapa ja que no respon a la captura de l'energia. Si més no, els assajos en laboratori resoldran quina és la càrrega màxima que pot subministrar el disseny proposat.

### 5.2.1. Etapa Rectificadora

Els rectificadors més usats en EH són els rectificadors de mitja ona i ona completa (2 i 4 díodes respectivament). Per no perdre tensió (i al cap i a la fi, potència) a la sortida, sobretot farem *focus* sobre els rectificadors d'ona completa.

També són altament utilitzats per la millora d'eficiència els rectificadors síncrons, on en comptes de díodes els dispositius rectificadors són tipus MOSFET. Aquests al tenir una resistència en mode ON quasi nul·la comporta que la caiguda de tensió també ho sigui [82].

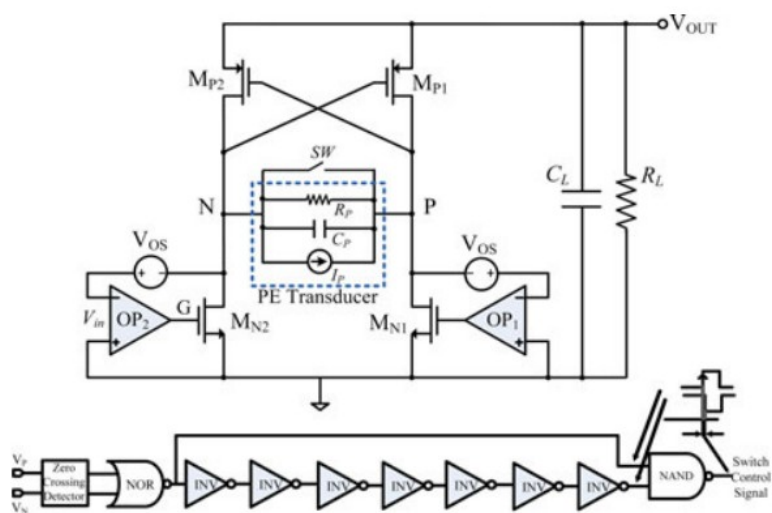


Figura 5.2. Dibuix simplificat del rectificador síncron [83]

Alguns estudis s'han realitzat sobre tècniques d'elevació de l'eficiència en la rectificació AC-DC de dispositius piezoelèctrics. Les conclusions són clares, l'ús de tecnologies síncrones, amb AO i MOSFETS pot arribar a augmentar l'eficiència del rectificador de forma substancial (entre 2 i 4 vegades més) [83].

## 5.2.2. Etapa del Regulador

Després de la rectificació, la tensió generada per l'element piezoelèctric encara s'ha de regular pel dispositiu d'emmagatzemament d'energia.

Comunament hi ha dos tipus de reguladors, els elevadors i els reductors. Per circuits piezoelèctrics, comunament s'utilitzen els segons ja que el pic de tensió de sortida dels dispositius piezoelèctrics acostuma a ser elevat. Així, es regulen aquestes ondulacions per generar una tensió de sortida estable per a la bateria.

Un dispositiu regulador molt interessant és l'anomenat LTC1474, el qual Tayahi *et al.* van fer un disseny amb un dispositiu piezoelèctric on va poder estabilitzar la tensió de sortida d'un material piezoelèctric [84].

A continuació es mostra un esquema d'aquest regulador (Figura 4.3), utilitzat en el *paper* anteriorment esmentat (Tayahi):

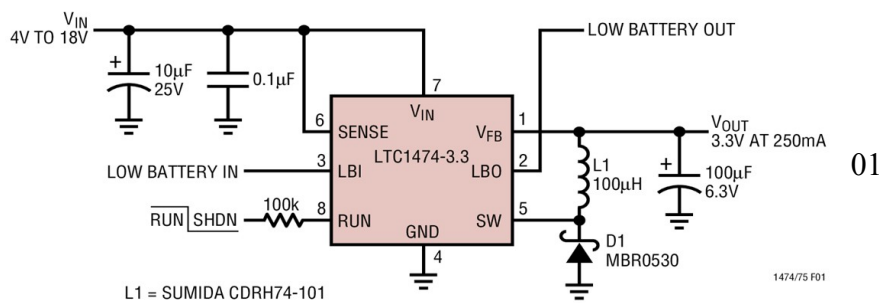


Figure 1. High Efficiency Step-Down Converter

Figura 5.3. Esquema del regulador reductor LTC1474 [85]

## 5.2.3. Etapa de Emmagatzematge

Per últim, l'última etapa es centra en dissenyar un sistema que pugui absorbir l'energia del dispositiu-plataforma piezoelèctric per poder alimentar qualsevol tipus de càrrega (els resultats finals del projecte determinaran quina càrrega suportarà).

Convencionalment existeixen dos tipus de mètodes d'emmagatzemament d'energia. Les bateries o els condensadors. Encara que ambdós són capaços de capturar aquesta, tenen diferències significatives segons el seu ús.

Una característica molt important respecte els condensadors és que no requereixen un voltatge mínim per començar a carregar-se. A més, es carreguen i descarreguen molt ràpidament, cosa

que els permet proporcionar energia acumulada gairebé instantàniament. No obstant això, els condensadors tenen densitats d'energia molt més baixes que les bateries i, per tant, els voltatges també disminueixen ràpidament a mesura que es descarreguen. Doncs, aquests són adequats per a aplicacions que només requereixen una transferència d'energia ràpida. Per a aplicacions on es requereix un voltatge de sortida estable o una sortida d'energia constant no ho són, llevat que estiguin disponibles vibracions (en el cas que es presenta en aquest projecte) contínues que puguin subministrar suficient energia per mantenir el funcionament constant de la càrrega [82].

D'altra banda, les bateries estan lliures d'aquesta deficiència. Poden emmagatzemar l'energia acumulada del material piezoelèctric per al seu ús posterior i, per tant, poden subministrar voltatge i potència constants amb vibracions intermitents. No obstant això, el principal desavantatge de les bateries recarregables per a aplicacions de captació d'energia piezoelèctrica és el nombre limitat de cicles de càrrega. Tant les bateries d'hidrur metàl·lic de níquel (NiMH) tradicionals com les bateries recarregables de liti relativament noves estan subjectes a uns 300-1000 cicles de càrrega, les quals les fa incompatibles amb la filosofia de l'EH de gran autonomia i sostenibilitat [82].

Per pal·liar aquestes desavantatges, s'han investigat supercondensadors com a mitjà d'emmagatzemament d'energia. Un estudi de Guan and Liao [86] compara l'ús de les bateries esmentades anteriorment amb els supercondensadors per l'EH amb piezoelèctrics. I la conclusió és que no només tenen una esperança de vida molt més elevada, si no que són més eficients en la càrrega i descàrrega de sí mateixos [82].

## **5.3. Segona aproximació a la solució**

### **5.3.1. Kits de desenvolupament**

#### **5.3.1.1. Definició dels *Kits* de desenvolupament**

##### **Què és un *kit* de desenvolupament**

Un *kit* de desenvolupament és una placa composta de certs components electrònics, ja siguin amplificadors operacionals, microxips, elements passius, antenes... que ajuden a desenvolupar una solució a un problema tècnic sense necessitat de conèixer en profunditat el seu funcionament a baix nivell.

A més, evita haver d'imprimir una PCB (Printed Circuit Board, o Placa de Circuits Impressos) personalitzada.

##### **Per què s'utilitza un kit de desenvolupament**

Aquests *kits* ofereixen la possibilitat d'avançar amb molta més rapidesa en les etapes inicials dels projectes.

Aquesta espècie de «caixa negra» on l'usuari no s'ha de preocupar de quins són tots i cadascun dels components a baix nivell electrònic, centrant-se més en la utilitat i els usos del *kit*, proveeix d'una avantatge en els desenvolupaments realment important.

Tant és així, que moltíssims microxips o circuits integrats tenen associat algun tipus de *kit* on són incorporats. Com ja s'ha esmentat anteriorment, això fa que els equips d'enginyeria de les empreses els usin freqüentment per poder arribar a una solució de forma ràpida i senzilla.

També es poden incorporar directament a la solució final, havent-hi projectes que desestimen fer una investigació i construcció de la PCB integrant els components (o alguns d'ells) extrets dels kits. És important remarcar que aquesta, encara ser una solució viable i usada, no és tant comuna donat l'elevat cost d'aquests *kits* en comparació amb una PCB creada amb els integrats corresponents.

### 5.3.1.2. Kits de desenvolupament per les etapes Rectificadora i Reguladora

#### LTC3588EMSE-1

Aquest *kit*, desenvolupat i fabricat per Linear Technology Corporation, és una placa dissenyada expressament per subministrar l'energia generada d'un *energy harvester* piezoelèctric.

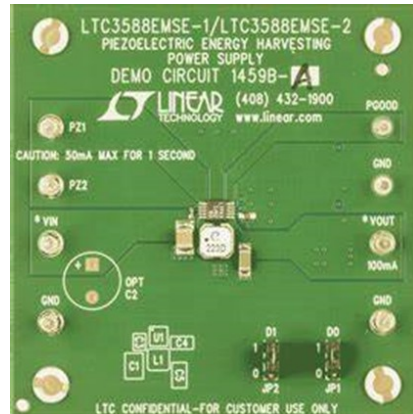


Figura 5.4. Imatge del kit LTC3588EMSE-1 [87]

Això és degut que la tensió generada per un cristall piezoelèctric habitualment oscil·la entre dels 3 – 20V. En contrapartida, la corrent elèctrica generada pel dispositiu-plataforma piezoelèctric és molt menor, sent valors habituals de  $\mu\text{A}$  o fins i tot  $\text{nA}$ .

Aquest fenomen impossibilita l'ús directe del dispositiu, ja que la poca corrent de sortida no pot abastir un sistema electrònic «convencional».

Així doncs, el *kit* integra un pont de díodes d'ona completa d'alt rendiment amb un convertidor Buck d'alta eficiència per formar una solució completa d'*energy harvesting* optimitzada per a fonts d'energia d'alta impedància de sortida, com per exemple els transductors piezoelèctrics.

A més, incorpora un mode de bloqueig d'ultra baixa corrent en repòs amb una àmplia finestra d'histèresi que permet que la càrrega s'acumuli en un condensador d'entrada fins que el convertidor buck pugui transferir de manera eficient una part d'aquesta a la sortida.

En definitiva, aquesta placa redueix una «alta» tensió d'entrada en una típica i usable per a dispositius electrònics. A més, eleva la corrent de sortida per així poder subministrar altres dispositius amb més facilitat.



## TPS61094EVM-066

En aquesta ocasió, el *kit* és desenvolupat i fabricat per Texas Instruments. Aquesta consta d'un convertidor buck/boost bidireccional síncron amb interruptor que fa de bypass entre l'entrada i sortida.



Figura 5.5. Imatge del kit TPS61094EVM-066 [88]

Aquest *kit* de desenvolupament incorpora l'integrat TPS61094, que consumeix només 60 nA de corrent en repòs. El dispositiu és dissenyat per a la gestió de super-capacitadors, així com *Smart Meters*.

L'integrat té un ampli rang de voltatge d'entrada (0,7 – 5,5V) i una tensió de sortida programable compresa entre els 2.7 i els 5,5 V.

El dispositiu funciona seguint el següent diagrama:

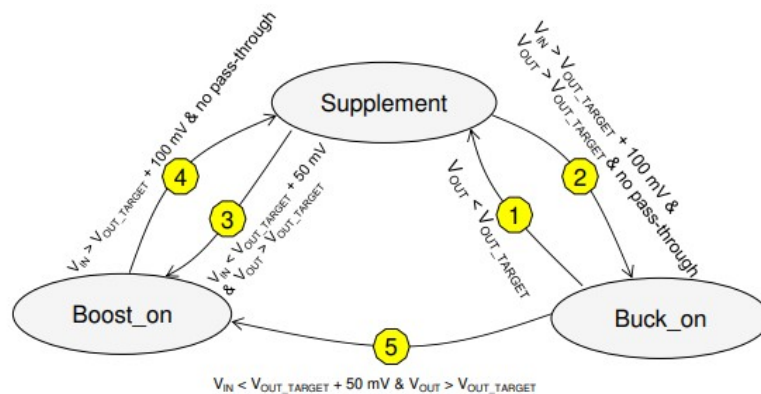


Figura 5.6. Diagrama dels tres estats del dispositiu TPS61094 [89]

Per tant, i tal i com es pot observar en la Figura 5.6, hi ha tres estats que representen el total funcionament de la placa. Aquests estats són:

## Mode Buck

En aquest mode, la placa crea un bypass entre l'entrada i la sortida ja que la tensió desitjada és la que correspon.

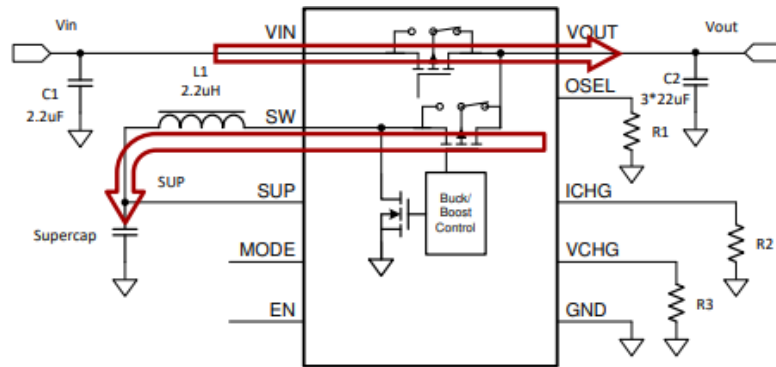


Figura 5.7. Funcionament Buck del dispositiu TPS61094 [89]

Mentrestant, Va carregant el supercondensador per tal d'emmagatzemar energia suficient per suplir una manca sobtada d'aquesta.

## Mode Boost

Quan la tensió d'entrada  $V_{in}$  caigui per sota de la tensió llindar necessària a la sortida, el supercapacitor subministrerà aquesta energia durant la seva descàrrega.

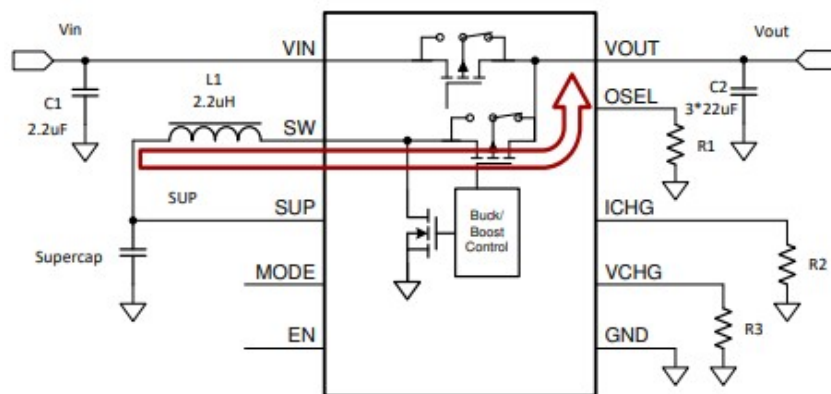


Figura 5.8. Funcionament Boost del dispositiu TPS61094 [89]

Aquesta, dependrà de la càrrega a la sortida i de la capacitat del condensador. Així doncs, els cicles de treball s'hauran d'ajustar a aquests paràmetres si es vol una sortida amb tensió constant.

## Mode d'energia suplementària

També pot ser que malgrat els anteriors dos modes (Buck i Boost) no es pugui fer front a la càrrega sol·licitada a la sortida.

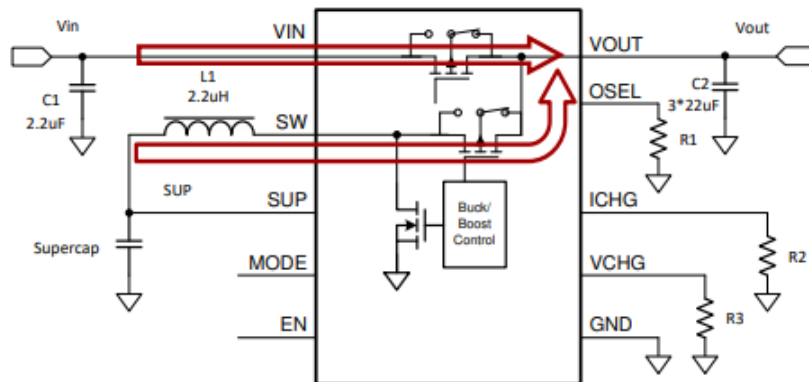


Figura 5.9. Funcionament Suplementari del dispositiu TPS61094 [89]

Així doncs, s'habilita el bypass de l'entrada a la sortida a més del capacitador per tal de suplir aquesta mancança cap a la càrrega.

### 5.3.1.3. Kits de desenvolupament per l'etapa de sortida

#### RN4020 PICtail Plus Daughter Board

Com ja s'ha esmentat, hi ha kits per a tot tipus d'aplicacions que es presenten. En aquest cas, el kit incorpora l'integrat RN4020 que proporciona accés a telecomunicacions mitjançant Bluetooth.

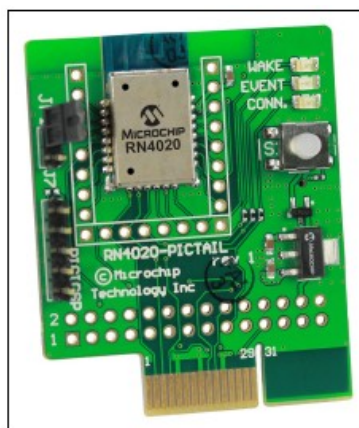


Figura 5.10. Imatge del kit RN4020 PICtail Plus Daughter Board [90]

La placa RN4020 PICtail Plus Doughther és una placa de desenvolupament Bluetooth de baix consum que incorpora el mòdul BTLE (Bluetooth Low Energy) RN4020.

Aquest, és un mòdul Bluetooth *Smart* d'únic mode que incorpora la tecnologia Bluetooth 4.0.

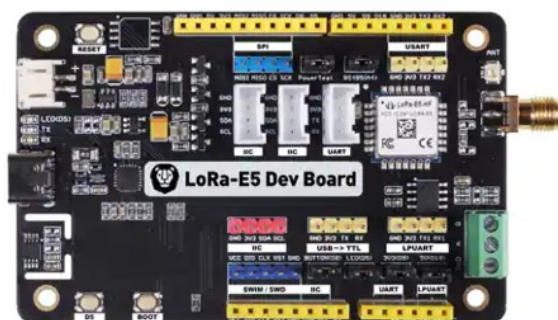
La interfície UART d'alta velocitat i els ports d'entrada de sortida de propòsit general, així com un port sèrie USB-to-UART estan disponibles al mòdul RN4020 per configurar-lo, controlar-lo i transferir dades al mòdul de forma bidireccional.

### **LoRa-E5 Dev Board**

LoRa-E5 és un mòdul LoRaWAN de baix cost i consum i de mida ultra-reduïda dissenyat per Seeed Technology Co. Ltd.

El mòdul utilitza el xip STM32WLE5JC, el xip integrat LoRa SX126X d'alt rendiment i una MCU d'ultra baix consum [91].

Així doncs, l'aplicació objectiu d'aquest mòdul són les WSN i altres dispositius d'IoT.



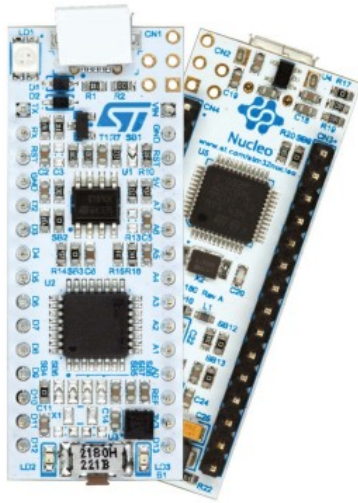
*Figura 5.11. Imatge del kit LoRa-E5 Dev Board [91]*

El mòdul LoRa-E5 LoRaWAN és adequat principalment per a aplicacions de transmissió de dades a llarga distància i d'ultra baixa potència, com ara lectures i xarxes de sensors sense fil, i altres escenaris IoT d'àmplia àrea i baixa potència [91].

### **STM32 Nucleo-32 Boards**

Les plaques STM32 Nucleo-32 ofereixen una manera flexible i assequible de provar nous conceptes i construir prototips amb microcontroladors STM32, escollint entre les diferents combinacions de rendiment, consum d'energia i característiques.

També suporta una connectivitat Arduino Nano la qual facilita l'ampliació de la funcionalitat de la plataforma de desenvolupament Nucleo-32 amb una àmplia selecció de *plugins* especialitzats.



*Figura 5.12. Imatge del kit Nucleo-32 [92]*

Fàcilment programable per poder donar suport a l'etapa de sortida aportant un  $\mu\text{C}$  potent i versàtil.

## 5.4. Tercera aproximació a la solució.

### 5.4.1. Disseny general i consum de l'etapa de l'aplicació I

Primerament s'ha de definir l'etapa d'aplicació per saber amb la major exactitud possible el seu consum.

Així doncs, es farà un repàs dels components necessaris per que aquesta etapa pugui funcionar correctament. Aquesta definició inclourà tant elements passius (resistències, condensadors...) com els propis mòduls del microcontrolador o el mòdul *wireless*.

Com s'observa en la següent figura (Figura 5.13), fent un esquema molt simple i general del sistema es pot comprovar d'una ullada el funcionament d'aquest.

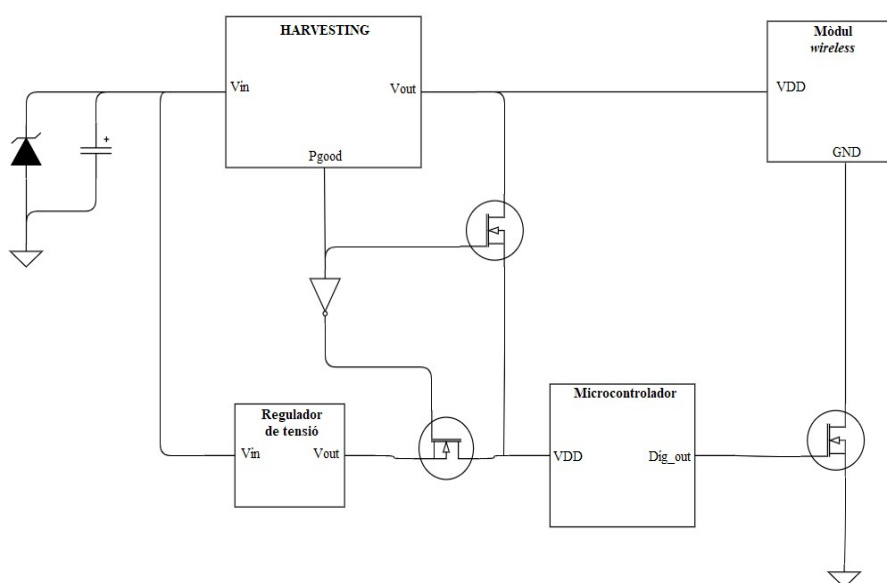


Figura 5.13. Esquema general del sistema

Tal i com es pot veure a la Figura 5.13, hi ha tres components importants (esmentats anteriorment). El uC, el Regulador i el Mòdul *wireless* així com alguns MOSFET o portes NOT.

En el present capítol s'exposaran els consums dels components, donant així la informació necessària per a dimensionar i simular l'etapa de generació d'energia (etapa *harvesting*) descrita en aquest mateix capítol.

L'esquemàtic formal del sistema es mostrarà en el format adequat a Plànols i esquemes.

Per tant, primerament es detallarà el funcionament del sistema i, posteriorment el consum dels seus components.

## **Funcionament del sistema**

L'etapa de recollida d'energia anirà emmagatzemant aquesta en un supercap. Quan s'acumuli la suficient per a donar a la sortida la potència desitjada, el mòdul *Harvesting* posarà Vout a estat alt. No obstant, mentre la sortida Vout es mantingui en estat baix, el uC estarà alimentat a través d'un regulador de tensió (el supercap obté una tensió de fins a 5V, mentre que el uC s'alimenta a 3.3V) estant així sempre en funcionament.

El microcontrolador estarà en estat STOP quan no sigui necessari el seu funcionament per baixar el consum durant tot aquell lapse de temps.

Així doncs, quan Vout es posi en estat alt alimentarà tant el uC com el mòdul BLE.

Aquest últim, estarà controlat per el microcontrolador, el qual decidirà quan ha d'engegar-se a través del MOSFET de connexió a GND.

## **Consum dels mòduls**

El consum principal ve donat per el component *wireless*. Tal i com descriurà el capítol posterior «5.5.4. Disseny del Mòdul wireless», s'ha optat per un mòdul BLE el qual consumeix fins a 16mA durant la transmissió de dades.

També se li ha de sumar el consum del uC, diferenciant entre l'estat STOP i RUN. Sent 0.38uA i 2.5mA respectivament.

El regulador compta amb un consum de unitats de uA, i el sensor al capturar les dades també es tindrà en compte que tindrà un consum de màxim 330uA (en el capítol «5.5.6. Disseny del sensor de temperatura» s'explicarà el per què).

Així doncs, i comptant que tots els components consumeixen alhora (cas més desfavorable) ens trobarem amb una situació de màxim consum de 19mA.

Per tant, la nostra etapa *harvesting* haurà de poder suplir aquesta necessitat de corrent mentre duri l'estat alt de la seva sortida Vout.

## 5.4.2. Disseny del component LTC3588.

Un cop vista de forma general l'etapa d'aplicació i el seu consum aproximat, aquest capítol relacionarà l'etapa de *harvesting* amb el consum de l'etapa d'aplicació. Es faran el disseny i les simulacions adients.

Finalment la solució passarà per implementar un dispositiu integrat amb el component LTC3588. Això és degut a que el seu funcionament es creu adient per a la funció que ha de desenvolupar en el present treball. A més, la seva senzillesa a l'hora d'implementar-se en un circuit ajuda a construir un bon disseny final.

Així doncs es procedeix a fer una sèrie de simulacions per comprovar la consistència del component en termes de captació, rectificació i emmagatzemament de l'energia generada pel dispositiu piezoelèctric.

L'esquemàtic d'aquest dispositiu es pot veure a la Figura 5.14.

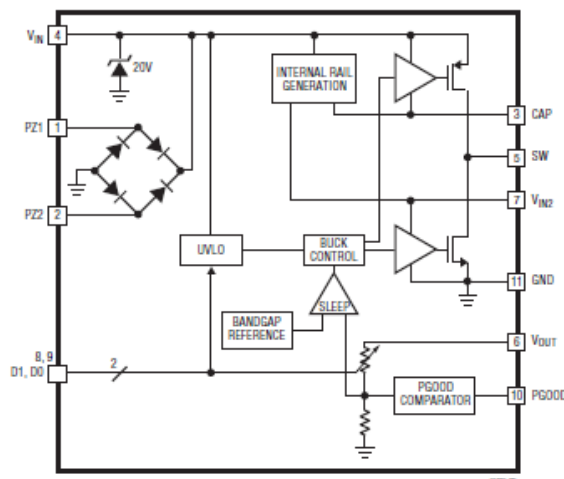


Figura 5.14. Esquemàtic del dispositiu LTC3588 [93]

Sent:

PZ1 (Pin 1) i PZ2 (Pin 2): les corresponents entrades per a col·locar el dispositiu *energy harvester* piezoelèctric.

CAP (Pin 3): Connexió interna referida a  $V_{in}$  per servir com *drive* de la porta per a l'interruptor PMOS del Buck.

Vin (Pin 4): Voltatge d'entrada rectificat del dispositiu EH. Un condensador d'aquest pin serveix com a dipòsit d'energia i subministrament d'entrada per al regulador buck. La tensió VIN està subjecta internament a un màxim de 20 V (mitjançant una connexió Zener).

SW (Pin 5): Pin de commutació per al regulador de commutació Buck.



Vout (Pin 6): Pin de sortida que s'utilitza per controlar i ajustar la tensió mitjançant retroalimentació interna. Connexió amb la càrrega.

Vin2 (Pin 7): Connexió interna de baixa tensió que serveix com a *drive* de la porta per a l'interruptor NMOS del Buck. També serveix com a connexió lògica d'estat alt per als bits de selecció de voltatge de sortida DO i D1.

D1 (Pin 8) i D0 (Pin 9): Bits de selecció de voltatge de sortida. S'han de connectar a Vin2 per generar l'estat alt o a GND per a l'estat baix, seleccionant així una Vout.

Pgood (Pin 10): Sortida lògica per indicar que el condensador d'emmagatzematge és carregat i llest per al seu ús.

GND (Pin 11): Terra.

Així doncs, i coneixent totes les connexions necessàries per al seu funcionament, es munta el circuit de la Figura 5.14 seguint les indicacions del fabricant (Linear Technology) [93].

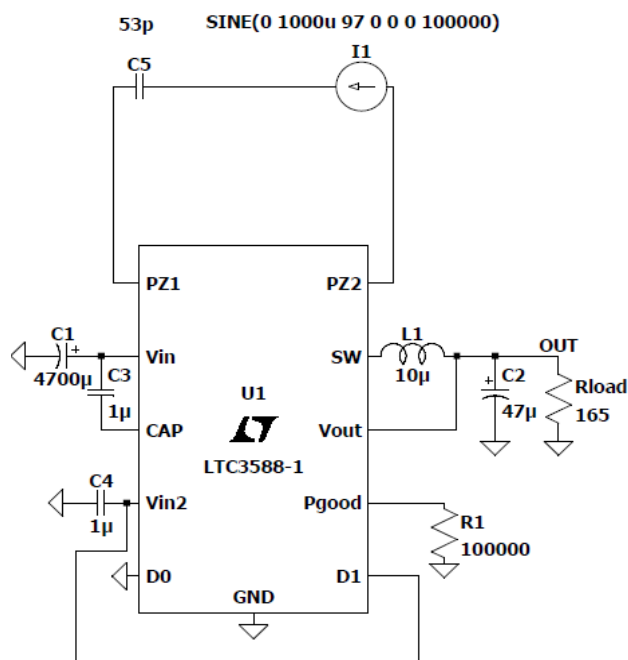


Figura 5.15. Simulació de l'esquemàtic LTC3588 amb els components calculats

A continuació s'explicarà pas per pas els components escollits i el seu ús.

## Entrada

Primerament es calcula l'entrada per a la simulació del sistema tenint en compte les dades que ens dona la figura 3.27 (c).

Per a una sola cel·la obtenim 3,6V a 1,5 Mohm de càrrega a 40Hz. Mediant la llei d'Ohm,

$$P = V \times I = \frac{V^2}{R} \quad (7.1)$$

podem extreure que la intensitat per cel·la és de 2,3 uA (resultats confirmats per Eurecat).

Per tant, per aconseguir una intensitat de 10uA, s'hauria de connectar en paral·lel aproximadament 5 cel·les formant una matriu (més endavant s'explicarà per què a la Figura 5.14, I1 és de 1000uA i no pas 10uA).

Cada cel·la també té associada una capacitança de 800pF demostrat per Eurecat mediant Ismael i el seu TFG [26]. Així doncs, utilitzant (7.2) i connectant 5 cel·les en serie s'obté que la capacitat total és de 4000 pF.

$$C_T = C_1 + \dots + C_n \quad (7.2)$$

## Emmagatzemament

Aquesta etapa és clau a l'hora d'escollir components ja que depenent del condensador, la quantitat d'energia emmagatzemada serà diferent i consegüentment, la disponible per usar en l'aplicació final.

Així doncs, es segueix la equació (7.3) esteta directament del fabricant del component [93] per poder escollir C1 (condensador principal de captura d'energia).

$$P_{LOAD} t_{LOAD} = \frac{1}{2} \eta C_{IN} (V_{IN}^2 - V_{UVLOFALLING}^2) \quad (7.3)$$
$$V_{UVLOFALLING} \leq V_{IN} \leq V_{SHUNT}$$

Sent  $P_{LOAD}$  la potència a la sortida del sistema,  $t_{LOAD}$  el temps desitjat en estat alt,  $\eta$  el rendiment i  $V_{IN}$  el valor màxim que aconsegueix el pin (4) Vin en el moment que canvia d'estat el convertidor Buck. Així com també  $V_{UVLOFALLING}$  que és el valor al que ha caigut la tensió quan torna a canviar d'estat i  $C_{IN}$  que és el valor de C1 buscat o imposat segons les demès condicions descrites abans.

$P_{LOAD}$  és fàcil de trobar, ja que la intensitat de sortida desitjada és de 20mA. Aquesta serà suficient per alimentar el mòdul Bluetooth necessari per emmagatzemar les dades del sensor i enviar-les. Així doncs, amb una sortida proposada de  $V_{out} = 3,3V$  (D0 i D1 ens la proporciona) i una intensitat de 20mA,  $P_{LOAD} = 66mW$ .

Seguidament es calcularà  $t_{LOAD}$ . Segons [32] i [90] el temps estimat d'un enviament de dades per Bluetooth és de aproximadament 100-120ms. Donant un marge substancial, es proposa que siguin 400ms.

El rendiment  $\eta$  ens el marca el fabricant [93] i serà de un 92%.

Per últim queda per determinar les tensions  $V_{IN}$  i  $V_{UVLOFALLING}$ , les quals depenen de  $V_{UVLO}$ . Aquesta tensió és canviant i el seu llindar depèn de les condicions D0 i D1. Per tant, es consideren els valors típics (més endavant es comprovarà la seva exactitud) de  $V_{IN} = 5V$  i  $V_{UVLOFALLING} = 3,6V$ .

Així, segons (7.3), es realitza el càlcul per saber la capacitat del condensador C1:

$$66\text{ mW} * 400\text{ ms} = \frac{1}{2} * 0,92 * C1 * (5^2 - 3,6^2)$$

Doncs,

$$C1 = 4,766\text{mF}$$

En la següent taula (Taula 5.1), es mostra un recull de condensadors comercials disponibles per a la simulació.

C [uF]	Marca	Tipus	Ref. Comercial	Tensió [V]	R sèrie [ohm]
4700	Panasonic	Al electrolythic	ECA0JFQ472L	6,3	0,02
4700	Nichicon	Al electrolythic	UPL1A472MRH	10	0,02
4700	Würth	Al electrolythic	860080278024	10	0,01
4700	Würth	Al electrolythic	860010380025	16	0,02

*Taula 5.1. Condensadors comercials utilitzats en la simulació*

Per recomanació d'Eurecat, s'escollirà el condensador Panasonic (ECA0JFQ472L) amb una tensió nominal de 6,3V i una Resistència sèrie de 0,024ohm.

## Sortida

A la sortida trobem components com ara L1, C2 i  $R_{LOAD}$ .

L1 és la bobina necessària per que el convertidor Buck funcioni correctament. Tal i com ens indica el fabricant [93], el seu valor òptim és de 10uH i només s'ha de canviar per beneficiar aplicacions d'alta tensió augmentant el temps d'encesa de l'interruptor PMOS i millorant l'eficiència reduint la pèrdua de càrrega de la porta. No obstant, en la present aplicació no és necessari. Així doncs,  $L1 = 10\text{uH}$ .

C2 (de 47uF de valor recomanat) és interessant per mantenir una tensió constant a la sortida i minimitzar un descens sobtat de tensió. A més, és important per calcular el  $t_{SLEEP}$  del regulador en funció de la intensitat en la càrrega. Encara que per aquesta aplicació no sigui determinant,

C2 és important ja que per a càrregues superiors a 100mA, C2 es calcula amb (7.4) i no s'usa el valor recomanat.

$$C_{OUT} = (I_{LOAD} - I_{BUCK}) \frac{t_{LOAD}}{V_{OUT+} - V_{OUT-}} \quad (7.4)$$

$$t_{SLEEP} = C_{OUT} \frac{24mV}{I_{LOAD}} \quad (7.5)$$

Així doncs, i seguint la fórmula (7.5), es calcula aquest  $t_{SLEEP}$ .

$$t = 47 \mu F * \left( \frac{24 mV}{20 mA} \right) = 56,4 \mu s$$

Per últim,  $R_{LOAD}$  serà la càrrega necessària per aconseguir una sortida de 20mA. Al no poder simular el sistema conjuntament amb el dispositiu RN4020, s'utilitza una resistència per fer efecte de càrrega.

Cada cop que el sistema estigui llest per mantenir la sortida el temps estimat, descarregarà per la resistència un corrent igual al desitjat simulant així el consum del mòdul Bluetooth.

Per tant, i amb (7.1), si  $V_{out} = 3.3V$ , per aconseguir una intensitat de 20mA a la sortida es necessitarà una resistència de  $R_{LOAD} = 165\Omega$ .

## Connexions auxiliars

Tot seguit es detallaran les connexions necessàries per a que el sistema funcioni. Totes elles són imposicions del fabricant per que el circuit funcioni de manera correcte, així que s'han extret directament de [93].

Als pins (3) CAP i (7) Vin2 s'han de connectar dos condensadors de petita capacitat (1uF típicament) per a que el sistema reductor Buck funcioni. Així que s'hi posarà  $C3 = 1\mu\text{F}$  i  $C4 = 1\mu\text{F}$ .

Els pins (8) D1 i (9) D0 seleccionen la tensió de sortida depenent de la seva connexió a massa o a un estat alt segons la següent taula:

D1	D0	Vout [V]	Vout QC [nA]
0	0	1,8	44
0	1	2,5	62
1	0	3,3	81
1	1	3,6	89

Taula 5.2. Selecció de Vout en funció dels pins D0 i D1 [93].

Així doncs, i segons la Taula 7.2, es posarà  $D1 = 1$  i  $D0 = 0$  per poder obtenir una  $Vout = 3.3\text{V}$  per poder alimentar el mòdul Bluetooth i els sensors adjacents per a la aplicació.

Seguidament, el pin (11) GND s'haurà de connectar a massa per referenciar el sistema.

Per últim, es pot observar una resistència R1 connectada al pin (10) Pgood.

Aquesta simplement és per poder monitorar si la sortida d'OK de l'integrat és correcte i ens pot proporcionar la senyal d'activació del mòdul Bluetooth o qualsevol altra que sigui necessària en la aplicació.

Un cop s'ha format el petit sistema al voltant del component LTC3588, es simula per obtenir els diferents resultats i arribar a certes conclusions.

### 5.4.3. Simulacions per a l'etapa de *Harvesting*

Les simulacions que s'han realitzat a continuació han sigut tenint en compte els diferents paràmetres (tots ells detallats en el capítol anterior, «6.4.1. Disseny del component LTC3588»):

FA: Font d'alimentació. Ja s'ha detallat que la FA usada a l'aplicació serà de 10uA en alterna per simular les cel·les connectades formant una matriu. No obstant, aquí s'han usat valors com 20, 200 o 1000uA per veure si la relació de càrrega del condensador mitjançant l'LTC3588 és lineal, o no.

C1: Condensador principal d'emmagatzemament de l'energia generada pel dispositiu-plataforma piezoelèctric.

C2: Condensador de sortida.

R (load): Resistència de càrrega simulant el consum del dispositiu Bluetooth.

D0 i D1: Selecció de Vout.

#### 5.4.3.1. Simulacions del comportament lineal de càrrega.

La primera simulació es farà servir per veure si l'anteriorment esmentada càrrega del condensador es fa de forma lineal, per poder simular de forma més ràpida extrapolant resultats.

Així doncs, la primera simulació es conforma amb:

FA: 200u, 97Hz

C1: 1mF

C2: 47uF

R ( $R_{LOAD}$ ): 300ohm

D0, D1: 0, 1

Seguidament, es fa una lectura sobre la Figura 5.15 dels dos paràmetres més importants a l'hora de saber si es poden extrapolar els resultats a altres FA.

Primer, el temps de càrrega del dispositiu per a poder completar el primer cicle.  $t_{inici}$ , com se li ha anomenat, mostra que el dispositiu està llest pel primer enviament de dades en un temps de  $t_{inici} = 38,4s$ .

Segon, el temps entre cicles un cop carregat per primer cop el dispositiu s'anomenarà  $t_{cicle}$ . Aquest temps en la simulació és de  $t_{cicle} = 9,6s$

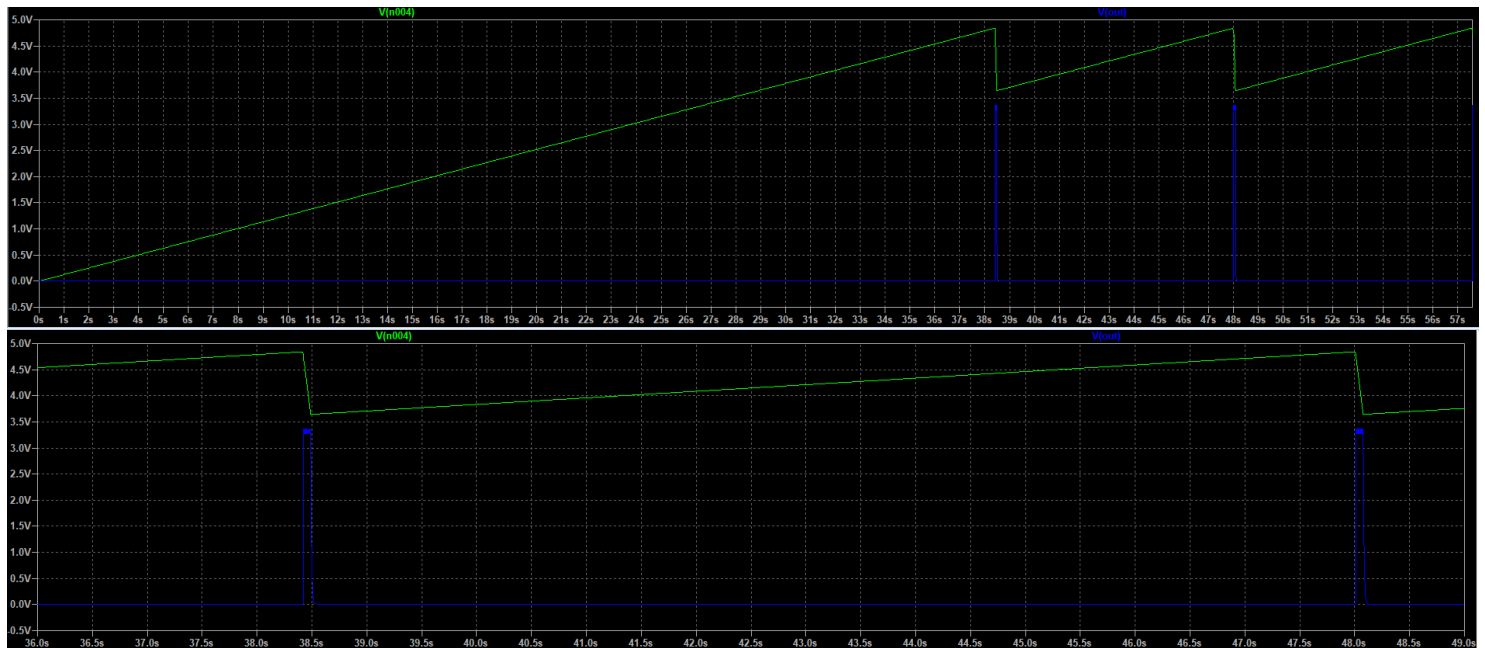


Figura 5.16. Imatge Simulació 1. Visió de  $t_{cicle}$  i  $t_{inici}$ .  $V_{in}$  (Verd),  $V_{out}$  (Blau).

Un cop s'obté aquests resultats, es procedeix a fer una segona simulació amb les següents característiques:

FA: 20u, 97Hz  
 C1: 1mF  
 C2: 47uF  
 R ( $R_{LOAD}$ ): 300ohm  
 D0, D1: 0, 1

Com es pot comprovar, l'únic canvi respecte a l'anterior cas és la FA, on s'ha reduït la intensitat d'entrada un factor 10.

A la Figura 5.16, es presenten els resultats d'aquesta segona simulació, mostrant els paràmetres clau esmentats abans;  $t_{inici} = 387s$  i  $t_{cicle} = 96s$

Per tant, s'extrauen conclusions molt importants respecte aquest dispositiu:

Sempre que els components auxiliars (resistències, condensadors...) de l'integrat LTC3588 es fixin, la càrrega en tensió del condensador (o supercondensador) de l'etapa d'emmagatzematge és lineal. És a dir, hi ha una relació directa i proporcional entre la potència subministrada pel dispositiu *energy harvester* i la capturada i guardada a través del pin (4)  $V_{in}$  (connexió directe amb el capacitor).

Si el dispositiu piezoelèctric real, en comptes dels 10uA esperats, en recol·lectés 5 simplement s'allargarien en un factor 2 els temps de càrrega per iniciar els cicles i els temps entre possibles cicles. Per tant, entre emissions de dades pel mòdul Bluetooth. Dada molt útil de cara a l'experimentació pràctica.

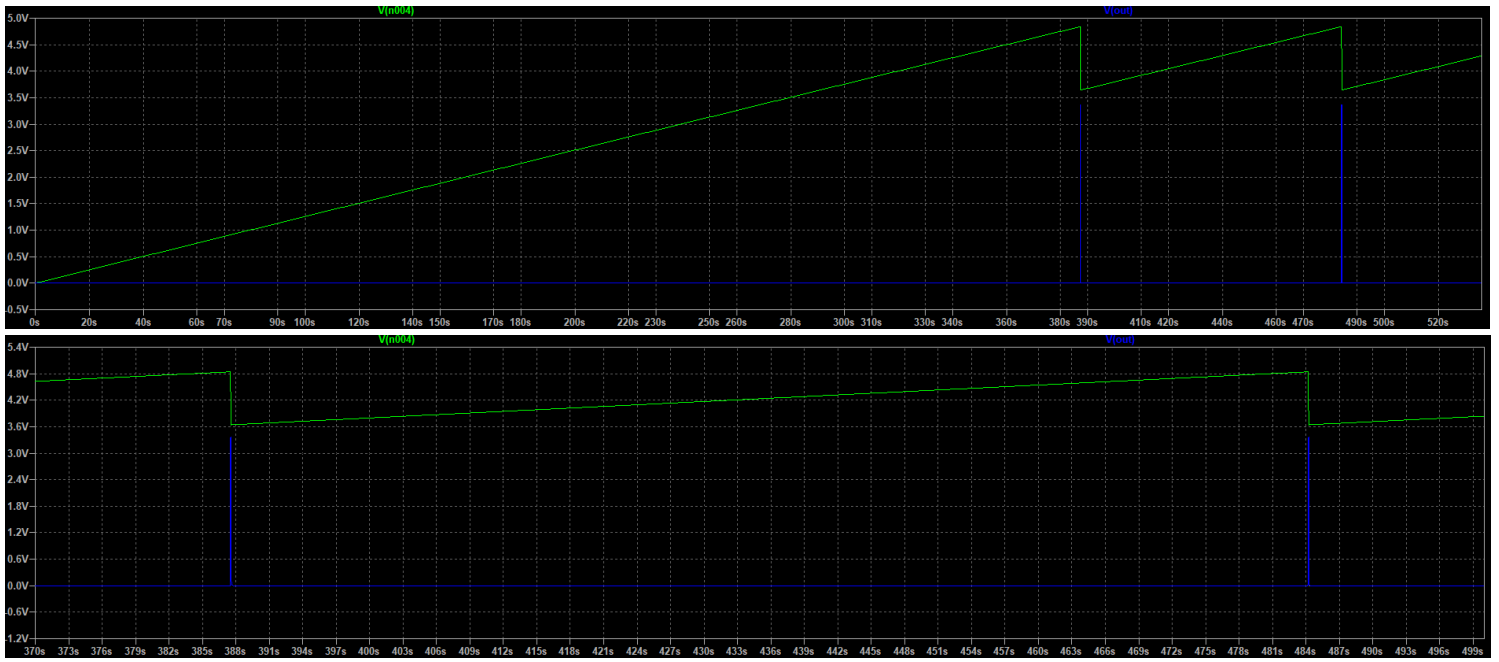


Figura 5.17. Imatge Simulació 2. Visió de  $t_{cicle}$  i  $t_{inici}$ .  $V_{in}$  (Verd),  $V_{out}$  (Blau).



### 5.4.3.2. Simulació final amb els components calculats.

Un cop vist que el comportament del dispositiu és lineal (proporcional) es procedeix a fer la simulació amb els components calculats anteriorment. Un cop realitzades, es comprovarà si els càlculs prèviament fets es compleixen, les desviacions amb aquests i si l'error és significatiu per a l'aplicació que recull el present document.

Les característiques del sistema simulat són:

FA: 1000u, 97Hz  
C1: 4,7mF  
C2: 47uF  
R ( $R_{LOAD}$ ): 165ohm  
D0,D1: 0, 1

Com es pot observar, la FA és de 1000uA per accelerar la simulació. Però com ja s'ha vist en el capítol anterior (6.4.2.1. Simulacions del comportament lineal de càrrega) és escalable a qualsevol altra FA, de més elevada o reduïda potència.

També s'inclou el condensador C1 de 4,7mF, el qual s'ha calculat per obtenir un cert temps en estat alt així com  $R_{LOAD}$  de 165ohm per aconseguir els 20mA a la sortida.

Així doncs, es munta el circuit de la Figura 5.14 i es simula. Obtenint els següents resultats:



Figura 5.18. Imatge Simulació 3. Visió de  $t_{cicle}$  i  $t_{inici}$ .  
 $V_{in}$  (Verd),  $V_{out}$  (Blau Fosc),  $I_{out}$  (Vermell) i  $P_{good}$  (Blau cel).

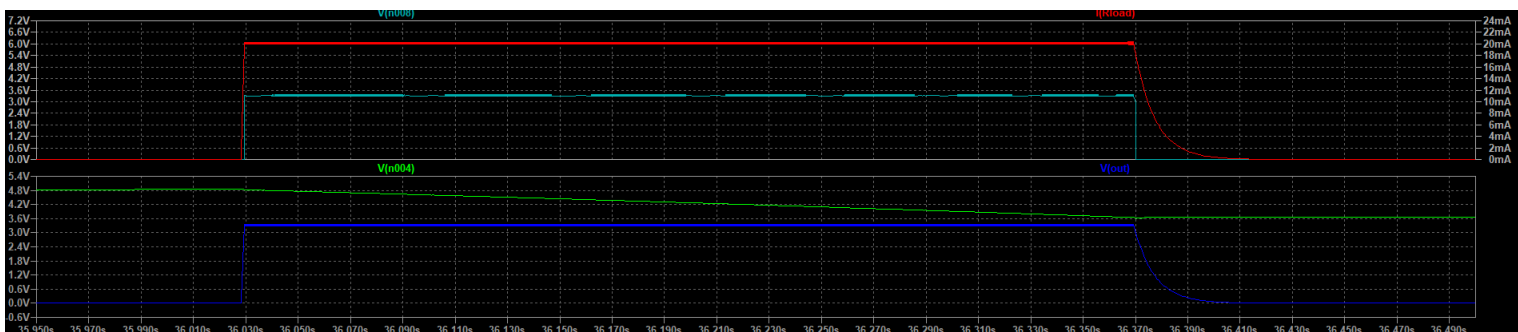


Figura 5.19. Imatge Simulació 4. Visió de  $t_{LOAD}$ .  
 $V_{in}$  (Verd),  $V_{out}$  (Blau Fosc),  $I_{out}$  (Vermell) i  $P_{good}$  (Blau cel).

A partir de les simulacions anteriors (Figures 7.24 i 7.25), es comproven variïts resultats molt interessants de cara a la següents fases:

Fàcilment es comprova com la intensitat de sortida és la desitjada, a 20mA constants durant el període en que la càrrega la demana.

També és important com la senyal de Pgood es manté activa quan el condensador és llest per a descarregar-se. Clarament aquesta senyal pot servir d'OK per l'enviament de dades, així que es corrobora el seu correcte (i esperable) funcionament.

També es comprova que Vout es manté constant tota l'estona en que la càrrega sol·licita el corrent, estabilitzada aquesta tensió a 3.3V fins que decau en el mateix instant que la intensitat.

Els temps  $t_{cicle}$  i  $t_{inici}$  són de 9,3 i 36 segons respectivament.

No obstant, es veuen clares diferències en el teòric temps  $t_{LOAD}$ .

Aquest, és fixat a l'anterior apartat («5.5.5. Disseny de la etapa rectificadora, reguladora i d'emmagatzemament») a 400ms per a fer els càlculs per a dimensionar el condensador C1, sent aquest l'encarregat de capturar l'energia del dispositiu piezoelèctric. Però s'observa una desviació del 15% respecte els càlculs, sent  $t_{LOAD} = 340ms$ .

Tenint en compte la fórmula (7.3), hi ha diversos factors que fan que el resultat simulat i el calculat varii sensiblement:

- Primerament el condensador proposat en aquesta fórmula és ideal, sense inductància ni resistència interna que modifiqui el seu comportament. Encara que la variació sigui mínima, sempre s'ha de tenir compte aquest factor.
- Seguidament es passa al factor de desviació de capacitat del C1 calculat a l'exposat en la simulació. També és un canvi de 66uF que no es tenen en compte.
- Un valor donat pel fabricant de  $\eta$  pot influenciar, encara que sigui mínimament, si no s'acompleix al 100% podent modificar així el valor final.
- Per últim, i el canvi més substancial, són els valors de  $V_{IN}$  i  $V_{UVLOFALLING}$ . Aquests s'han calculat també amb els valors típics donats pel fabricant, 5 i 3,6 respectivament. Però en la simulació s'observa una desviació en ambdós casos. Sent  $V_{IN} = 4,8V$  i  $V_{UVLOFALLING} = 3,7V$ .

Així i tot, el temps  $t_{LOAD}$  encara té una folgança substancial, i per tant, el dimensionat i els components escollits són considerats correctes.

## 5.5. Quarta aproximació i disseny de les etapes final

### 5.5.1. Disseny general i consum de l'etapa de l'aplicació II

Tenint en compte el capítol «5.4.1 Disseny general i consum de l'etapa de l'aplicació I», s'han fet certes modificacions en l'esquema general descrits mitjançant una revisió de l'estudiant amb els membres d'Eurecat.

En la Figura 5.13 s'observa el component Regulador, el qual a la revisió s'ha optat per eliminar tal i com mostra la Figura 5.20.

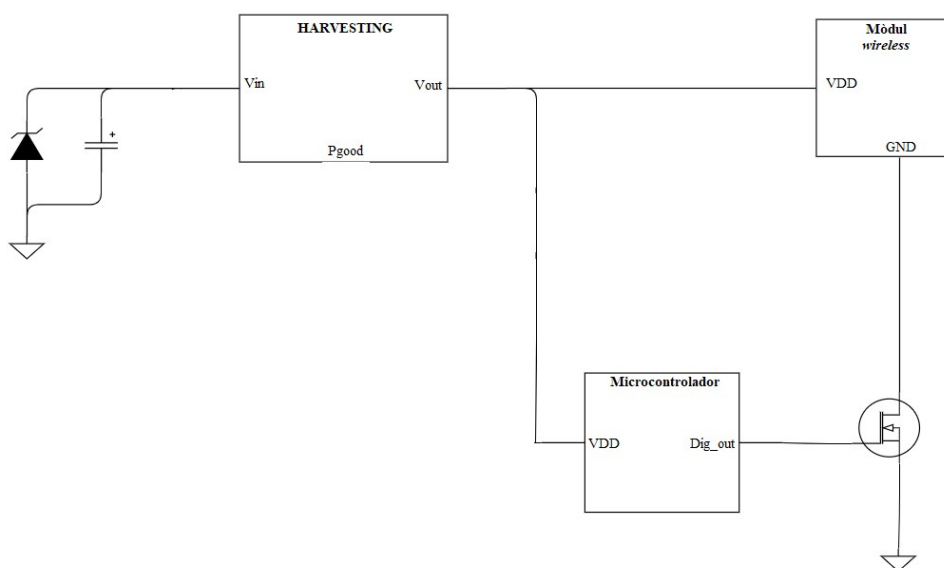


Figura 5.20. Esquema general i final del sistema

Això és degut a que la complexitat i la baixa capacitat de recollida energètica del sistema requeria d'una font commutada (degut al seu alt rendiment en termes de regulació de tensió).

Com es comprovarà en el següent capítol «5.5.2. Simulacions del regulador de tensió», el sistema deixa d'ésser funcional. Per tant, es modifica lleugerament l'actuació del sistema però a canvi es garanteix la seva viabilitat tècnica.

No obstant això, el consum general del sistema no canvia, sent encara de màxim 19mA. Per tant, no es requereixen nous càlculs ni simulacions per part del component LTC3588 (de consum).

## 5.5.2. Simulacions del regulador de tensió

Per fer la simulació del regulador és necessari acoblar al condensador principal de la Figura 5.15 aquest component. En aquest cas, i per recomanació d'Eurecat s'escull el LTC3405. Aquest element ja ha sigut usat per l'equip i ha donat bons resultats amb anterioritat [32].

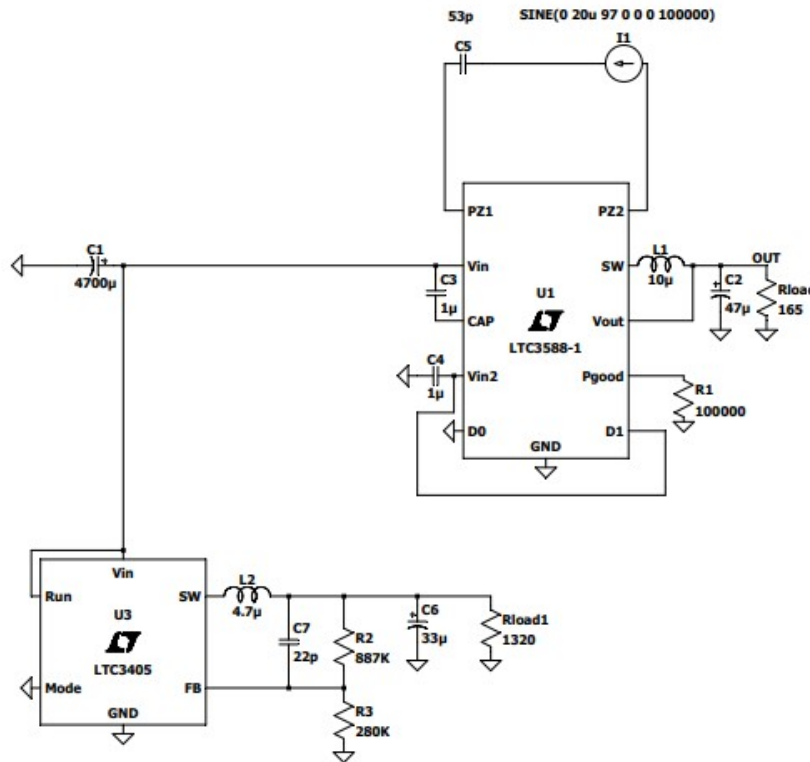


Figura 5.21. Components per a la simulació del regulador.

A la Figura 5.21 es mostren els components usats en aquest recull de simulacions.

Tots els components usats són els recomanats pel fabricant [94], menys la Rload1, que simularà la càrrega del uC.

Així doncs, es procedeix a fer les simulacions adients per a comprovar el funcionament del tàndem LTC3588 – LTC3405.

### 5.5.2.1. Simulacions amb corrent nominal

Es fa la simulació amb els elements de la Figura 5.21, donant com a resultat la Figura UPS.



Figura 5.22. Simulació del regulador amb corrent nominal de 20uA.  
 $V_{in}$  (Verd),  $V_{out}$  (Blau Fosc),  $V_{reg}$  (Vermell).

Com es comprova a la Figura 5.22, el seu funcionament no ha sigut l'esperable donant pas a una estabilització de les tensions per sota dels valors esperats tant de  $V_{in}$  (la del condensador) i  $V_{reg}$ .

Clarament, al no assolir  $V_{in}$  el valor esperat (3.3V)  $V_{out}$  no torna en estat alt. Per tant, el sistema no és viable.

Per estudiar aquest comportament anòmal per part d'ambdós components, s'ha de verificar la causa d'aquest error i quina és la solució més adient en aquest cas.

Per tant, es fa una segona simulació.

### 5.5.2.1. Simulacions amb una corrent sobredimensionada

Un cop vista que la simulació amb un corrent de càrrega nominal falla, es comprovarà si és problema d'interconnexions entre els components o de problema amb la corrent generada pel dispositiu-plataforma piezoelèctric.

Així doncs, es proposa una corrent d'alimentació molt superior per poder comprovar si la problemàtica ve generada per la falta de corrent (corrent excessivament baix).

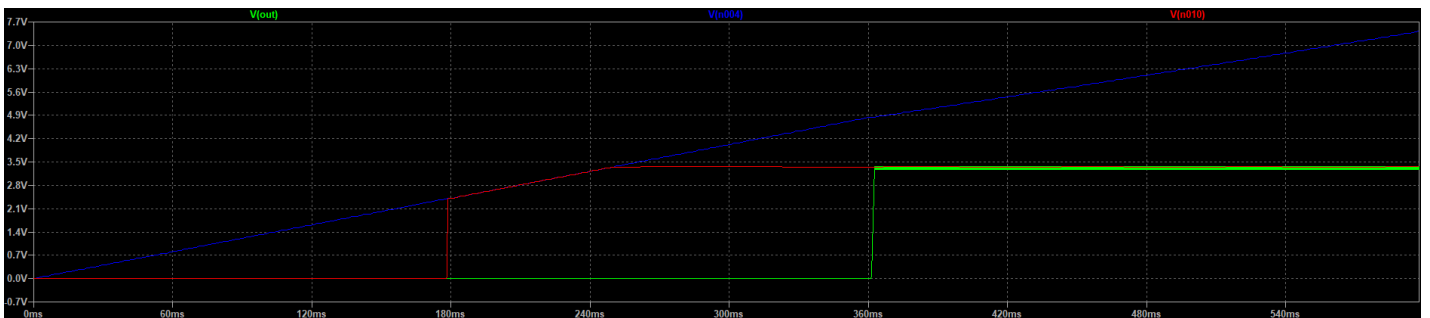


Figura 5.23. Simulació del regulador amb corrent de 100mA.  
*Vin (Blau Fosc), Vout (Verd), Vreg (Vermell).*

Es fa la simulació pertinent (Figura 5.23), amb una FA molt superior. En aquest cas de 100mA.

S'observa el següent resultat:

Es comprova que, amb un corrent molt més elevat, el funcionament del sistema és el correcte.

La tensió del regulador Vreg es manté constant a 3.3V sempre i quan la tensió Vin (la tensió del condensador) superi aquest valor. I la sortida Vout, sempre que el mòdul «detecti» que té suficient energia, la mantindrà en estat alt.

Les conclusions que s'extreuen és que per a que el sistema plantejat a la Figura 5.13 funcioni, la càrrega mitjançant el sistema *harvesting* ha de ser més elevada. Per tant, finalment s'exclou el component Regulador i es redissenya el circuit, com es mostra a la Figura 5.20 ja que no es pot garantir un bon funcionament amb corrents limitades (com és el cas de l'actual treball).

### 5.5.3. Disseny del Microcontrolador

Un cop s'han dimensionat els components que actuaran en aquestes etapes, el següent pas és el disseny dels esquemes que acompanyaran al disseny final. Aquests construiran la base per construir la PCB del prototip.

#### Elecció del microcontrolador

Finalment s'ha escollit un uC per a l'etapa de l'aplicació per la seva versatilitat i la seva relativament fàcil programació, el microcontrolador STM32L031 de la marca ST.

Aquest component utilitza principalment dos llenguatges de programació molt coneguts, com són el C i el C++. Aquests han sigut adaptats per la pròpia marca comercial, donant lloc a un llenguatge «propi» fàcilment reconeixible i amb una gran potència.

Com ja s'ha parlat en el capítol «5.3.1.3. Kits de desenvolupament per l'etapa de sortida», aquest uC té un *kit* de desenvolupament anomenat Nucleo-32, en el qual es poden fer tota mena de proves prèvies a la implementació en el prototip final.

El programa a implementar es parlarà en el capítol posterior «5.7. Programació del microcontrolador».

#### Disseny del microcontrolador

En el present es conformarà l'esquemàtic per a poder construir la PCB així com una explicació del seu connexionat.

Per tant, es mostra a la Figura 5.24 l'esquemàtic de l'STM32L031:

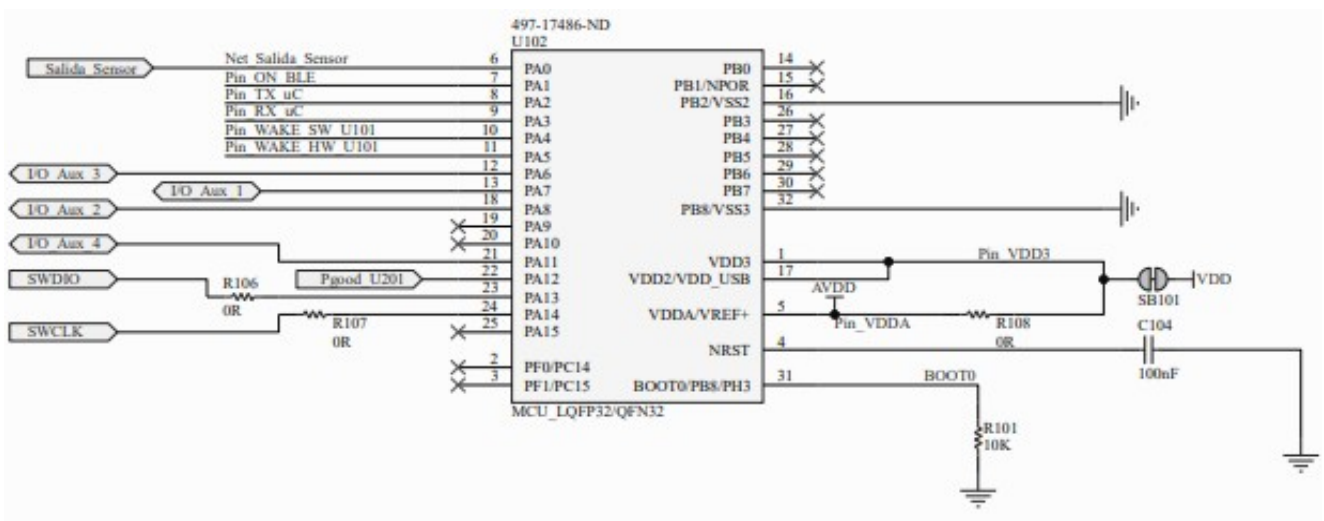


Figura 5.24. Esquemàtic del component STM32L031.

Primerament, i fixant-nos en la part esquerra de la Figura 5.14, es poden veure fins a 15 connexions importants: PA0, PA1, PA2, PA3, PA4, PA5, PA6, PA7, PA8, PA11, PA12, PA13, PA14, PC13 i PC14.

Començant per el primer, el pin PA0 està connectat al Port: Salida\_Sensor. Com també s'explicarà en el capítol «5.5.6. Disseny del sensor de temperatura» i tracta (en part) el capítol «5.7. Programació del microcontrolador», consisteix en la sortida del valor analògic del sensor. Aquest valor es «transforma» en un valor digital mitjançant un ADC programat en el propi microcontrolador. Aquesta «transformació» és possible gràcies a que el pin té la funcionalitat (opcional) de fer-se servir com a tal, segons la informació donada pel propi fabricant [92].

El pin PA1 es connectarà s'explicarà en el capítol «5.5.4. Disseny del Mòdul *wireless*», però servirà per controlar l'encesa del BLE.

Els pins PA2 i PA3 consisteixen en els pins de transmissió de dades via USART amb el mòdul *wireless*. Són, respectivament, la USART2\_TX i la USART2\_RX.

Els pins PA4 i PA5 seran, respectivament, el Wake\_SW i el Wake\_HW del mòdul *wireless*. Aquests pins, conjuntament amb els anteriors, habiliten al microcontrolador a comunicar-se amb aquest mòdul *wireless* mitjançant ordres API en codi ASCII.

Els pins PA6, PA7, PA8, PA11 són entrades o sortides auxiliars per si es necessités en un futur. I són connectades als Ports: I/O\_Aux\_3, I/O\_Aux\_1, I/O\_Aux\_2 i I/O\_Aux\_4 respectivament.

El pin PA12 és un dels més importants, ja que és una entrada que prové del mòdul *harvesting*. La senyal rebuda és la Pgood, amb la qual es rep la senyal de que el condensador està carregat i és llest per a usar-se la seva energia. Per tant, es connecta el Port: Pgood\_U201 a aquest pin.

Per últim, els pins PA13 i PA14 són els encarregats de poder programar el uC un cop estigui en la PCB. Porten associada una resistència sèrie per poder aïllar-los dessoldant-los si fos necessari.

Per altra banda, a la part Dreta de la Figura 5.24, tenim els pins VSS2, VSS3, VDD2, VDD3, VDDA, NRST i BOOT0.

Com es podrà comprovar, la majoria d'aquests pins són connectats d'aquesta manera per recomanació del fabricant [92]. Així doncs, es farà un repàs de tots ells a continuació.

Primerament, VSS2 i VSS3 són posats a terra, a no ser que es configuren els pins PB2 i PB8 expressament per ésser usats. Com no és el cas en aquesta aplicació, es connecten directament a GND.

Els pins VDD2, VDD3 i VDDA estan connectats tal i com marca el fabricant [92]. També és així per a la resistència R108. Aquests són els pins d'alimentació del propi component, així que és molt important mantenir la tensió el més constant possible en els mateixos.



Per aquest mateix motiu, tal i com es veu a la següent figura (Figura 5.25), es connecten una sèrie de condensadors.

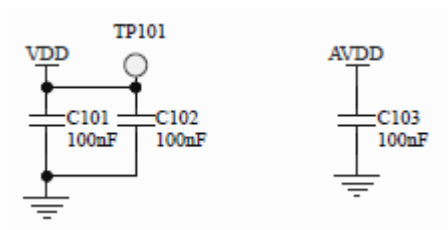


Figura 5.25. Bateria de condensadors per a la tensió VDD del mòdul STM32L031.

En aquesta mateixa figura es veu un Test Point, connectat a l'alimentació del uC, precisament per poder comprovar si la tensió és l'adequada.

Aquests seran usats en tots els esquemàtics i serveixen per poder mesurar tensions en les proves dels prototips. El seu ús ha sigut recomanació de l'equip d'Eurecat per poder fer més fàcil aquesta etapa de testos.

Els pins restants són el NRST i el BOOT0.

El primer té com a utilitat reiniciar un nou programa i posar la MCU a l'estat inicial. Per defecte, connectarem un condensador conjuntament amb un interruptor.

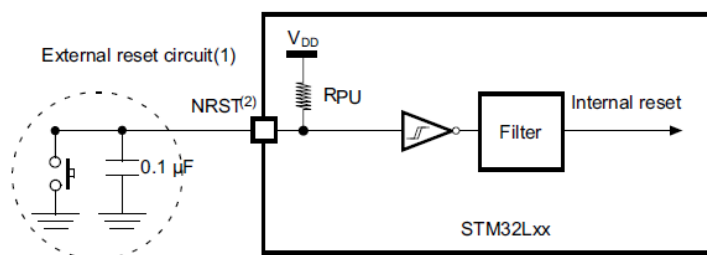


Figura 5.26. Connexionat extern i intern del pin NRST. [92]

La senyal generada pel polsador de la Figura 5.26 es desestima per recomanació de l'equip d'Eurecat, ja que no es creu necessària per aquesta aplicació.

Per últim, el pin BOOT0 és connectat a massa mitjançant una resistència de *Pull-Down*, i serveix per a que el dispositiu STM enguegi mitjançant la memòria *flash* de l'usuari [92].

Així doncs, s'ha fet un exhaustiu repàs al connexionat el mòdul STM32L031 (microcontrolador).

## 5.5.4. Disseny del Mòdul wireless

### Elecció del mòdul *wireless*

Per últim, en aquest capítol es descriurà el disseny i els esquemàtics del mòdul *wireless* escollit.

Pensant en l'aplicació del present projecte, hi ha tres possibles vies de connexió *wireless*. Aquestes són: NFC, Bluetooth i RF. Cadascuna de major potència i distància de transmissió que l'anterior.

NFC és de molt baix consum, però la seva distància de transmissió de centímetres fa inviable la seva aplicació al projecte. No obstant, pot tenir un ús i un rendiment molt bo en altres tipus de projectes donat la seva baixa potència.

Per altra banda existeixen mòduls de RF molt adequats que podrien adequar-se a les condicions de treball del present treball. Un d'aquests pot ser l'esmentat en el capítol «7.3.1.3. Kits de desenvolupament per l'etapa de sortida», el mòdul LoRa-E5.

Si bé és cert que es podria condicionar el sistema per adaptar-se a aquests tipus de transmissions, el seu consum és el més elevat de tots ells. Donat que no es creu necessari que les dades enviades per el sensor arribin a quilòmetres de distància, es descarta aquest tipus de comunicació.

Per tant, els mòduls Bluetooth són la opció més aconsellable per aquesta aplicació en concret, i és la recomanada per l'equip d'Eurecat.

Com també descriu el capítol mencionat prèviament, el mòdul RN4020 és un mòdul Bluetooth que a més té un *kit* de desenvolupament per si fos necessari fer proves de retransmissions. Sent aquest un BLE, ens assegurem que la potència del dispositiu no és massa elevada i que es pot usar sense cap inconvenient.

### Disseny del mòdul BLE

Un cop escollit el component es materialitza en un esquemàtic que, conjuntament amb tots els descrits en aquest capítol («5.5. Quarta aproximació i disseny de les etapes final»), conformaran l'esquemàtic general recollit a Plànols i esquemes.

En aquest esquemàtic, recollit a la Figura 5.27, es poden veure que les connexions al mòdul BLE són: UART\_TX, UART\_RX, WAKE\_SH, WAKE\_HW, GND conjuntament amb un MOSFET i l'alimentació VDD.

Aquesta alimentació està connectat al Port: Vout\_U201, i aquesta serà una connexió directe amb la sortida del component *harvesting* LTC3588.

Els pins UART\_TX, UART\_RX, WAKE\_SW i WAKE\_HW són, com s'ha explicat en el capítol «5.5.3. Disseny del Microcontrolador» serveixen per establir la comunicació UART amb el microcontrolador. Porten associada una resistència de 0R per poder desconnectar fàcilment de la placa aquestes connexions, si es donés el cas de necessitat.

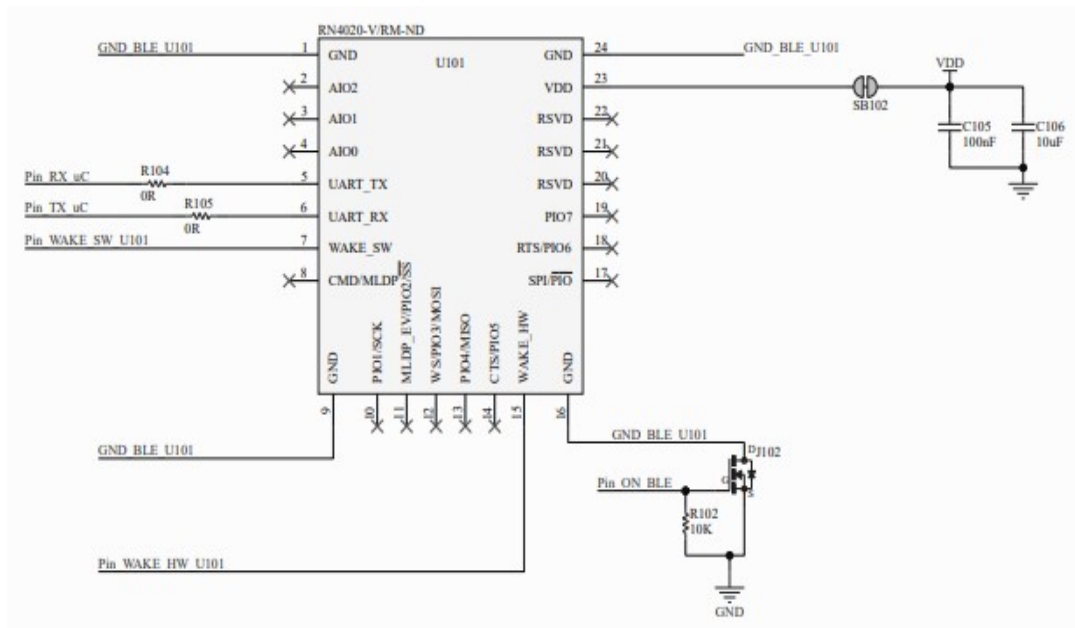


Figura 5.27. Esquemàtic del mòdul BLE, RN4020.

Per últim, i no menys important, es troba el MOSFET (DJ102) que connecta el GND del component amb terra.

S'ha optat per aquest disseny per que el uC pugui controlar no només el moment en que es vulgui que el mòdul BLE rebi les dades i faci la transmissió Bluetooth, si no que també la seva engegada. Així el mòdul RN4020 no consumirà energia innecessàriament (p.e.) mentre el microcontrolador estigui tractant les dades del sensor.

Per tant, la porta G del MOSFET estarà connectada a la sortida PA1 del microcontrolador.

## 5.5.5. Disseny de la etapa rectificadora, reguladora i d'emmagatzemament

### Disseny del component LTC3588-1

A continuació, s'insereix el mateix component LTC3588 als esquemàtics, com es pot veure a les Figures 7.26 (component) i 7.30 (etapa).

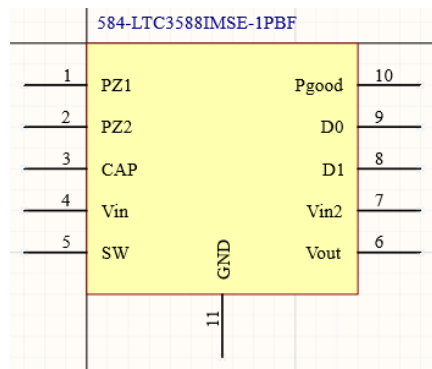


Figura 5.28. Disseny del component LTC3588.

Com aquest component no és a la base d'Altium, s'han fet ús dels coneixements adquirits per l'estudiant a través d'Eurecat per dissenyar tant l'esquemàtic (Figura 5.28) com el disseny en sí del component, com es comprova a la Figura 5.29.

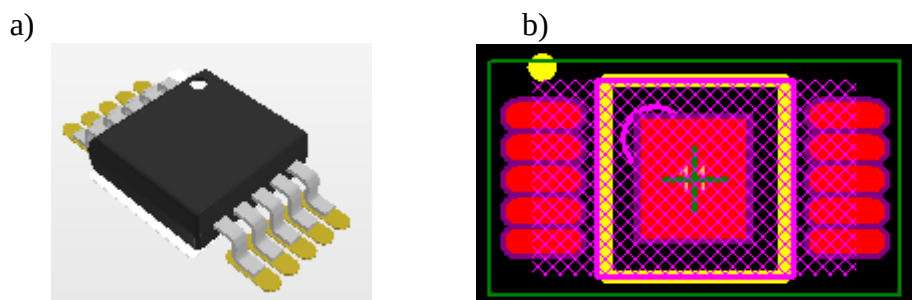


Figura 5.29. Figura del component LTC3588, a) En 3D b) En 2D

Un cop creat el component en si, es procedeix a conformar l'esquema. En aquest capítol es veurà pas per pas els components escollits així com l'esquema general. No obstant, aquest últim, també és recollit a Plànols i esquemes en un format més adequat.

## Disseny de l'etapa *harvesting*

Seguint la Figura 5.15, i començant per la part esquerra del component, es col·loquen els components necessaris per al correcte funcionament del sistema (Figura 5.30).

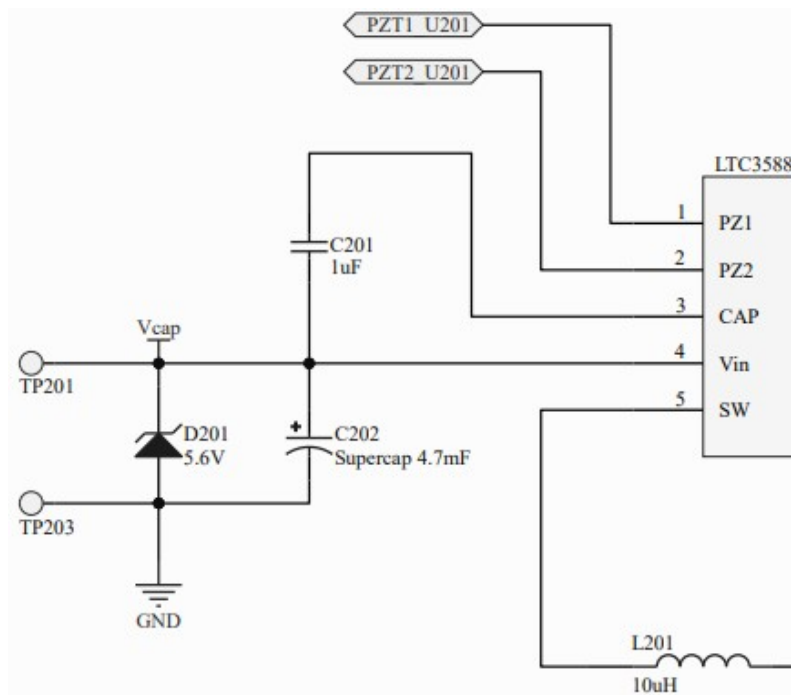


Figura 5.30. Part esquerra de l'esquemàtic de LTC3588.

Com s'observa, els components L201, C202 i C201 coincideixen amb L1, C1 i C3 respectivament de la Figura 5.15. A més, aquí les entrades analògiques del piezoelèctric estan referenciades amb els Ports: PZT1\_U201 i PZT2\_U201.

Hi ha tres diferències principals comparant la present figura (Figura 5.30) amb l'esmentada anteriorment (Figura 5.15), i són els «components» TP201, D201.

El primer d'ells és un altre Test Point, ja usat amb anterioritat en tots els esquemàtics.

El segon component és un díode Zener, el qual servirà per protegir el condensador de tensions superiors a les que pugui suportar.

El seu ús és recomanat pel propi fabricant [93]. Encara que en aquesta aplicació no hauria de sobrepassar-se aquesta tensió (i menys amb el condensador escollit,  $V_{MAX}=16V$ ), es posarà per donar un extra de protecció addicional (en cas de falla, un condensador pot explotar amb certa violència).

Seguint amb l'element LTC3588, a la Figura 5.31 es veu la part restant del component (Dreta).

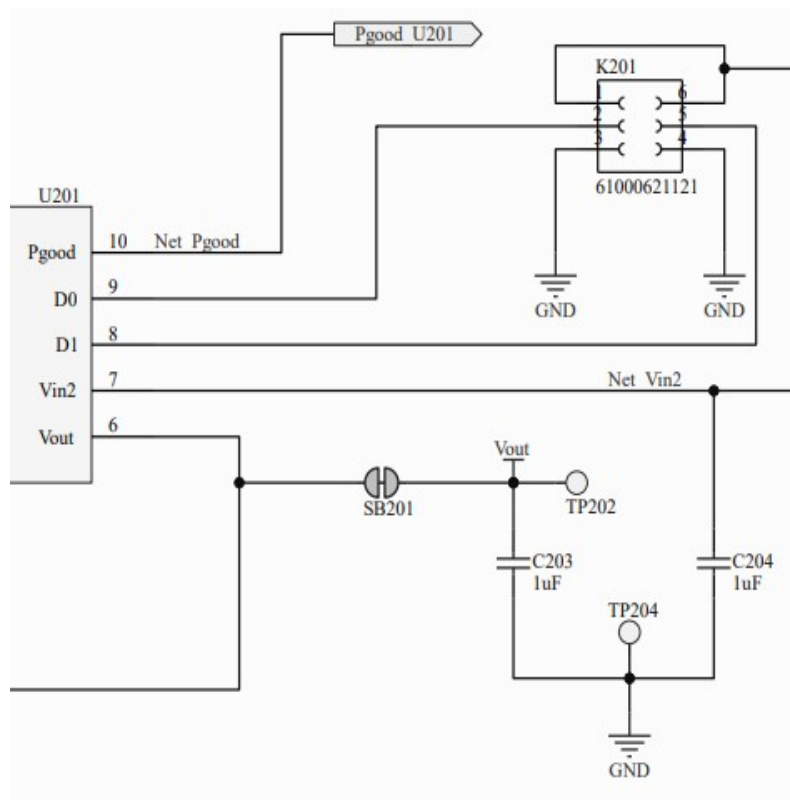


Figura 5.31. Part dreta de l'esquemàtic de LTC3588.

Comencem per les semblances amb la Figura 5.15.

Primerament s'observen dos elements passius (capacitors), el C203 i C204. Aquests són, respectivament, els components C2 i C4 de la figura esmentada anteriorment.

A més, la bobina L201 es connecta a Vout, tal i com també indica la Figura 5.15.

Un cop vistes les semblances, es farà un repàs de la resta de l'esquemàtic per poder entendre el seu funcionament en l'aplicació final.

Així doncs, es torna a comprovar l'existència d'un Test Point (TP202) connectat a la Vout del LTC3588 per poder mesurar les tensions en la fase de prova.

El Port: Pgood\_201 serveix per enviar la senyal al microcontrolador que l'energia que emmagatzema el dispositiu és llesta per a ésser usada.

Per últim tenim el connector K201. Aquests tenen la funció de connectar D0 i D1 a massa o a «estat alt» per configurar la tensió de sortida (1.8, 2.5, 3.3 ó 3.6V).

Així doncs, ja tenim tot l'esquemàtic dissenyat amb tots els seus components. A la següent figura, es mostrarà l'esquemàtic general.

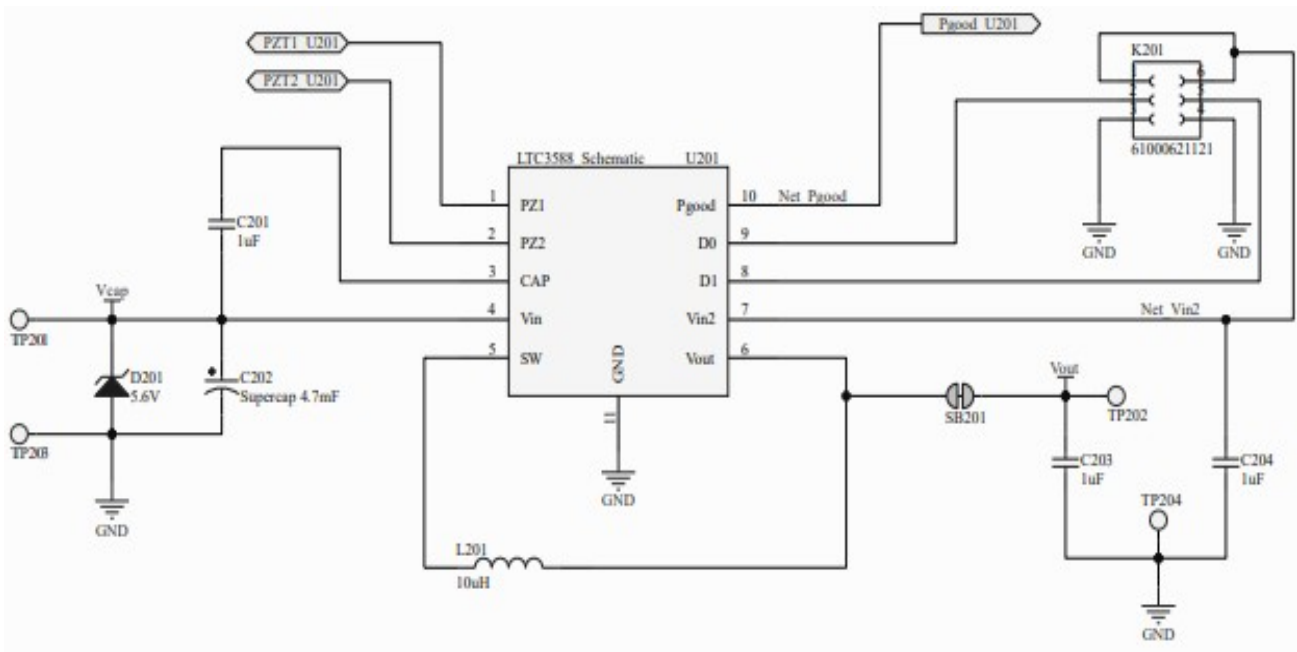


Figura 5.32. Esquemàtic general del component LTC3588.

## 5.5.6. Disseny del sensor de temperatura

### Elecció del sensor

El sensor de temperatura a usar serà el 103AT-11, sent aquest de la marca seMitec.

S'ha escollit aquest termistor AT ja que és un dispositiu de detecció tèrmica d'alta precisió amb una tolerància i una resistència de *B-value* extremadament petites.

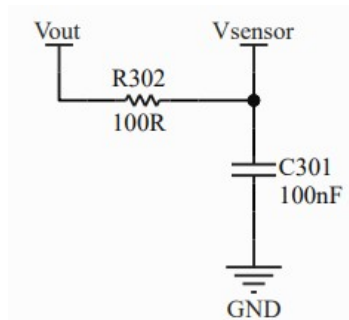
A més, quan s'utilitza com a mesurador de temperatura, el termistor AT no requereix cap ajust entre el circuit de control i el sensor.

### Disseny del sensor

Un cop escollit el sensor, es construeix l'esquemàtic corresponent (Figura 5.33).

Com en les anteriors ocasions, l'esquemàtic formal és representat en Plànols i esquemes.

a)



b)

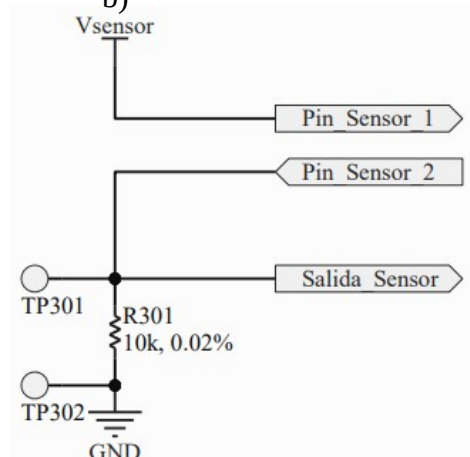


Figura 5.33. Esquemàtic del sensor. a) Separació tensions i b) Circuit divisor de tensió

En la Figura 5.33 s'observen dos circuits:

- Un separador de tensions (Figura 5.33 a) el qual serveix per aïllar si fos necessari la tensió Vsensor de la sortida Vout (d'on agafa l'energia).
- Un circuit divisor de tensions per que la sonda pugui fer la mesura de la temperatura en funció de la seva resistència (sonda NTC).

La resistència R301 serà, doncs, una resistència de precisió de com a màxim un 0.02% d'error de 10K (la sonda també és de 10K). També s'inclouran els Test Points adients per a fer una mesura externa en cas necessari.



## 5.5.7. Disseny del connector

### Disseny dels connectors

La majoria dels circuits necessiten de connexions amb l'exterior o bé interiors auxiliars per al seu correcte funcionament. I aquest, no és una excepció.

A continuació, la Figura 5.34 i la Figura 5.34 mostraran els esquemàtics dels connectors amb els quals es completarà el tots els components i circuits per poder crear la PCB del prototip.



Figura 5.34. Connectors dels circuits I. Sensor, Piezoelèctric i I/O Auxiliars.

Com es veu en la Figura 5.34, el sensor estarà connectat a través del connector J401.

També s'observa el mateix amb el piezoelèctric, el qual es connectarà a J402.

K401 serà un connector auxiliar per si s'ha d'utilitzar alguna entrada o sortida provinent del uC no contemplada prèviament. Això evitarà que si fos necessari aquest nou pin, la placa impresa sigui inservible o es modifiqui dràsticament.

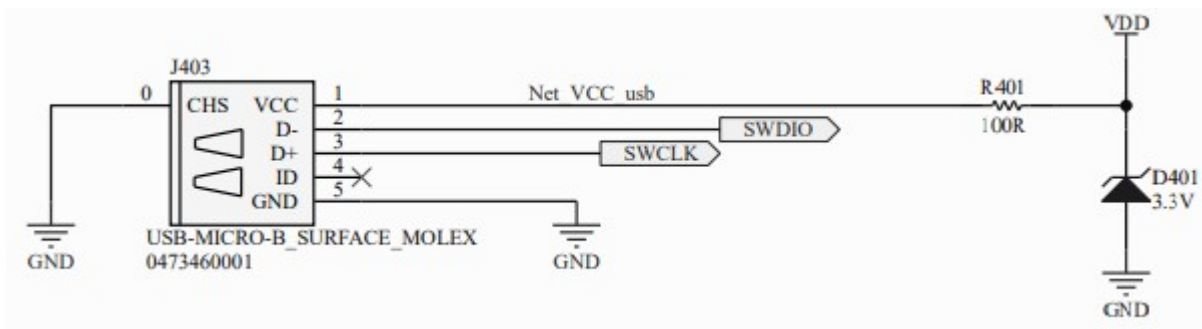


Figura 5.35. Connector USB

Per últim, serà necessari un connector USB per programar i «debuggar» el microcontrolador un cop muntada la placa.

Es connectaran els Ports: SWDIO i SWCLK per aquesta funció, a més de un sistema de protecció de corrents i tensions usant una resistència (R401) i un díode Zener de 3.3V (D401). Així ens assegurarem que si per error connectem tensions superiors al micro-USB no es farà malbé el uC.

## 5.6. Disseny i construcció de la PCB

### 5.6.1. Disseny de la PCB

Un cop creats tots els components i conformats tots els esquemàtics, es farà el disseny de la PCB.

Com es veu a la Figura 5.36, hi han quatre parts principals que conformen els esquemàtics. La PCB haurà doncs d'incorporar aquestes parts.

- 1.- Mòdul Bluetooth
- 2.- Microcontrolador
- 3.- Mòdul *Harvesting*
- 4.- Sensor
- 5.- Connector

*Nota:* El mòdul BLE i Microcontrolador s'han dividit en dos a la placa per fer més fàcil el «ruteig».

Cadascuna d'elles, idealment, ha de ocupar un espai determinat en la PCB el més compacte possible.

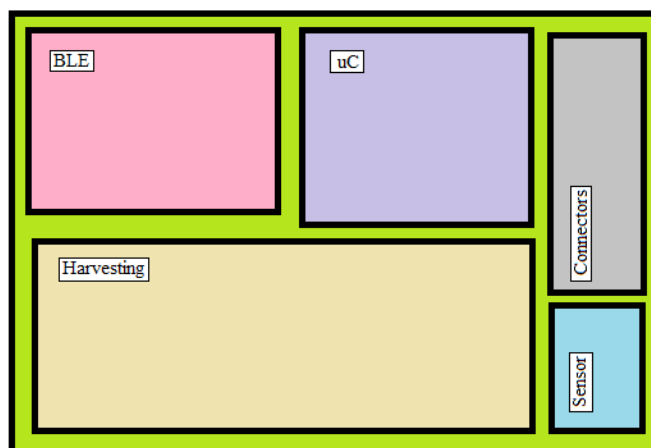


Figura 5.36. Esquema general de la disposició en la PCB

Un cop disposats els conjunts de forma coherent, es comença a «rutejar» la placa.

És important veure com la placa ha estat dissenyada només en una capa, ja que al ser impressió sobre material flexible no pot haver-hi més d'una capa.

Això comporta una sèrie de desavantatges i avantatges respecte el disseny multicapa:

La primera desavantatge és que la complexitat del «ruteig» és més elevada que en multicapa. Això és degut a que en multicapa es poden fer ponts entre capes donant així més superfície per crear pistes. La multicapa també té una avantatge considerable al reduir encreuaments entre pistes.

I la segona important és la superfície a usar és molt més extensa que en multicapa. Clarament quan el número de pistes i connexions és molt elevat, al no poder fer diferents capes, aquesta superfície creix proporcionalment.

En canvi, la electrònica impresa obté avantatges com ara la facilitat per adaptar-se al medi físic on es troba la placa. Per exemple objectes cilíndrics o irregulars.

Així doncs, es conforma la PCB amb les pistes, donant lloc a la Figura 5.37.

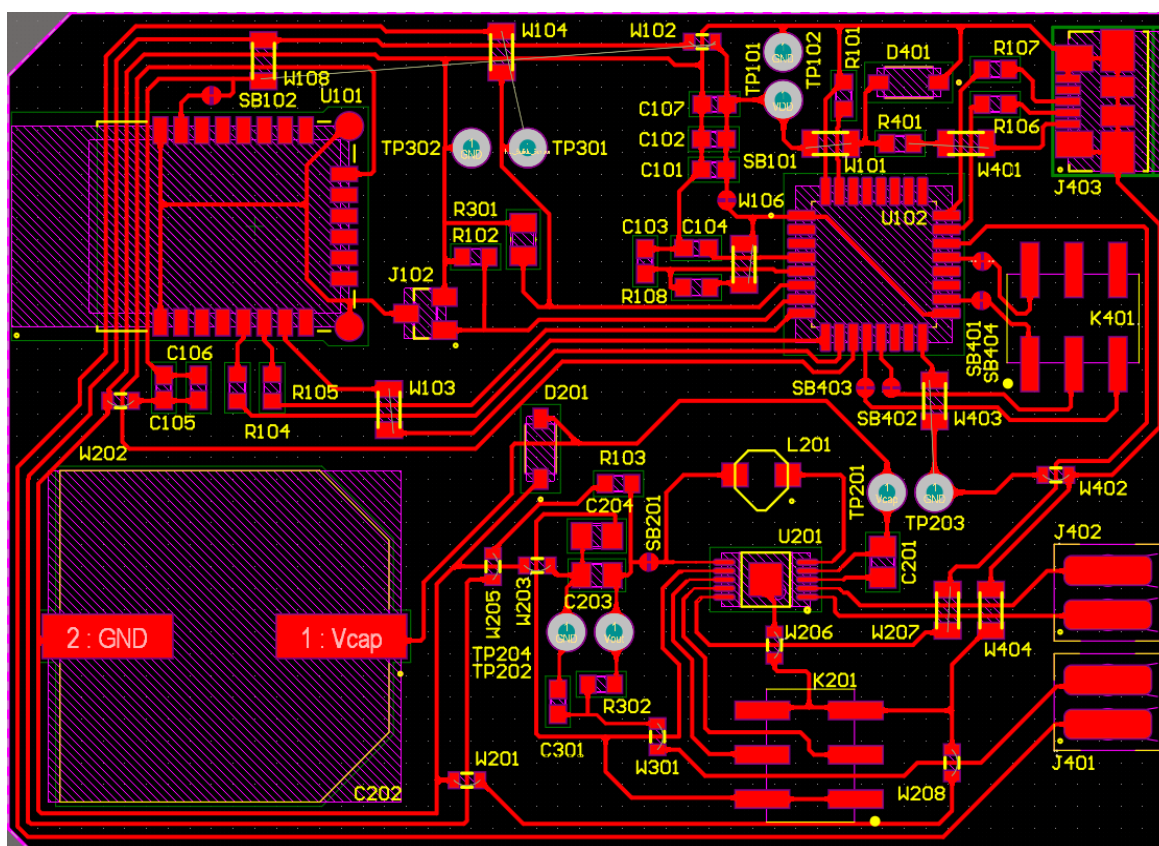


Figura 5.37. PCB «rutejada» amb tots els components incorporats

Com es pot comprovar, si es mira amb cura es veurà com la disposició feta en la Figura 5.36 es manté, si més no, en gran part.

Com s'ha esmentat anteriorment, la confecció de les rutes ha sigut més complex que el de una PCB multicapa degut a només usar la part superior. A més la seva mida, encara que no és massa gran, també és més elevada.

No obstant, finalitza el procés de creació de la PCB amb èxit.

## 5.6.2. Impressió de la PCB en Kapton

El Kapton és una poliimida molt usada en impressions en electrònica flexible.

En aquest capítol es detallarà tant el procés com el resultat final al aplicar aquest material a la impressió flexible de la PCB.

### Preparació de la impressió

Primer de tot s'han de fer una sèrie de passos per plasmar el circuit de l'Altium a un circuit imprès.

Per poder imprimir la placa es deixa el conjunt de pistes i *footprints* de la primera (i única) capa. Després es fa un plànol de masses, el qual serveix per ajudar a que la impressió surti més neta. Això és degut a que si deixéssim la placa tal i com es veu a la Figura 5.39 el Coure a eliminar durant el procés podria ser excessiu al saturar el líquid del metall (màquina de la Figura 5.39 b).

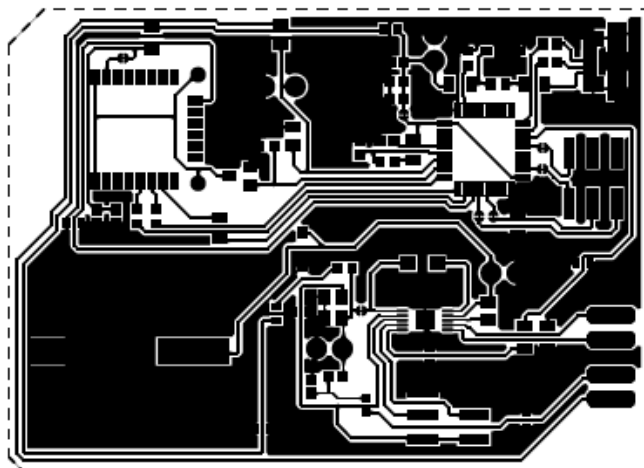
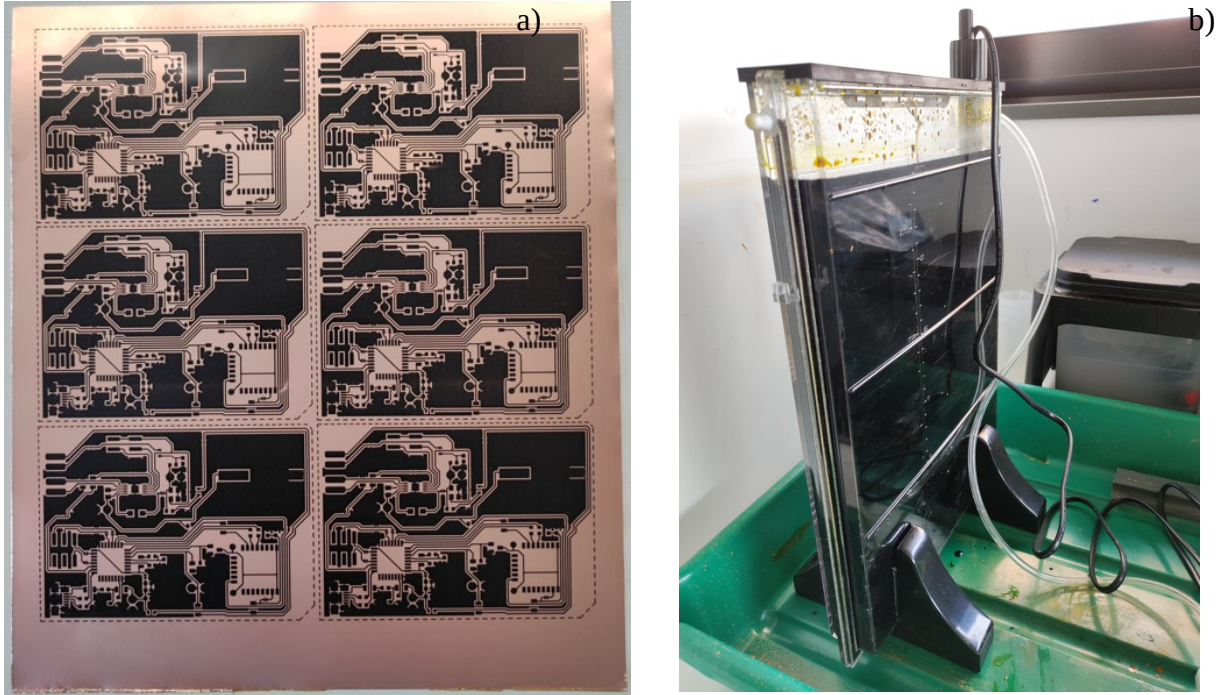


Figura 5.38. Imatge de la PCB en blanc i negre, preparada per a la impressió

A més, el Coure sobre Kapton al soldar es pot «buffar», i d'aquesta manera s'evita en certa mesura aquest problema. Un cop fet això, es trasllada mitjançant diversos programes (Gerbv i Inkscape) a una imatge en blanc i negre, com s'observa a la Figura 5.38.

## Impressió sobre Kapton

Un cop s'observa que la imatge és la adequada, es comprova sobre paper que les mides són correctes (a vegades els programes re-escalen les imatges) es passa a la làmina de Kapton amb coure (Figura 5.39 a).



*Figura 5.39. Fotografies de: a) Impressió de tinta sobre la làmina de Kapton i  
b) Màquina de revelat del Kapton*

Es comprova que un cop impreses sobre el Kapton no hi hagin porus o simplement una impressió defectuosa.

Per aconseguir millors resultats s'ha usat acetona per netejar de greix abans d'imprimir.

Així doncs, es submergeix la làmina dins la màquina (Figura 5.39 b) i s'espera entre 5 i 15 minuts per a la revelació. En aquest cas en concret, triga 7 minuts en completar el procés d'oxidació.

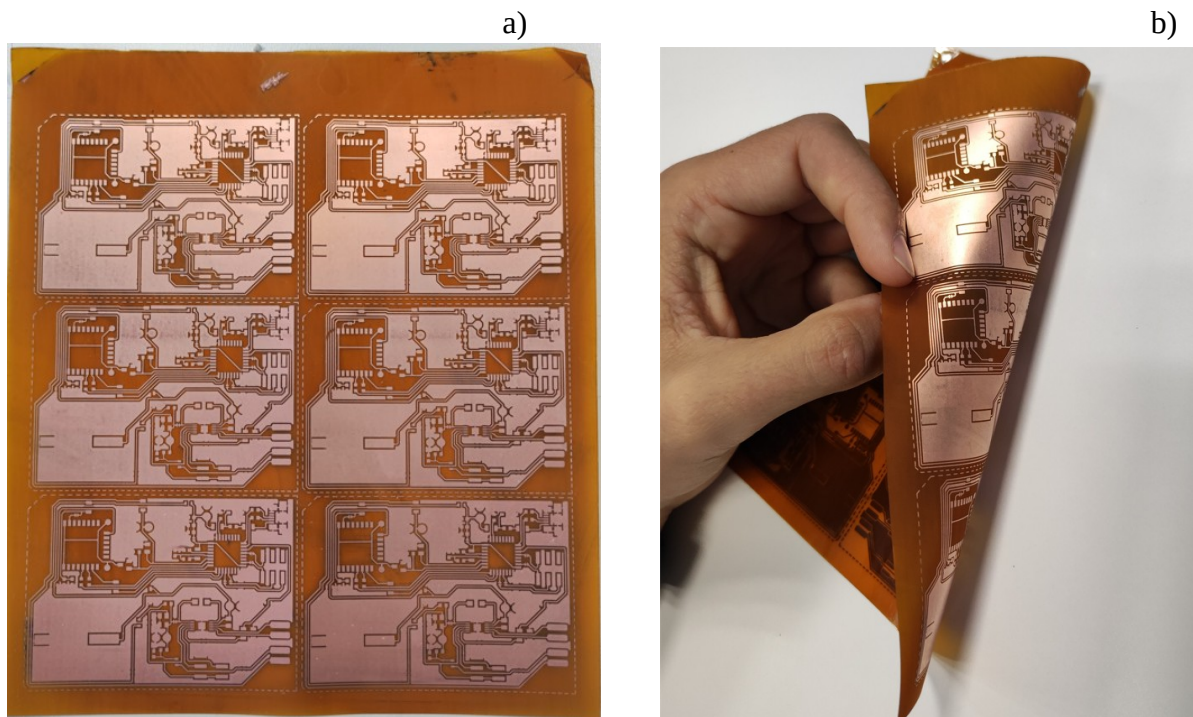
Un cop s'extreu de la màquina i es netegen amb acetona per eliminar la tinta, es comprova que les plaques hagin sortit bé.

Aquest punt és crític ja que soldar una placa que ha estat mal revelada pot comportar que o bé s'hagin de fer ponts per arreglar la placa, els quals poden donar errors més tard de connexions defectuoses. O bé retirar els components soldats i repetir el procés de soldadura amb una altra placa.

Per tant, són motius sòlids per imprimir més d'una placa a la vegada.



Com es pot comprovar en la Figura 5.40 a, en la majoria de les plaques s'obté un resultat satisfactori. No obstant, hi ha alguna on les pistes es tallen (segona fila, segona placa). Per tant aquesta placa es rebutjarà i es reciclarà el material segons el protocol d'eliminació de residus tòxics d'Eurecat.



*Figura 5.40. Fotografies de: a) Plaques impreses sobre Kapton i b) Flexibilitat del Kapton.*

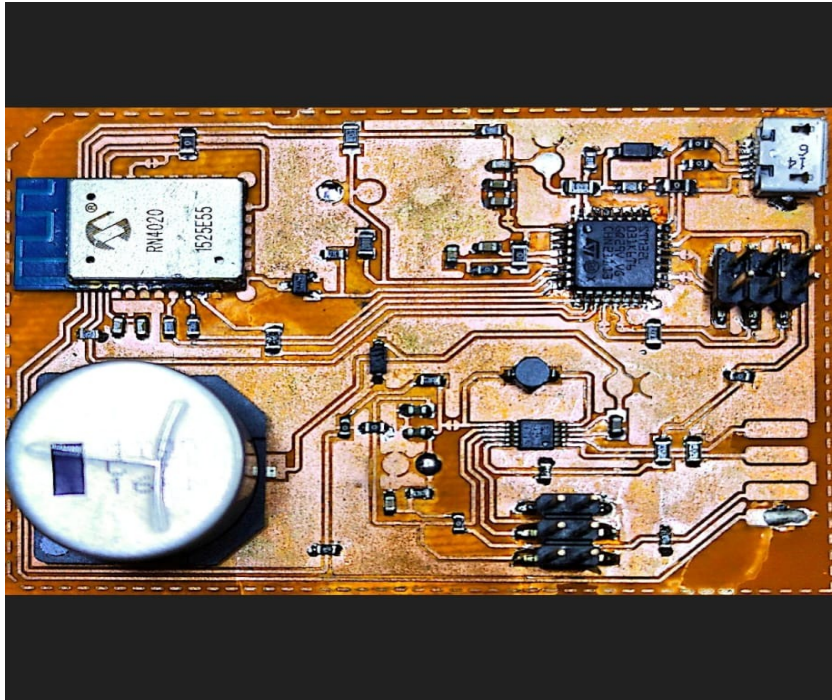
També es veu la gran flexibilitat que s'obté al imprimir la placa en material flexible (Figura 5.40 b).

Encara que quan s'incorporin els components es tornarà més rígida (els components o les pistes es poden dessoldar si no es té compte) és una placa molt més adaptable al medi físic i, per tant, més interessant per depèn quines aplicacions.

## Resultat final

Un cop es té la placa impresa, es realitza una assemblatge de les peces soldant els components que la conformen.

Primer es solden els més delicats com poden ser el uC i el LTC3588, i després la resta.



*Figura 5.41. Placa sobre Kapton acabada*

Així conclou el disseny i la construcció de la placa flexible.



## 5.7. Programació del microcontrolador

Per a programar el microxip s'usarà el software STM32CubeIDE, que és el software propietari de la marca ST.

També cal a remarcar que les proves prèvies a la posada en marxa de la placa es faràn a través del Kit de desenvolupament Nucleo-32 descrits en el capítol «5.3.1.3. Kits de desenvolupament per l'etapa de sortida».

### 5.7.1. Preparació de l'entorn de treball

Per a poder treballar amb el nostre microcontrolador, s'haurà de configurar aquest en el programari descrit anteriorment.

Així doncs, escollim el nostre uC i configurem el *pinout* descrit en el capítol «7.5.3. Disseny del Microcontrolador».

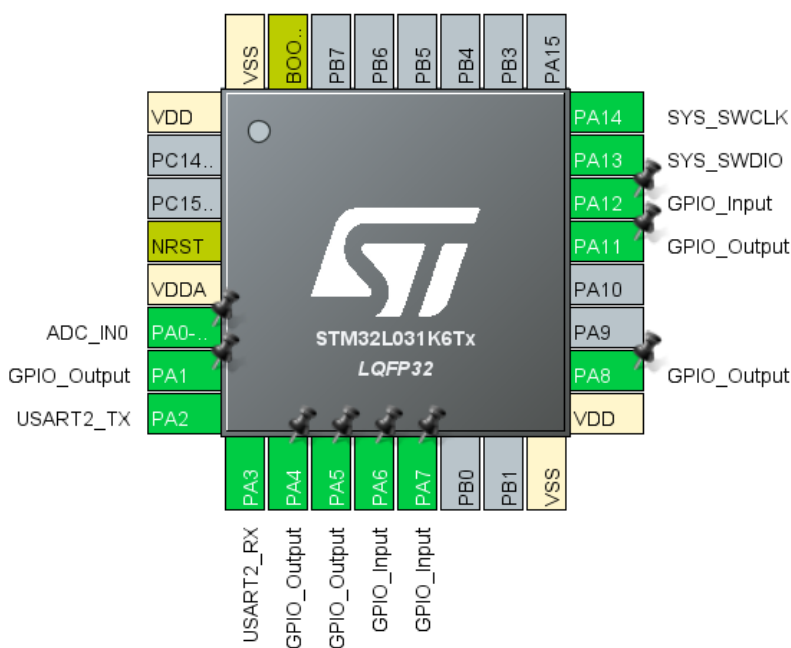


Figura 5.42. Pinout del microcontrolador

Tal i com es veu en la Figura 5.42, es fa coincidir el *pinout* per que el programa pugui córrer sense cap incidència. A més, és important ja que aquest determinarà quins pins de la placa s'usen, i per tant han de coincidir plenament amb els soldats a la placa segons el capítol «7.6. Disseny i construcció de la PCB».

## 5.7.2. Codi Font

En aquest capítol es descriurà pas per pas el codi font, amb els seus components més importants així com a les funcions usades.

No obstant, s'abstindrà d'explicar funcions secundàries, redundants o de poc interès. El codi al complet s'exposa a l'Annex II, detallant tot el codi important sense segmentar.

### Includes

Tal i com s'exposa en el següent fragment de codi, en el «main.c» s'haurà d'incloure diverses llibreries així com definir certes funcions.

```
/* USER CODE END Header */
/* Includes -----*/
#include "main.h"

/* Private includes -----*/
/* USER CODE BEGIN Includes */
#include "ntc_B3435.h"
#include "stdio.h"
#define VALUE_ADC_WITH_10K_CALIBRATED 529
#define VALUE_ADC_10K_DIVISOR 512
/* USER CODE END Includes */
```

La llibreria «ntc\_B3435.h» serveix per transformar un valor ADC en temperatura, seguint una sèrie de passos els quals es descriuran més endavant.

En canvi, la llibreria «stdio.h» serveix per poder usar algunes funcions (com ara el printf) molt útils a l'hora de «debuggar».

També s'hauran de definir les funcions VALUE\_ADC\_WITH\_10K\_CALIBRATED 529 i VALUE\_ADC\_10K\_DIVISOR 512. Aquestes serviran també per transformar el valor de l'ADC del sistema en una temperatura.

### Inicialitzacions

Un cop tenim les llibreries carregades, s'haurà d'inicialitzar els perifèrics de la placa.

```
/* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the Systick. */
HAL_Init();
/* Configure the system clock */
SystemClock_Config();
/* Initialize all configured peripherals */
MX_GPIO_Init();
MX_USART2_UART_Init();
MX_TIM2_Init();
MX_ADC_Init();

/*##-1- Start the TIM Base generation in interrupt mode #####*/
```

```
HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim2);
```

Així doncs, i un cop s'inicialitza la placa, es passa al codi principal del main, el «loop».

## Loop

El «loop» és la part més important del codi, ja que serà l'encarregat d'executar el programa.

Així doncs, es desenvolupa el següent codi:

```
/* USER CODE BEGIN 3 */
HAL_ADC_Start(&hadc);
HAL_ADC_PollForConversion(&hadc, HAL_MAX_DELAY);

uint32_t value = HAL_ADC_GetValue(&hadc);
HAL_ADC_Stop(&hadc);

int8_t temperatureDegreeC = 0;
uint32_t measuredLevel = 0;

measuredLevel = value;

/*Convert ADC data to temperature using table*/
if((measuredLevel > 0) && (measuredLevel < 1024))
{
// Calibracion de ADC conociendo el valor de ADC con una resistencia de calibracion
// 10K +-0.02%
measuredLevel += VALUE_ADC_10K_DIVISOR - VALUE_ADC_WITH_10K_CALIBRATED;
int16_t temp100 = NTC_TEMP_3435[measuredLevel];

temperatureDegreeC = temp100;
}

//
uint8_t Test[] = "Hello World !!!\r\n"; //Data to send

HAL_UART_Transmit(&huart2, temperatureDegreeC, sizeof(temperatureDegreeC), 10);
PWR_EnterStopMode();
```

La primera part consta de l'ADC, necessari per captar la temperatura del sensor i transformar-la en bits. Per tant, amb les funcions HAL\_ADC\_Start(&hadc) i HAL\_ADC\_PollForConversion(&hadc, HAL\_MAX\_DELAY) s'inicia la lectura de la tensió a través de l'ADC per transformar-la en temperatura.

Tot seguit, usem HAL\_ADC\_GetValue(&hadc) i HAL\_ADC\_Stop(&hadc) per capturar el valor i parar aquesta conversió.

Un cop capturat aquest valor, aquest haurà d'ésser un número entre 1 i 1023, ja que la conversió es fa a través d'un ADC de 10 bits, per tant  $2^{10} = 1024$  bits.

Aquest és un punt crític, ja que designarà la posició de la taula que dirà quina és la temperatura donada pel sensor.

No obstant, la mesura feta per l'ADC pot no estar alineada amb la real, ja que encara que la resistència del divisor de tensió sigui de precisió, hi pot haver variacions en la diferència de resistivitats d'aquesta i la pròpia sonda a 25°C.

Per tant, es calibra la sonda a 25°C adquirint el senyal per l'ADC en les condicions inicials. Així doncs, es veu que hi ha un *offset* entre els bits desitjats (512 bits) i els reals (661 bits). Per tant, s'elimina aquest valor no desitjat i es calibra de la forma:

```
measuredLevel += VALUE_ADC_10K_DIVISOR - VALUE_ADC_WITH_10K_CALIBRATED;
```

Tot seguit, es busca en la taula el valor desitjat, que serà la temperatura expressada en °C\*100.

```
int16_t temp100 = NTC_TEMP_3435[measuredLevel];  
temperatureDegreeC = temp100;
```

Així doncs, es queda guardat en la variable `temperatureDegreeC` el valor de temperatura desitjat, llest per enviar la informació al mòdul BLE.

### Funció de la taula de conversió

En aquesta funció, depenent de la posició donada per l'ADC, anirà a una posició o altra de la taula.

Com ja s'ha mencionat anteriorment, tota la taula estarà en l'Annex II, però es fa un recull d'alguns valors en el fragment de programa descrit a continuació

```
#ifndef NTC_TEMP_3435_H  
#define NTC_TEMP_3435_H  
//NTC BETA=3435.000000 ADC 10bits Divisor de tensió compensat R=R0  
(valors=100*temperatura)  
const short NTC_TEMP_3435[1024]=  
{  
0, 32767, ... 30128, 28053, 26464, 25189, ... 2500, 2489, 2479, ... -7970, -8698,  
};  
#endif
```

Si ens fixem, la posició central la ocupa el número 2500, el qual correspon a la temperatura 25.00°C. Aquesta és la posició de referència amb la qual la sonda calibrada parteix dels 10Kohm de resistència.

En aquesta taula hi hauran 1024 posicions corresponent als 1024 bits possibles amb la conversió ADC.

La taula, doncs, es configura de la següent manera:

El valor " $\beta$ " d'un termistor, o valor beta, és un paràmetre de la forma de la corba característica que representa la relació entre la resistència i la temperatura d'un sensor NTC. Aquest càlcul del valor beta és important en el procés de selecció de la sonda, ja que aquest dóna una resistència determinada a una certa per a una aplicació específica.

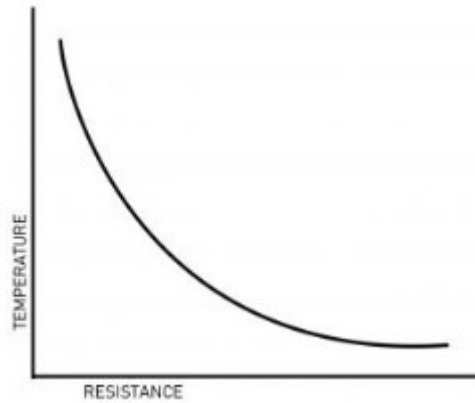


Figura 5.43. Curva característica de les sondes NTC [xMACH]

Els termistors NTC són resistències no lineals que alteren les seves característiques de resistència amb la temperatura. Aquests, a mesura que augmenta la temperatura, la resistència del sensor disminueix. La manera en què la resistència d'un termistor disminueix està relacionada amb una constant coneguda a la indústria del termistor com a beta ( $\beta$ ).

La beta es mesura en graus Kelvin (K) i es calcula a partir de la formulació (7.1) que es mostra a continuació.

$$1/T_2 = 1/T_1 - 1/(\beta * \ln(R_1/R)) \quad (7.1)$$

En el nostre cas, la  $\beta$  és coneguda. El que es desconeix és la temperatura ( $T_2$ ). Sabent que:

$$T_1 = 298,15 \text{ Kelvin}$$

$$\beta = 3435$$

$$3,3V = I * (10 \text{ Kohm} + R) \rightarrow V/3,3 = R/(R + R_1) \quad (7.2)$$

Com s'ha esmentat anteriorment, amb 10 bits podem tenir fins a 1024 posicions. Per tant:

$$V/3,3 = ADC/1024 = R/(R + R_1) = 1/(1 + R_1/R) = (R/R_1)/(R/R_1 + 1) \quad (7.3)$$

Arribem a la conclusió que:

$$K = R_1/R \rightarrow q = ADC/1024 = 1/(1 + K) \rightarrow K = 1024/(ADC - 1) \quad (7.4)$$

I per tant, el codi per a poder fer la taula segons l'ADC quedarà en:

```

double Temperatura(short adc)
{
    double t;
    t=1.0/R0-log(1024.0/(double)adc-1.0)/BETA;
    t=1.0/t;
    return t-273.15;
}

```

Aquest codi també és a l'annex corresponent (Annex II).

Per tant ja és configurada la taula per trobar els valors que l'ADC capti de la sonda de temperatura.

### Enviament de dades mitjançant USART

Per últim, només queda enviar aquest valor per USART al mòdul BLE.

Per aquesta finalitat, es disposa de la funció `HAL_UART_Transmit(&huart2, temperatureDegreeC, sizeof(temperatureDegreeC), 10);` que mitjançant els pins PA2 i PA3 enviarà la dada recollida per l'ADC i transformada en temperatura.

La funció `PWR_EnterStopMode()` actua de manera que un cop envii per USART la informació el uC entri en mode STOP, fent que el seu consum baixi de forma dràstica mentre el BLE envia la informació.

No obstant, per poder configurar el mòdul BLE abans de l'enviament, se sap que és necessari enviar mitjançant aquesta mateixa USART els codis AT que el facin funcionar.

Aquests codis queden recollits (en part) en el manual d'usuari del mòdul RN4020 [95].

Per exemple, abans de les dades s'haurà d'enviar el codi AT «SF,1» amb el qual es fa un *reset* del mòdul.

Després el codi «SR,00000000» configura el mòdul com a perifèric, i no pas com a central. Això és degut a que el comandament el fa el uC i no el mòdul BLE.

Però en les proves inicials, les comunicacions es fan via USART i no faran falta.

## 6. Realització de proves i resultats finals

En aquest capítol s'inclou totes les proves realitzades per tal de que la placa funcioni.

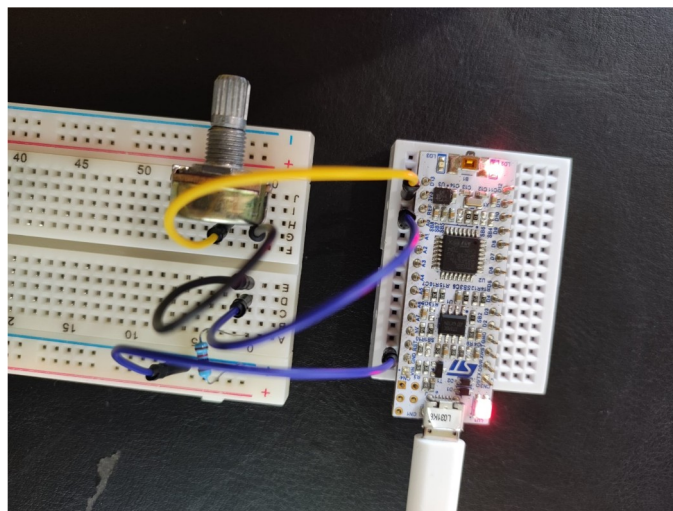
Així doncs, s'han classificat les proves per tipus:

Les proves sobre Kits de desenvolupament, llargament descrits en el capítol «5.3.1.1. Definició dels *Kits* de desenvolupament» i les que es fan sobre la mateixa placa, un cop en les primeres s'obté un resultat satisfactori.

### 6.1. Prova del programa sobre el Kit Nucleo-32

Per a realitzar aquesta prova serà necessari simplement el programari de STM, així com el programa a implementar i certes tensions que faran de prova per al sensor de temperatura.

Es munta doncs, el circuit de la Figura 6.1.



*Figura 6.1. Nucleo-32 connectat amb un potenciòmetre*

Aquest circuit consta de:

- Potenciòmetre 10K (Simulant la sonda de temperatura)
- Resistència 10K
- Nucleo-32 amb el xip STM32L031

Així doncs, distingirem tres proves fonamentals. La primera d'elles l'adquisició per part de l'ADC del microxip. La segona del tractament d'aquestes dades, trobant la temperatura i per últim l'enviament mitjançant UART de les dades.

### Adquisició de dades per l'ADC

S'executarà, pas per pas per «debuggar», totes les inicialitzacions del sistema.

El potenciòmetre es trobarà com si la temperatura es trobés a 25°C, és a dir, 10Kohm. Com es pot comprovar a la Figura 6.2, la tensió en bornes de l'ADC és igual a 1,65V.

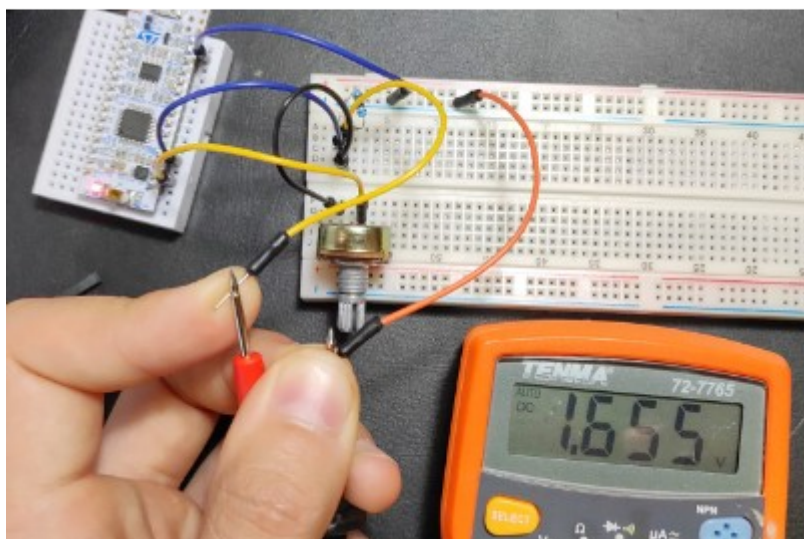


Figura 6.2. Potenciòmetre a 10Kohm, donant 1,65V de tensió a l'ADC.

A continuació, s'iniciarà l'ADC i es farà la lectura del valor. Aquesta lectura quedarà reflectada en la variable valor. Més endavant, es traspasarà a la variable measuredLevel, com es pot veure en la següent figura (Figura 6.3).

Name	Type	Value
temp100	int8_t	0 '\0'
value	uint32_t	533
a	char *	0x8003940 "1234"
Test	uint8_t [13]	0x20001fd0
temperatureDegreeC	int16_t	0
measuredLevel	uint32_t	533

Figura 6.3. Taula de valors amb tensió de 1.65V



Com s'observa, el valor mig que hauria de detectar l'ADC durant la conversió és d'aproximadament 512 bits. El resultat obtingut és relativament proper, però es creu que existeix un *offset* en l'ADC que forma un error estàtic.

Per comprovar-ho, es fa la mateixa prova tot connectant el pin A0 (pin de l'ADC) a massa, observant el següent resultat:

Name	Type	Value
value	uint32_t	18

Figura 6.4. Offset observat en l'ADC

Com es preveia, existeix un petit *offset* que dona a error en la mesura. Si aquesta es vol fer de precisió, s'ha de corregir.

No obstant, abans de procedir a corregir aquest error de mesura, es comprova fins a tres cops més que connectant l'ADC a les diferents masses, dona de valor value = 18. Com sí és així, es col·loca la variable VALUE\_ADC\_WITH\_10K\_CALIBRATED 529 ja descrita en el capítol «5.7.2. Codi Font».

### Tractament de les dades

Un cop tenim les dades desitjades transformades a bits, és hora de traspasar-ho a temperatura. Així doncs, es comprova que el codi que conforma aquesta part sigui correcte.

La primera prova que es realitza és també amb una tensió de 1.65V.

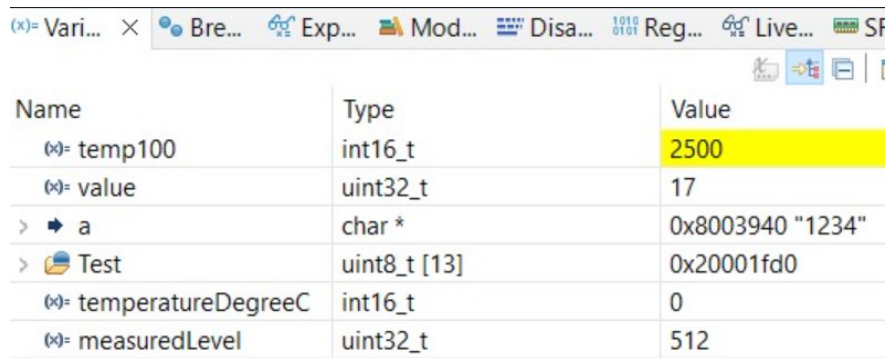
Així doncs, en la primera prova que es fa es detecta que els valors que dona la taula no són els correctes, segons es pot comprovar en la següent figura (Figura 6.4):

Name	Type	Value
temp100	int8_t	-60 'Ä'
value	uint32_t	18
a	char *	0x8003944 "1234"
Test	uint8_t [13]	0x20001fd0
temperatureDegreeC	int16_t	0
measuredLevel	uint32_t	512

Figura 6.5. Error en la variable temp100

Al final s'observa que la declaració d'una de les variables no era l'adequada sent aquesta `int8_t temp100`. Com es pot comprovar, la funció creada per la taula retorna un valor enter, però de 16 bits. És a dir, és necessari un `int16_t` i no pas un `int8_t` per poder obtenir un retorn de funció vàlid.

Per tant, i canviant aquest petit error, es torna a fer la comprovació:



The screenshot shows a debugger window with a table of variables. The table has three columns: Name, Type, and Value. The variable 'temp100' is highlighted in yellow, showing a value of 2500. Other variables include 'value' (17), 'a' (0x8003940 "1234"), 'Test' (0x20001fd0), 'temperatureDegreeC' (0), and 'measuredLevel' (512).

Name	Type	Value
temp100	int16_t	2500
value	uint32_t	17
a	char *	0x8003940 "1234"
Test	uint8_t [13]	0x20001fd0
temperatureDegreeC	int16_t	0
measuredLevel	uint32_t	512

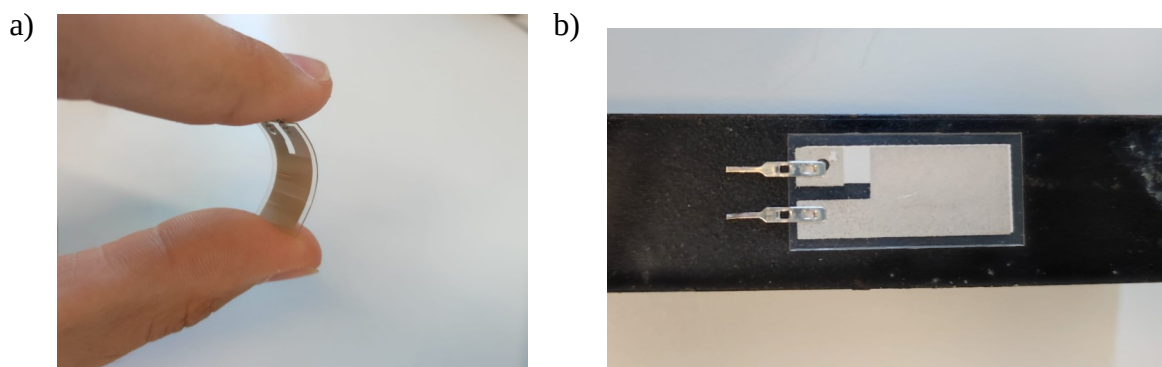
*Figura 6.6. Lectura correcta del potenciómetre a 1.65V*

Com també es comprova, no només el retorn de la funció ens dona un valor consistent, si no que al arribar a la taula una valor de 512 (25°C donats pel potenciómetre) retorna el valor de temperatura correcte.

Per tant, es posa de manifest que funciona tant la lectura de valors, com la creació de la taula són correctes.

## 6.2. Caracterització del piezoelèctric flexible com a generador d'energia

Per poder fer les proves adients sobre el piezoelèctric flexible (Figura 6.7), primer s'ha de caracteritzar per veure quina és la potència que genera, s'extraiu i s'emmagatzema.

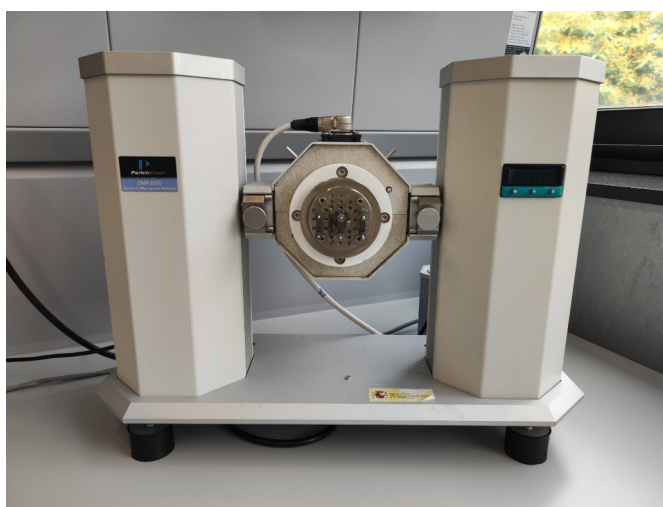


*Figura 6.7. Imatges del piezoelèctric imprès en PVF2 a) curvat i b) en plà*

S'ha escollit el piezoelèctric FS-2513P per les seves característiques de transformació d'energia mecànica a elèctrica. És construït sobre una capa prima de PVDF amb gran capacitat de flexió. Encara que la seva freqüència de ressonància sigui de 80Hz, com es demostrarà més endavant mitjançant l'experimentació s'aconsegueix una màxima potència al voltant dels 50-60Hz.

Així doncs, primerament es prova en la màquina DMA (Figura 6.8). Aquesta màquina consta d'un eix rotatori que fa oscil·lar unes platines on s'introdueix el piezoelèctric.

Aquesta màquina s'ha fet servir amb anterioritat per Eurecat al provar els piezoelèctrics construïts per ells mateixos.



*Figura 6.8. Màquina per a proves DMA.*

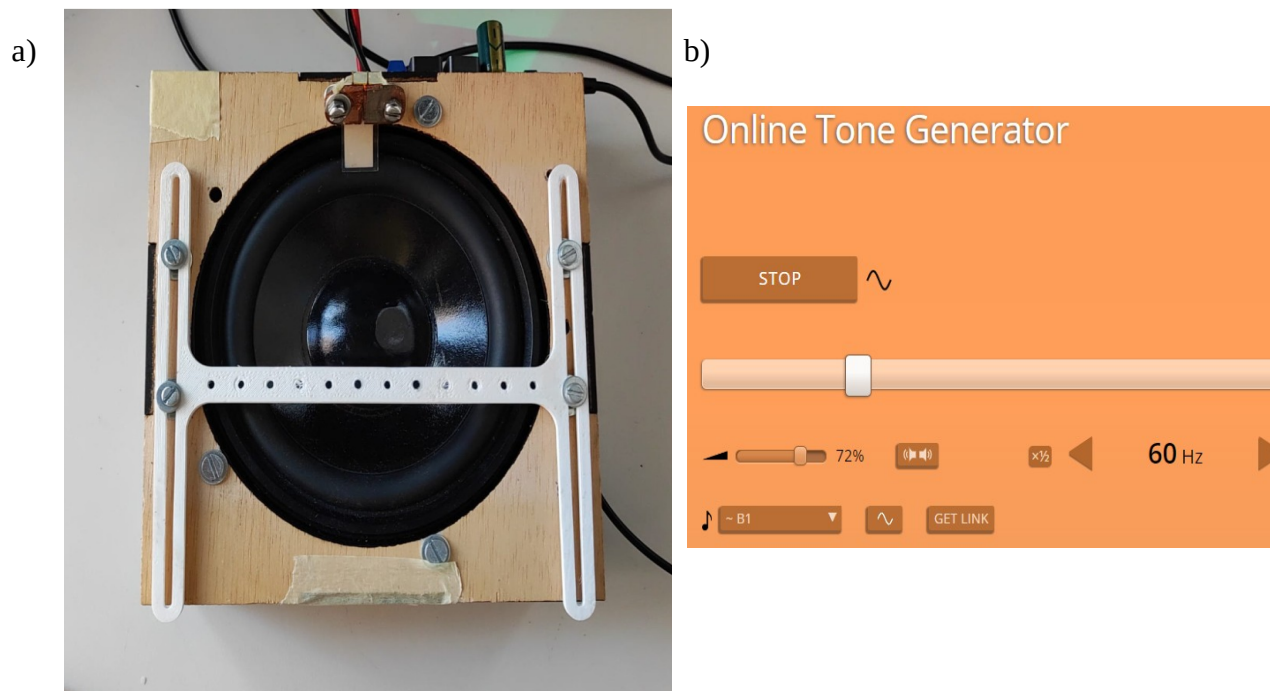
No obstant, al introduir el piezoelèctric comercial es veu que no funciona correctament al ésser una freqüència massa baixa d'oscil·lació. A més, l'amplitud d'aquesta també és massa baixa, per tant el piezoelèctric no pot obtenir suficient tensió i corrent per a fer funcionar el sistema.

Així doncs, es busca un sistema alternatiu d'oscil·lació: un Altaveu.

Com es pot veure a la Figura 6.9, el sistema consta de dos components principals:

Primerament l'altaveu pròpiament dit, fent possible les oscil·lacions a través de la seva membrana.

El segon és la pàgina web que fa possible la vibració a una freqüència i potència constant.



*Figura 6.9. Imatge de: a) l'altaveu usat a les proves i b) Tone Generator*

Així doncs, es fan les proves per a la caracterització del dispositiu piezoelèctric com a generador d'energia.

A la taula següent (Taula 6.1) es mostren els resultats obtinguts.

A volum (sonoritat) constant.

Tipus d'ona	Freqüència [Hz]	Tensió [V]	Intensitat [uA]
Quadrada	20	12,97	2,7
	40	16,42	3,7
	60	16,08	4,4
	80	9,26	3,3
Sinusoidal	20	12,68	2,1
	40	18,52	4,1
	60	17,9	5,3
	80	9,25	3,6
Triangular	20	12,4	1,5
	40	17,47	3,9
	60	17,45	5,2
	80	9,2	3,6

Taula 6.1. Caracterització del piezoelèctric com a generador d'energia

Així doncs, es formen les Figures 6.10 i 6.11, on mostren clarament els resultats de l'experiment.

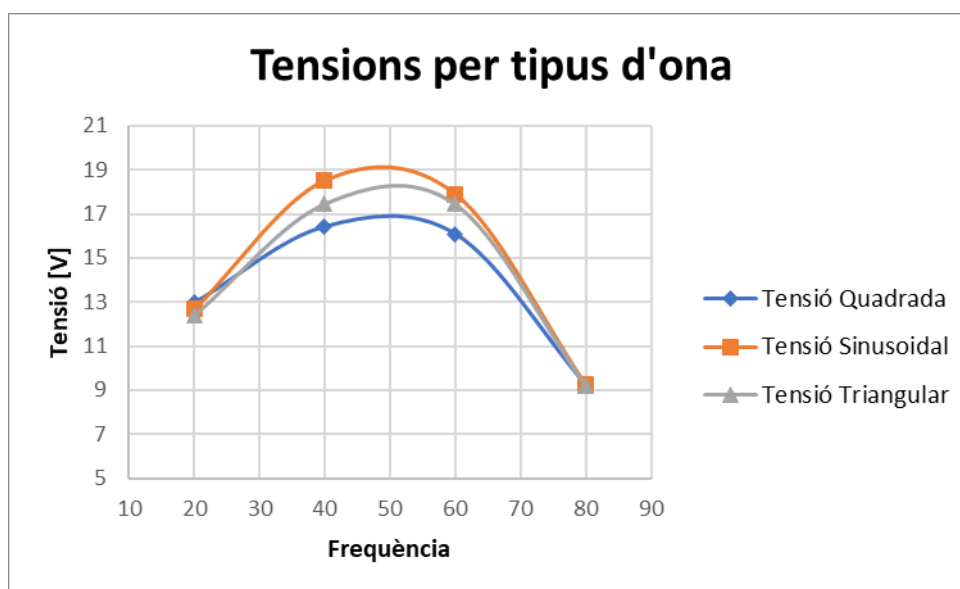


Figura 6.10. Tensions de sortida per tipus d'ona

Com es veu a la figura anterior (Figura 6.10), es comprova com la tensió de sortida no només depèn de la freqüència a la que oscil·li el piezoelèctric, sinó que també depèn de la forma

d'ona. Això és degut a que, tal i com s'explica al capítol «3.2.4.4. Modelització i parametrització d'un piezoelèctric», la generació d'energia està estretament relacionada amb l'acceleració.

Cada forma d'ona representa un moviment oscil·latori diferent, i com a tal, un moviment mecànic diferenciat.

La següent figura (Figura 6.11) mostra les intensitats obtingudes per a les diferents freqüències, podent així fer una visió general dels resultats.

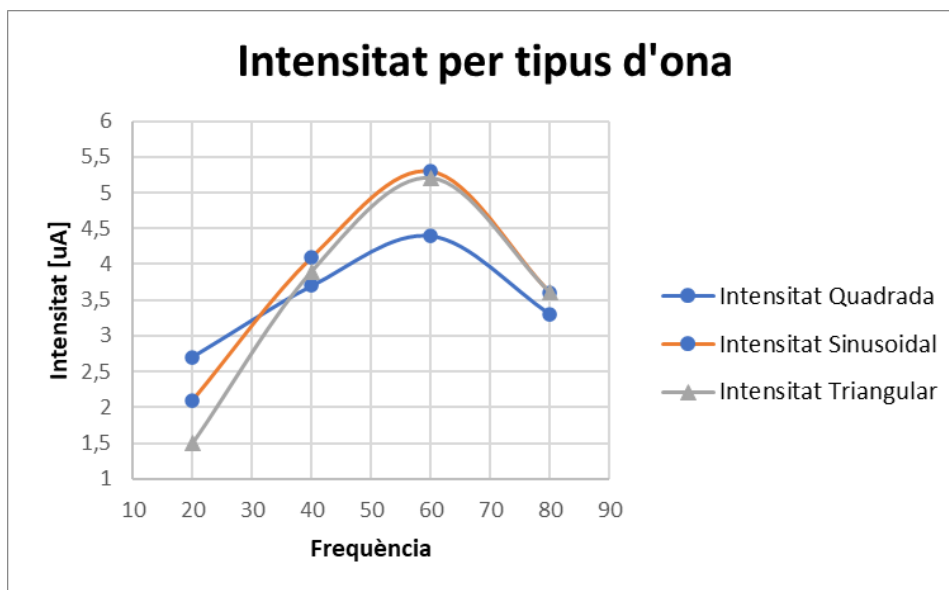


Figura 6.11. Intensitat de sortida per tipus d'ona

I a la vista dels resultats, es poden fer les següents afirmacions:

- La màxima potència generada pel dispositiu piezoelèctric es concentra en les freqüències al voltant dels 50 – 60Hz.
- L'ona quadrada només és rellevant si es treballa a freqüències baixes. La triangular i la sinusoidal són molt semblants en la majoria de freqüències.
- Donat que la tensió no és important (respectant mínims i màxims) en la recollida d'energia, i centrant l'atenció en la intensitat, l'ona sinusoidal a 60Hz és la més adequada per realitzar les proves.

### 6.3. Prova del mòdul *harvesting* sobre el Kit LTC3588EMSE-1

Com en el capítol anterior, primerament es prova el sistema *harvesting* sobre el Kit de desenvolupament.

#### Experiment 1

Així doncs, es comença la prova amb el Kit de desenvolupament per a la càrrega i la descàrrega del condensador a través del piezo.

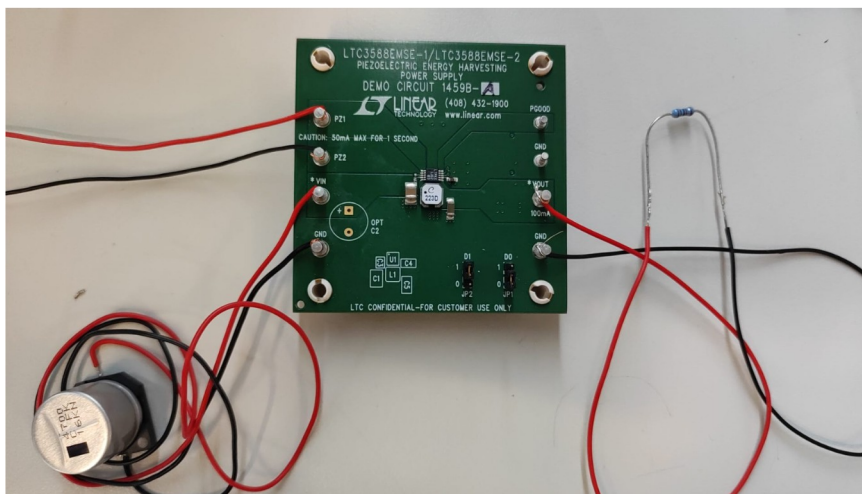


Figura 6.12. Imatge del Kit en proves

Es connecta el Kit com a la Figura 5.32, fent de càrrega en aquest cas una resistència de 10Kohm.

A la següent taula es descriu el comportament del Kit en front a l'energia generada per un piezoelèctric flexible. Les proves es fan amb els valors:

Cap: 4,7mF  
 $V_{\text{PIEZO}}$ : 18,74V  
 $I_{\text{PIEZO}}$ : 5,2uA

Temps [h]	Tensió [V]
11:57	0,056
12:02	0,216
12:07	0,565
12:11	0,745
12:16	0,94
12:24	1,256

	12:33	1,555
	12:44	1,978
	12:51	2,235
	13:00	2,61
	13:12	3,066
	13:17	3,23
	13:27	3,6
	13:37	3,904
	13:50	4,27
	13:57	4,35
	14:08	4,549
	14:18	4,722
	14:22	4,8
	14:28	4,904
	14:39	5,103
	14:42	5,226
<b>Descàrrega 1,</b>	<b>14:43</b>	<b>3,766</b>
	9:29	3,766
	9:35	3,903
	9:44	4,129
	9:55	4,29
	10:04	4,498
	10:15	4,667
	10:25	4,802
	10:37	5,051
	10:45	5,146
	10:47	5,204
<b>Descàrrega 2,</b>	<b>10:48</b>	<b>3,806</b>
	10:58	4,021

*Taula 6.2. Resultats experiment 1.*

Per tant, es conforma la Figura 6.13, on es veu clarament el comportament de càrrega-descàrrega del condensador.



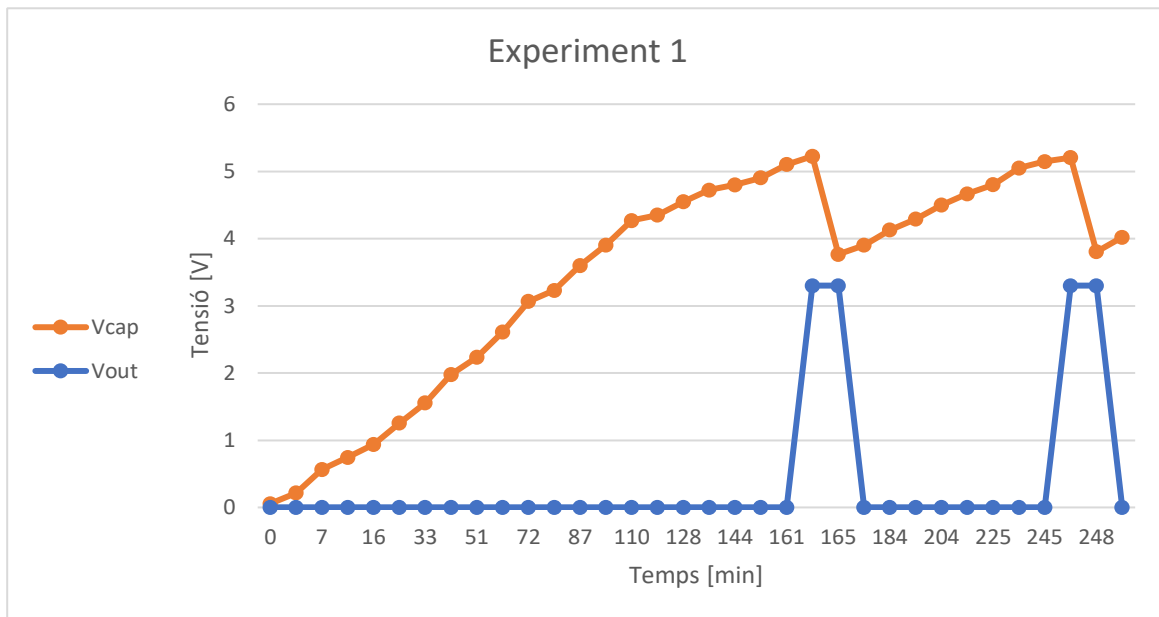


Figura 6.13. Gràfica càrrega-descarrega del condensador (experiment 1)

I clarament es veu un comportament correcte, aconseguint aproximadament una càrrega lineal i una descàrrega posterior. També es poden veure els cicles entre descàrregues.

Fent una comparació amb les simulacions (Figura 5.16), s'havien obtingut uns cicles de  $t_{inici} = 36s$  i  $t_{cicle} = 9,3s$ . Cal recordar que es van fer amb una corrent de  $1000\mu A$ . Al estar aplicant una corrent molt més petita, els temps s'allarguen proporcionalment.

Per tant, i vista la Figura 6.13, es determinen  $t_{inici} = 9840s$  (164 minuts) i  $t_{cicle} = 4740s$  (79 minuts).

A simple vista, i amb un càlcul bàsic:

$$\frac{36s}{\frac{1}{1000}\mu A} = \frac{x}{\left(\frac{1}{5}\right)\mu A} = 7200s (120 minuts) \quad (6.1)$$

*Nota:* Els temps estan invertits ja que a menys intensitat més temps, i no viceversa.

Per tant, teòricament hauria de carregar-se en 7200s. Comparant amb la Figura 6.13, això resta un error del 26%.

Encara que sigui un error gran, això es pot donar per motius externs al propi Kit. El principal factor és el propi piezoelèctric. Al ésser un component real vibrant, no s'aconsegueix una ona sinusoidal perfecte. A més, existeixen rebots mecànics. Per tant, la corrent (i la tensió) generada pel dispositiu, tot i ser força constant, segueix tenint daltabaixos.

Però al final, s'aconsegueix un comportament completament equiparable al de les simulacions. I per tant, és donat per bo el muntatge sobre el Kit de desenvolupament LTC3588EMSE-1.

## 6.4. Prova del comportament *harvesting* sobre la placa

Un cop fetes les proves sobre el Kit, és hora de passar a provar la capacitat *harvesting* de la placa.

### Experiment 2

Per tant, es realitza el mateix muntatge que amb el Kit però connectant la placa impresa sobre Kapton, com es pot veure en la següent figura (Figura 6.14):

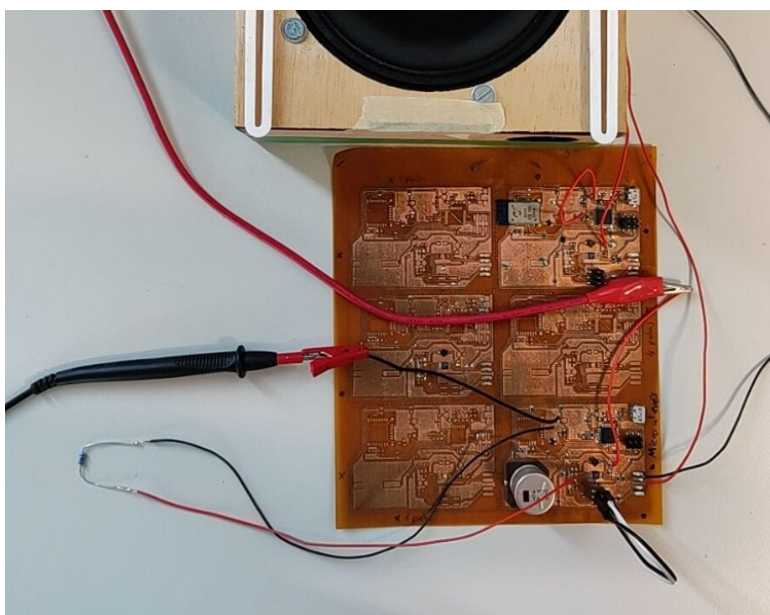


Figura 6.14. Placa connectada a l'altaveu.

Per poder fer un assaig amb garanties, es desconnecten els ponts que la connecten tant al mòdul BLE com al Microprocessador. Així s'assegura una minimització de les possibles fugues de corrent, i s'acoten els possibles errors (en aquest cas, incús es prova en la segona placa que no està muntat el BLE)

Els principals valors característics de les proves en aquest cas són:

Cap: 4,7mF  
 $V_{PIEZO}$ : 18,12V  
 $I_{PIEZO}$ : 5uA

Temps [h]	Tensió [V]
12:35	0,065
12:42	0,622
12:55	1,165
13:05	1,579

	13:15	1,9
	13:20	1,988
	13:30	1,988
	13:36	2,185
	13:45	2,48
	13:55	2,791
	9.34	2,791
	9.46	3,075
	9.55	3,33
	10:05	3,589
	10:12	3,75
	10:22	3,979
	10:32	4,218
	10:42	4,422
	10:52	4,58
	11:05	4,81
	11:15	5,062
<b>Descàrrega 1,</b>	<b>11:23</b>	<b>5,235</b>
	11:24	3,802
	11:34	4,012
	11:44	4,23
	11:50	4,35
	11:59	4,552
<b>Descàrrega 2,</b>	<b>12:10</b>	<b>4,886</b>
	12:11	4,5667
	12:05	4,738
<b>Descàrrega 3,</b>	<b>12:14</b>	<b>4,879</b>
	12:15	4,522
	12:25	4,73
<b>Descàrrega 4,</b>	<b>12:29</b>	<b>4,869</b>
	12:30	4,498
	12:35	4,665

*Taula 6.3. Resultats experiment 2*

Un cop obtenim la taula, formem el gràfic representat en la Figura 6.15.

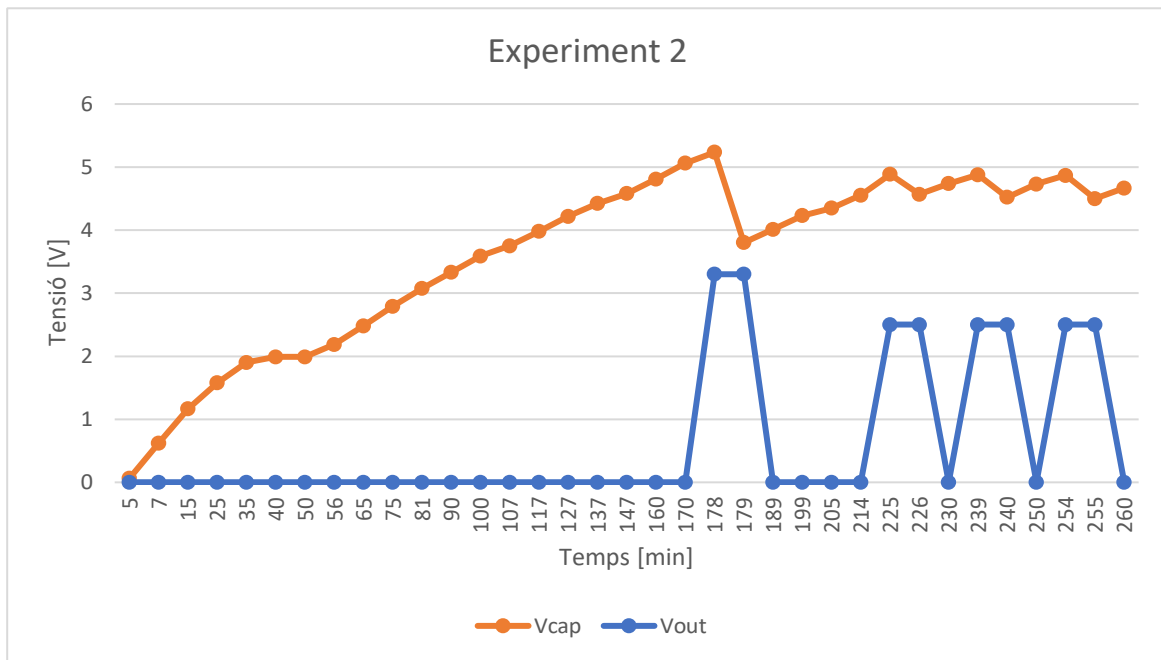


Figura 6.15. Gràfica càrrega-descarrega del condensador (experiment 2)

A la vista dels resultats obtinguts, s'hi veuen certes concordances i discrepàncies respecte a les simulacions o l'experiment 1.

Començant per les similituds, es pot veure com la primera càrrega del dispositiu és similar a la del capítol anterior («6.2. Prova del mòdul *harvesting* sobre el Kit LTC3588EMSE-1»).

La càrrega del dispositiu capacitador és relativament lineal, havent-hi una petita baixada sobre el minut 50. Encara així, es carrega fins el valor corresponent i descarrega amb normalitat.

Cert és que la càrrega es fa en un temps superior, sent aquest temps  $t_{inici} = 10680s$  (178 minuts). No obstant, també és cert que en aquest cas no s'ha pogut fer que el piezoelèctric donés una tensió e intensitat més elevades. Per tant la càrrega encara que sent superior a l'esperada, és un resultat positiu.

Pel que fa les diferències, després de la primera càrrega i descàrrega el dispositiu comença a comportar-se de forma incoherent, descarregant-se abans del previst i posant la sortida Vout a una tensió també per sota de la indicada.

Tant és així que no és possible carregar de nou el condensador a través del dispositiu *harvesting*.

Per corroborar aquest comportament, al dia següent es prova de carregar el condensador de nou amb el dispositiu *harvestig*. Però en aquesta ocasió el dispositiu directament no carrega.



Figura 6.16. Valors del piezoelèctric vibrant.

Segons els valors del Voltímetre i Amperímetre (Figura 6.16), el piezoelèctric segueix donant una tensió i corrent adequats, però no és possible carregar el condensador de la mateixa manera que es va fer el dia anterior.

Per tant, es creu possible que el dispositiu LTC3588 hagi petit una sobrecàrrega i s'hagi cremat.

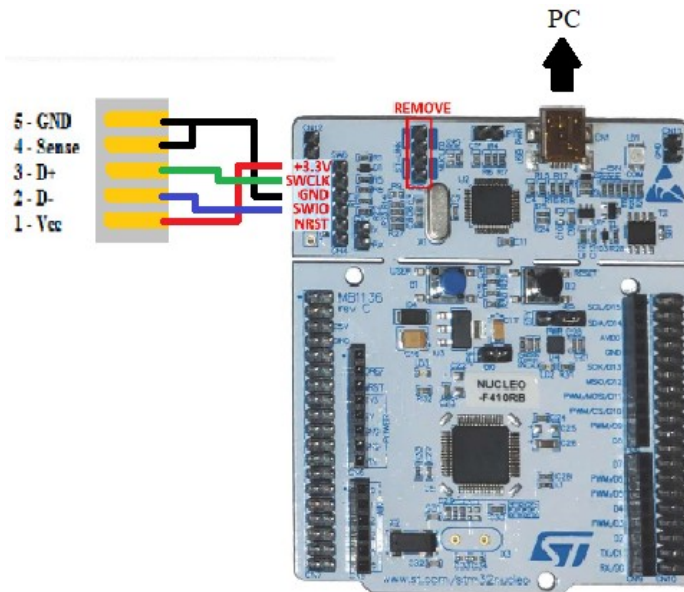
Davant d'aquest problema, es canvia el condensador (per seguretat) i el component *harvesting*. Val a dir que aquests canvis no alteren el resultat final: el condensador no carrega.

Vist que els components principals no són, es deixa sense concloure el motiu de la fallada. No obstant, s'haurà de revisar que cap de les resistències de la placa s'hagi cremat o que algun dels condensadors s'hagi foradat. Aquests poden ser motius de pes i lògics pels quals el circuit no funcioni correctament.

## 6.5. Prova del microcontrolador sobre la placa

Per poder programar el microcontrolador de la placa, es fa a través de comunicació USART mediant un cable USB i un programador d'un altre Kit de desenvolupament. En aquest cas, s'ha usat el Kit Nucleo-L073RZ.

Com es pot veure en la següent il·lustració, l'esquema de connexió al bus (cable USB) quedaria de la següent forma:



*Figura 6.17. Esquema de connexió del Kit amb el microcontroladors*

Així doncs, connectant la placa resta connectar el Kit amb l'ordinador i «debuggar» el programa a la placa.

### Connexió amb la placa

Primerament s'intenta connectar a la placa a través del controlador.

Després d'una sèrie de senzills errors de connexió (cables SWIO i SWCLK creuats) i d'altres de configuració de programa, el programador es connecta satisfactòriament amb la placa.

Així doncs, es fa el primer intent de «debuggar» el programa sobre la placa.

## **Error del microcontrolador**

En el primer intent, la placa inicia juntament amb el programa, però al intentar «debuggar» el cursor es perd i immediatament es desconnecta.

Vist això, es torna a mirar la configuració i es comprova que tot sigui correcte. També es torna a revisar l'esquemàtic plantejat en el capítol «5.5.3. Disseny del Microcontrolador». Tot correcte.

Un cop revisat tot l'anterior esmentat, es comprova que el microcontrolador incorporat a la placa concordi amb el del programari. Això és per que si el uC emprat difereix del programat, pot ser que les posicions de la memòria on intenta accedir no siguin les mateixes a les que teòricament ha de fer-ho. Això pot donar la sensació de que el cursor «es perd».

Així doncs, es troba un error greu en la compra de components: el microcontrolador usat a la placa no és l'adequat. Necessitant un STM32L031K6, s'ha assemblet un STM32F031K6. Per tant, totes les suposicions anteriors són certes. A més, al no ser un mòdul de baixa potència (Low Power), tota l'energia que s'emmagatzemés s'usaria per fer-lo funcionar, resultant un sistema *energy harvesting* catastròfic.

Es torna a fer la comanda i es canvia per el nou microcontrolador (STM32L031K6).

## **Error en la GPIO**

Un cop solucionat el problema del canvi de microcontrolador, es torna a «debuggar» el programa en la placa.

Aquest cop el programa connecta amb la placa, i el cursor ja no es perd. Per tant es comença a fer la tècnica pas a pas.

Un nou error sorgeix al fer les inicialitzacions durant el programa. Aquest cop a les referides a la GPIO.

Així doncs, es comprova inicialitzant un a un els ports GPIO. Un cop analitzat, s'observa que els ports GPIO\_PIN\_1|GPIO\_PIN\_4|GPIO\_PIN\_5|GPIO\_PIN\_8 fallen fent caure tot el programa.

Aquests pins poden fallar per diversos motius que en un futur s'hauran de revisar. Entre ells, el més comú i principal:

- El pin està configurat com a sortida i existeix una tensió al pin que produeix un curtcircuit

S'ha revisat i el pin està ben configurat al programa. A més, no existeix curtcircuit amb altres pins del microcontrolador a la placa.

Per tant es finalitza sense resultats concloents la prova del microcontrolador sobre la placa

## 7. Estudi Econòmic i pressupost

El pertinent estudi econòmic, amb totes les seves taules es detalla en el document adjunt Estudi Econòmic. En aquest capítol es posarà de manifest el pressupost final, també detallat en el document anteriorment esmentat.

Val a dir que al ser un projecte d'investigació, no es pretén ni industrialitzar el procés ni comercialitzar, i per tant obtenir cap rendibilitat.

La següent taula recull el pressupost amb una estimació inicial.

<i><b>PRESSUPOST FINAL</b></i>		
<i><b>Capítol</b></i>	<i><b>Descripció</b></i>	<i><b>Cost [€]</b></i>
<i><b>I</b></i>	Elaboració del projecte	25.335,00
<i><b>II</b></i>	Materials	300,64
<i><b>III</b></i>	Amortitzacions	0
<i><b>Total [€]</b></i>		25.635,64
<i><b>IVA (21%) [€]</b></i>		5.383,48
<i><b>TOTAL FINAL [€]</b></i>		<b>31.019,12</b>

*Taula 7.1. Pressupost del projecte*

En aquest pressupost s'ha inclòs els costos dels Capítols I, II, i III.



## 8. Impacte mediambiental

La verificació que el projecte és viable des d'un punt de vista mediambiental es fa a partir d'un informe del mateix adjectiu, disponible a l'Annex I. Tot seguit s'adjunta el resum i les conclusions de tal informe.

El projecte tracta del disseny d'un teixit piezoelèctric amb la seva electrònica per capturar la seva energia, prototipat a Catalunya i en fase d'investigació

En aquest estudi, es constata la petjada mediambiental del projecte; la majoria d'efectes nocius es produeixen en el moment de la fabricació del prototip.

Es recullen en les Taules 8.1 i 8.2 les principals accions i factors ambientals a considerar en l'estudi de detall, segons el seu impacte en el medi ambient.

### Accions impactants

Accions Impactants		Observacions
Fase de Desenvolupament		-No es determina cap acció impactant.
Fase de Construcció o Execució		-L'empresa ja és instal·lada i per tant no es preveu cap impacte.
Fase de Funcionament o Explotació	-Ús de soldadura per a components electrònics  -Aprovisionament i transport de matèries primeres	-L'ús de la soldadura pot ocasionar fums tòxics. En qualsevol cas l'equipament del laboratori els tractarà de forma adequada.  -Els transport i aprovisionament de matèries primeres es farà amb diferents proveïdors ja coneguts per l'empresa.
Fase d'Ús		-El prototip serà per ús de la investigació. Per tant no es preveuen accions impactants en la fase d'ús.
Fase de Retirada	La retirada del producte s'haurà de fer en les àrees condicionades a tal efecte.	Ja que el producte tindrà circuiteria interna, el desfet d'aquest producte s'haurà de fer en els llocs autoritzats per la RAEE.

*Taula 8.1. Taula d'accions impactants*

## Factors ambientals impactats

	Factor Ambiental	Impacte sobre ...
<b>Medi Natural</b>	Atmosfera	Qualitat de l'aire. Tractats pel propi laboratori.
	Sòl	Aparentment, no hi ha impactes de consideració.
	Aigua	Aparentment, no hi ha impactes de consideració.
	Flora	Aparentment, no hi ha impactes de consideració.
	Fauna	Aparentment, no hi ha impactes de consideració.
	Medi perceptual	Aparentment, no hi ha impactes de consideració.
<b>Medi Socioeconòmic</b>	Us del territori	Aparentment, no hi ha impactes de consideració.
	Culturals	Aparentment, no hi ha impactes de consideració.
	Infraestructura	Aparentment, no hi ha impactes de consideració.
	Humans	Possible creació de llocs de treball a futurs. Referent al projecte, no n'hi ha.
	Economia i població	Aparentment, no hi ha impactes de consideració.

*Taula 8.2. Taula de factors ambientals impactats*

Amb tot això, el projecte es tracta d'una investigació en curs per desenvolupar un TFG. En qualsevol cas, els pocs impactes mediambientals que hi puguin haver estan coberts sota el pla d'actuació de l'empresa EURECAT.

## 9. Planificació i programació del projecte

### 9.1. Primera planificació del projecte

En relació a l'avantprojecte el grau d'assoliment ha sigut molt per sota del compte. La planificació que es va fer des d'un principi no corresponia al document a lliurar Avantprojecte, com es pot comprovar en el diagrama de Gantt (Figura 9.1) i la posterior taula d'activitats taula d'activitats (Taula 9.1).

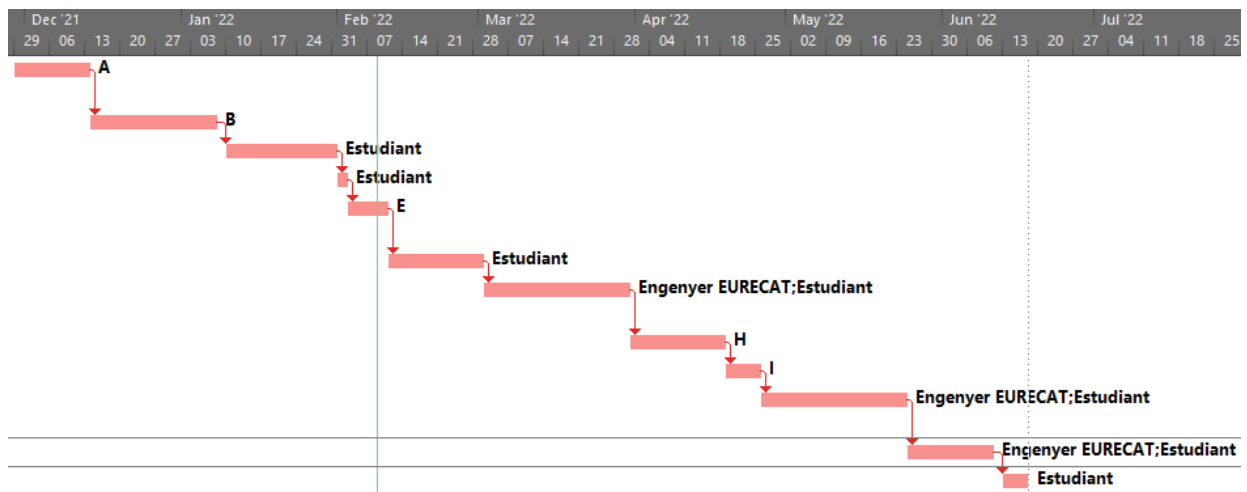


Figura 9.1. Diagrama de Gantt de la programació Inicial

Activitat	Hores	Data Inicial	Data Final	Prelacions	Recursos
A: Assignació del TFG i les reunions preliminars	4	Mon 29/11/21	Mon 13/12/21	-	Coordinadora EURECAT i Tecnocampus; Enginyer EURECAT; Estudiant
B: Recerca d'informació	20	Tue 14/12/21	Fri 07/01/22	A	Estudiant
C: Elaboració del marc conceptual	25	Mon 10/01/22	Mon 31/01/22	B	Estudiant
D: Elaboració de les viabilitats	8	Tue 01/02/22	Wed 02/02/22	C	Estudiant
E: Elaboració de les possibles solucions tècniques	10	Thu 03/02/22	Thu 10/02/22	D	Estudiant
F: Elaboració de l'estudi de l'art	20	Fri 11/02/22	Tue 01/03/22	E	Estudiant
G: Elaboració de les etapes de la solució I	100	Wed 02/03/22	Wed 30/03/22	F	Enginyer EURECAT; Estudiant
H: Proves de la solució I	45	Thu 31/03/22	Mon 18/04/22	G	Enginyer EURECAT; Estudiant
I: Documentació dels Resultats I	15	Tue 19/04/22	Mon 25/04/22	H	Estudiant
J: Elaboració de les etapes per a la solució II	100	Tue 26/04/22	Tue 24/05/22	I	Enginyer EURECAT; Estudiant
K: Proves de la solució II	45	Wed 25/05/22	Fri 10/06/22	J	Enginyer EURECAT; Estudiant
L: Documentació dels resultats finals	15	Mon 13/06/22	Fri 17/06/22	K	Estudiant

*Taula 9.1. Taula de la programació Inicial del projecte*

Com es pot comprovar a la Taula 9.1, es va realitzar treball que pertany a la memòria del projecte, i no al avantprojecte. Això ha ocasionat que molta informació buscada i documentada no s'inclogui en l'Avantprojecte.

Així, s'ha tornat a buscar, documentar i reorganitzar tot el treball amb una data massa propera per a la realització òptima de l'Avantprojecte. Encara així, s'ha pogut completar en gran part.

Per tant, s'ha hagut de reorganitzar la planificació a posteriori per poder assolir l'entrega de la tasca Avantprojecte. A la figura 5.2 i a la taula 5.2 es troben la planificació òptima i la llista d'activitats que s'hauria d'haver assignat per a la realització del present document.

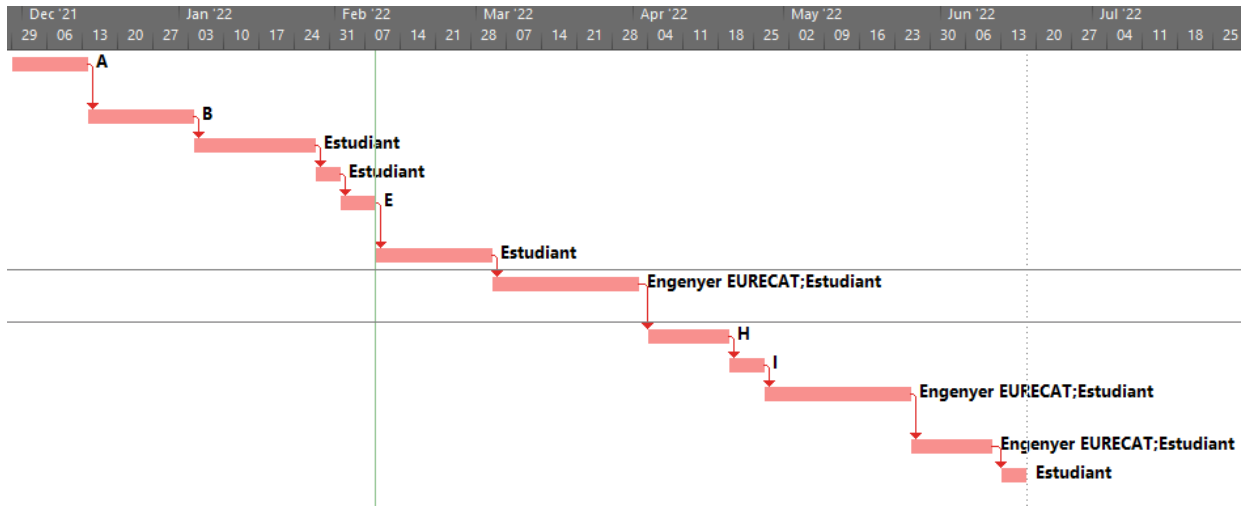


Figura 9.2. Diagrama de Gantt de la programació Ideal

<b>Activitat</b>	<b>Hores</b>	<b>Data Inicial</b>	<b>Data Final</b>	<b>Prelacions</b>	<b>Recursos</b>
A: Assignació del TFG i les reunions preliminars	4	Mon 29/11/21	Mon 13/12/21	-	Coordinadora EURECAT i Tecnocampus; Enginyer EURECAT; Estudiant
B: Recerca d'informació	20	Tue 14/12/21	Mon 03/01/22	A	Estudiant
C: Elaboració dels antecedents i necessitats d'informació	25	Tue 04/01/22	Thu 27/01/22	B	Estudiant
D: Elaboració de les viabilitats	8	Fri 28/01/22	Tue 01/02/22	C	Estudiant
E: Elaboració de les possibles solucions tècniques	10	Wed 02/02/22	Tue 08/02/22	D	Estudiant
F: Elaboració del marc conceptual	30	Wed 09/02/22	Thu 03/03/22	E	Estudiant
G: Elaboració de les etapes de la solució I	100	Fri 04/03/22	Fri 01/04/22	F	Enginyer EURECAT; Estudiant
H: Proves de la solució I	45	Mon 04/04/22	Tue 19/04/22	G	Enginyer EURECAT; Estudiant
I: Documentació dels Resultats I	15	Wed 20/04/22	Tue 26/04/22	H	Estudiant
J: Elaboració de les etapes per a la solució II	100	Wed 27/04/22	Wed 25/05/22	I	Enginyer EURECAT; Estudiant
K: Proves de la solució II	45	Thu 26/05/22	Fri 10/06/22	J	Enginyer EURECAT; Estudiant
L: Documentació dels resultats finals	15	Mon 13/06/22	Fri 17/06/22	K	Estudiant

*Taula 9.2. Taula de la programació Ideal del projecte*

## 9.2. Segona planificació del projecte

Un cop entregat l'avantprojecte, l'equip d'Eurecat i l'estudiant es van reunir per tornar a planificar el projecte.

La primera planificació, sent una aproximació molt àmplia, era insuficientment concreta per continuar amb el treball a realitzar.

Així doncs, i seguint el pla de contingència explicat al Capítol «8.3.1. Pla de contingència - Planificació Deficient», es va reorganitzar aquesta planificació i es van acordar reunions de seguiment.

Gràcies a aquestes reunions es va detectar un problema greu de disseny d'un component, el RN4020, el qual en un principi s'havia de programar amb un microcontrolador intern. No obstant, es va decidir canviar aquest uC per un altre més fàcil de programar (segons el consell d'Eurecat), concretament el STM32L031. No hi ha hagut fins la data d'entrega del document (Fri 21/04/22) ruptures importants de la planificació feta.

A continuació, el diagrama de GANTT de la segona planificació (Figura 9.3):

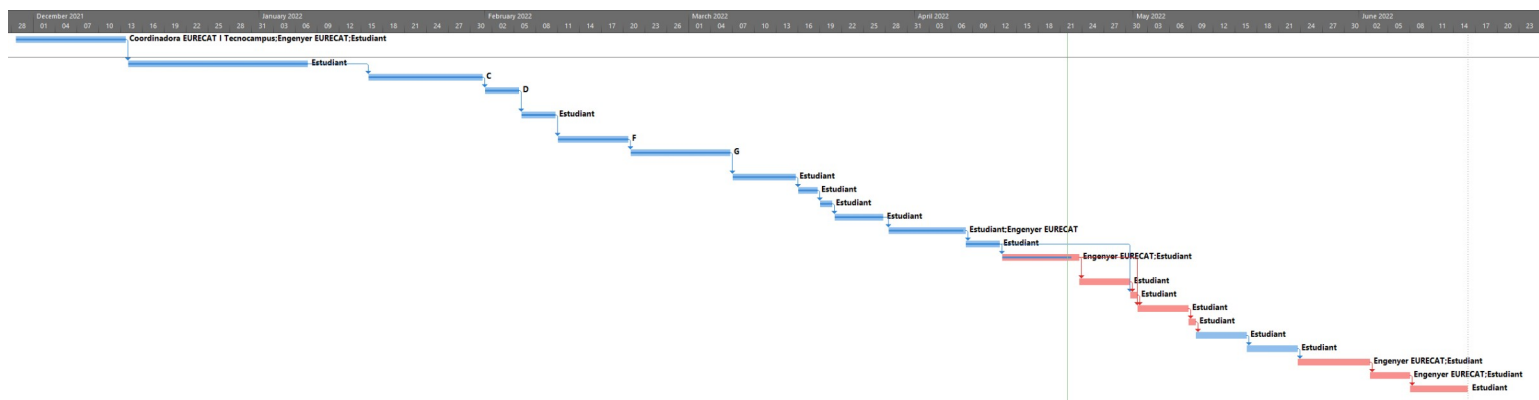


Figura 9.3. Diagrama de Gantt de la segona programació

I tot seguit de la taula d'activitats de la Figura 9.3.

Activitat	Hores	Data Inicial	Data Final	Prelacions	Recursos
A: Assignació del TFG i les reunions preliminars	4	Mon 29/11/21	Mon 13/12/21	-	Coordinadora EURECAT i Tecnocampus; Enginyer EURECAT; Estudiant
B: Recerca d'informació I	20	Tue 14/12/21	Fri 07/01/22	A	Estudiant
C: Elaboració del marc conceptual I	25	Mon 10/01/22	Mon 31/01/22	B	Estudiant
D: Elaboració de les viabilitats Econòmica i Mediambiental	8	Tue 01/02/22	Wed 02/02/22	C	Estudiant
E: Elaboració de les possibles solucions tècniques	10	Thu 03/02/22	Thu 10/02/22	D	Estudiant
<b>Entrega Avantprojecte (Wed 11/02/22)</b>					
F: Recerca d'informació II	30	Fri 11/02/22	Sun 20/02/22	E	Estudiant
G: Elaboració de Marc Conceptual II	40	Mon 21/02/22	Sun 06/03/22	F	Estudiant
H: Elaboració Estudi de l'Art	25	Mon 07/03/22	Tue 15/03/22	G	Estudiant
I: Anàlisi de Riscos	10	Wed 16/03/22	Fri 07/01/22	H	Estudiant
J: Elaboració Viabilitat Tècnica	5	Sat 19/03/22	Sun 20/03/22	I	Estudiant
K: Simulacions amb LTSpice	20	Mon 21/03/22	Sun 27/03/22	J	Estudiant
L: Estudi del programa Altium	30	Sun 27/03/22	Thu 07/04/22	K	Enginyer EURECAT; Estudiant
M: Esquemàtics I (Harvesting)	15	Thu 07/04/22	Tue 12/04/22	L	Estudiant
N: Estudi del programa STM32cubeIDE	30	Tue 12/04/22	Sat 23/04/22	M	Enginyer EURECAT; Estudiant
<b>Entrega Memòria Intermèdia (Fri 22/04/22)</b>					
O: Programa microcontrolador	20	Sat 23/04/22	Sat 30/04/22	N	Estudiant
P: Esquemàtics II (Sonda)	2	Sat 30/04/22	Sun 01/05/22	O, L	Estudiant
Q: Esquemàtics III (uC i Bluetooth)	20	Sun 01/05/22	Sun 08/05/22	P, O	Estudiant
R: Esquemàtics IV (Connectors)	4	Sun 08/05/22	Mon 09/05/22	Q	Estudiant
S: Ruteig dels components PCB	20	Mon 09/05/22	Mon 16/05/22	R	Estudiant
T: Muntatge PCB	20	Mon 16/05/22	Mon 23/05/22	S	Estudiant
U: Proves i testejos PCB	30	Mon 23/05/22	Thu 02/06/22	T	Enginyer EURECAT; Estudiant
V: Correcció Errors	15	Thu 02/06/22	Tue 07/06/22	U	Enginyer EURECAT; Estudiant
W: Documentació dels resultats finals	25	Tue 07/06/22	Wed 15/06/22	V	Estudiant
<b>Entrega Memòria Final (Wed 15/06/22)</b>					

Taula 9.3. Taula de la segona programació del projecte



### 9.3. Tercera planificació del projecte

Per motius de recursos, la planificació de les activitats U i V (Proves i testejos PCB i Correcció Errors respectivament) s'ha hagut d'allargar un temps substancial.

Això fa que l'entrega del document amb tots els resultats pertinents es traslladi del dia 15/06/2022 al dia 24/06/2022, com es pot veure en la Figura 9.4.

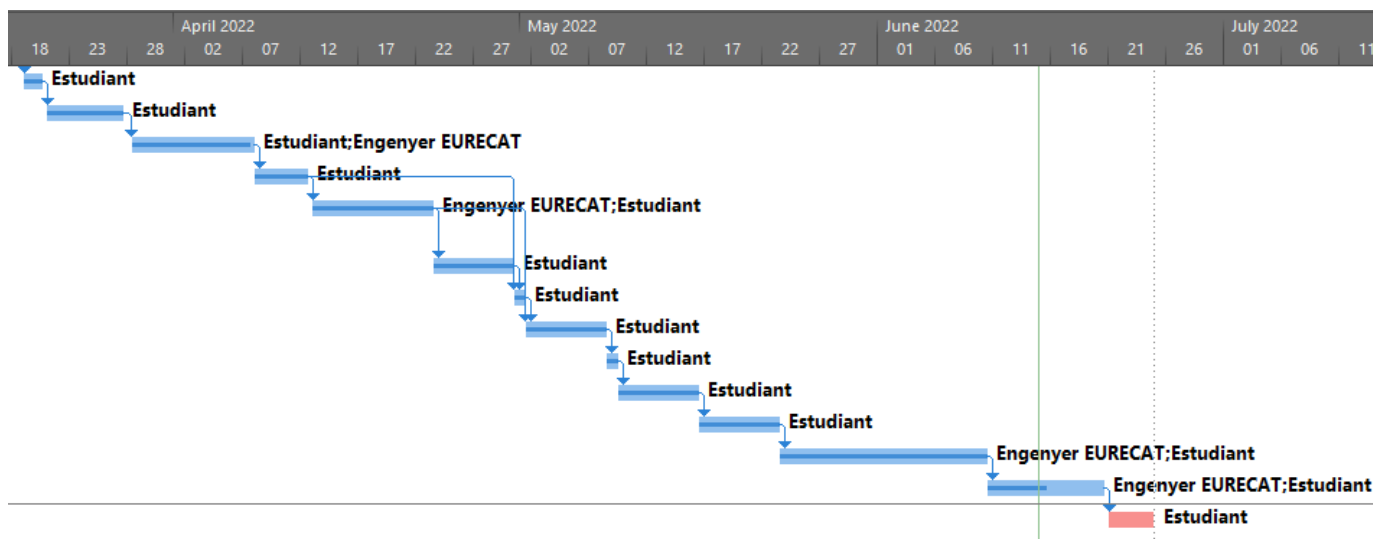


Figura 9.4. Diagrama de Gantt de la tercera programació

El motiu és que tant les màquines com el personal necessari d'Eurecat per poder fer els testos no s'han pogut alliberar abans, per tant aquestes proves com la conseqüent documentació no es poden lliurar en una data anterior.

També han hagut problemes importants a l'hora d'assemblar i de programar el microcontrolador STM32L031. En primera instància, i de forma accidental, el material (el propi xip) proporcionat a l'estudiant ha resultat no ser el adequat, fet que ha impossibilitat una comunicació de l'ordinador amb la placa.

Així doncs s'aplica el descrit en el capítol «10.3.2. Pla de contingència» per solucionar el problema. Es desassembla i es torna a muntar, aquest cop el correcte.

Això ocasionarà un sobrecàrrec al pressupost inicial, descrit en el document adjunt Estudi Econòmic.

Es fa doncs una nova programació, descrita en la següent taula:

Activitat	Hores	Data Inicial	Data Final	Prelacions	Recursos
A: Assignació del TFG i les reunions preliminars	4	Mon 29/11/21	Mon 13/12/21	-	Coordinadora EURECAT i Tecnocampus; Enginyer EURECAT; Estudiant
B: Recerca d'informació I	20	Tue 14/12/21	Fri 07/01/22	A	Estudiant
C: Elaboració del marc conceptual I	25	Mon 10/01/22	Mon 31/01/22	B	Estudiant
D: Elaboració de les viabilitats Econòmica i Mediambiental	8	Tue 01/02/22	Wed 02/02/22	C	Estudiant
E: Elaboració de les possibles solucions tècniques	10	Thu 03/02/22	Thu 10/02/22	D	Estudiant
<b>Entrega Avantprojecte (Wed 11/02/22)</b>					
F: Recerca d'informació II	30	Fri 11/02/22	Sun 20/02/22	E	Estudiant
G: Elaboració de Marc Conceptual II	40	Mon 21/02/22	Sun 06/03/22	F	Estudiant
H: Elaboració Estudi de l'Art	25	Mon 07/03/22	Tue 15/03/22	G	Estudiant
I: Anàlisi de Riscos	10	Wed 16/03/22	Fri 07/01/22	H	Estudiant
J: Elaboració Viabilitat Tècnica	5	Sat 19/03/22	Sun 20/03/22	I	Estudiant
K: Simulacions amb LTSpice	20	Mon 21/03/22	Sun 27/03/22	J	Estudiant
L: Estudi del programa Altium	30	Sun 27/03/22	Thu 07/04/22	K	Enginyer EURECAT; Estudiant
M: Esquemàtics I (Harvesting)	15	Thu 07/04/22	Tue 12/04/22	L	Estudiant
N: Estudi del programa STM32cubeIDE	30	Tue 12/04/22	Sat 23/04/22	M	Enginyer EURECAT; Estudiant
<b>Entrega Memòria Intermèdia (Fri 22/04/22)</b>					
O: Programa microcontrolador	20	Sat 23/04/22	Sat 30/04/22	N	Estudiant
P: Esquemàtics II (Sonda)	2	Sat 30/04/22	Sun 01/05/22	O, L	Estudiant
Q: Esquemàtics III (uC i Bluetooth)	20	Sun 01/05/22	Sun 08/05/22	P, O	Estudiant
R: Esquemàtics IV (Connectors)	4	Sun 08/05/22	Mon 09/05/22	Q	Estudiant
S: Ruteig dels components PCB	20	Mon 09/05/22	Mon 16/05/22	R	Estudiant
T: Muntatge PCB	20	Mon 16/05/22	Mon 23/05/22	S	Estudiant
U: Proves i testejos PCB	60	Mon 23/05/22	Fri 10/06/22	T	Enginyer EURECAT; Estudiant
V: Correcció Errors	35	Fri 10/06/22	Mon 20/06/22	U	Enginyer EURECAT; Estudiant
W: Documentació dels resultats finals	15	Tue 21/06/22	Fri 24/06/22	V	Estudiant
<b>Entrega Memòria Final (Wed 24/06/22)</b>					

Taula 9.4. Taula de la tercera programació del projecte

## **10. Gestió de Riscos**

Amb la fi de fer front a tot esdeveniment imprevist que succeeixi en el decurs del projecte, en aquest capítol es pretén identificar cada possible contratemps que pugui esdevenir en un retard en la correcta execució del projecte, valorar cadascuna d'aquestes amenaces per a determinar-ne la seva significativitat i, en darrer lloc, mitigar els riscos a partir d'un seguit de mesures que permetin tenir el control més absolut possible de la situació.

### **10.1. Gestió de Riscos**

Per a la correcta descripció de cada risc, convé tenir presents, de manera especial, els objectius i la planificació tractats al capítol 1 i 5 respectivament. Tractant de minvar-ne l'impacte que puguin tenir en la consecució dels mateixos.

Tenint en compte la consideració anterior, es descriuen tot seguit alguns dels riscos identificats:

#### **Planificació del projecte deficient**

És important que es tingui una bona comunicació entre el projectista, el tutor i els membres d'Eurecat (en aquest cas), a fi de poder dur a terme una planificació adequada de les tasques i determinar en quin període de temps han d'estar completades, és a dir, la programació també ha de ser adient; aquest és un tret característic atès que pot ser determinant a l'hora d'entregar un projecte dins del temps pactat. Tanmateix, cal realitzar reunions periòdiques, per a tenir coneixement del desenvolupament de les diferents activitats i actuar conjuntament si alguna d'elles patís un endarreriment.

#### **Falta d'experiència del projectista**

El risc de tenir un equip de treball inexpert en aquest àmbit pot provocar que l'execució de les tasques del projecte sigui deficient o s'allargui més del compte. D'altra banda, la falta de qualificació per a algunes de les activitats del projecte pot ser la conseqüència de l'assignació de recursos de més en comparació amb els que s'assignarien en condicions normals.

Així doncs, si es dona el cas de que el projectista no té els coneixements necessaris per a realitzar alguna de les tasques, s'haurà de seguir un pla de contingència per a solucionar aquest inconvenient.

### **Prototip físic no s'ajusta a la simulació**

En un projecte d'investigació, s'han de fer simulacions exhaustives per tal de minimitzar aquest risc. Encara així, és possible trobar-se amb un problema important traslladant les simulacions a un sistema físic, com ara el prototip.

### **Falta de material per construir el prototip**

A data del present document hi ha grans problemes per abastir a la indústria de components electrònics per al seu correcte funcionament.

Així, projecte inclou una sèrie de components que al fer la comanda el proveïdor pot allargar el termini d'entrega o fins i tot cancel·lar-la. Per tant, i com tots els anteriors, es farà una valoració per fer, o no, un pla de contingència que actuï en cas de que ocorri el risc mencionat.

### **Cost sobrevingut**

Pot succeir si el pressupost del projecte excedeix el planificat inicialment, és a dir, el proposat al capítol anterior; bé perquè aquest no sigui prou realista o bé per l'elementalitat del mateix, és a dir, que està insuficientment detallat.

Es comprova, doncs, que hi ha alguns riscos que poden esdevenir-se a mida que el propi projecte es desenvolupa, mentre que d'altres estan més aviat lligats a afers aliens al mateix. És per això que, de forma genèrica, s'estima escaient classificar els riscos en dos grups:

- Riscos interns. Relatius a la planificació (definició de les tasques, ordre d'execució i prelacions), programació (inici i fi de cada activitat) i assignació de recursos (recursos materials i humans necessaris per al desenvolupament de cada tasca).
- Riscos externs. Són tots aquells que no sorgeixen a partir de l'execució del projecte; es tracta de riscos més abstractes que estan vinculats amb temes econòmics, socials, polítics, mediambientals, etc.

Aquesta classificació no té cap transcendència rellevant a l'hora de gestionar els diversos riscos, però en el plànol teòric pot servir d'ajut per a la posterior gestió pràctica.

## 10.2. Valoració dels Riscos

A aquest apartat es duu a terme una avaluació de cadascun dels riscos, per tal de determinar quins són aquells que poden impactar significativament a l'execució del projecte. Aquesta avaluació es realitza a partir d'una taula que es pot anomenar matriu de riscos, que recopila els riscos anteriorment identificats, valora la probabilitat de que pugui succeir cadascun dels riscos, n'estima la gravetat, els puntua quantitativament segons una relació de proporcionalitat directa i estableix una etiqueta qualitativa, que no és altra cosa que un adjectiu qualificatiu que servirà per a designar cada risc segons si aquest té una importància significativa o pel contrari no requereix de mesures preventives per a la seva mitigació.

#	Risc	Probabilitat	Importància	Valor
1	Planificació del projecte deficient	3	5	15
2	Falta d'experiència del projectista	3	3	9
3	Prototip físic no s'ajusta a la simulació	2	5	10
4	Falta de material per construir el prototip	2	3	6
5	Cost sobrevingut	3	1	3

Taula 10.1. Matriu de Riscos

Un cop feta la valoració dels riscos exposats en el capítol anterior («10.1. Gestió de Riscos») es procedeix a valorar-los segons la Taula 8.1.

Si  $15 < V < 25 \Rightarrow$  Risc molt greu.

Si  $10 < V < 14 \Rightarrow$  Risc greu.

Si  $5 < V < 9 \Rightarrow$  Risc lleu.

Si  $1 < V < 4 \Rightarrow$  Risc menyspreable.

Així doncs, els principals riscos que es tindran en compte són els de caire Greu o Molt Greu. Sent aquests:

- Planificació del projecte deficient
- Prototip físic no s'ajusta a la simulació

## 10.3. Plans de contingència

### 10.3.1. Pla de contingència - Planificació Deficient

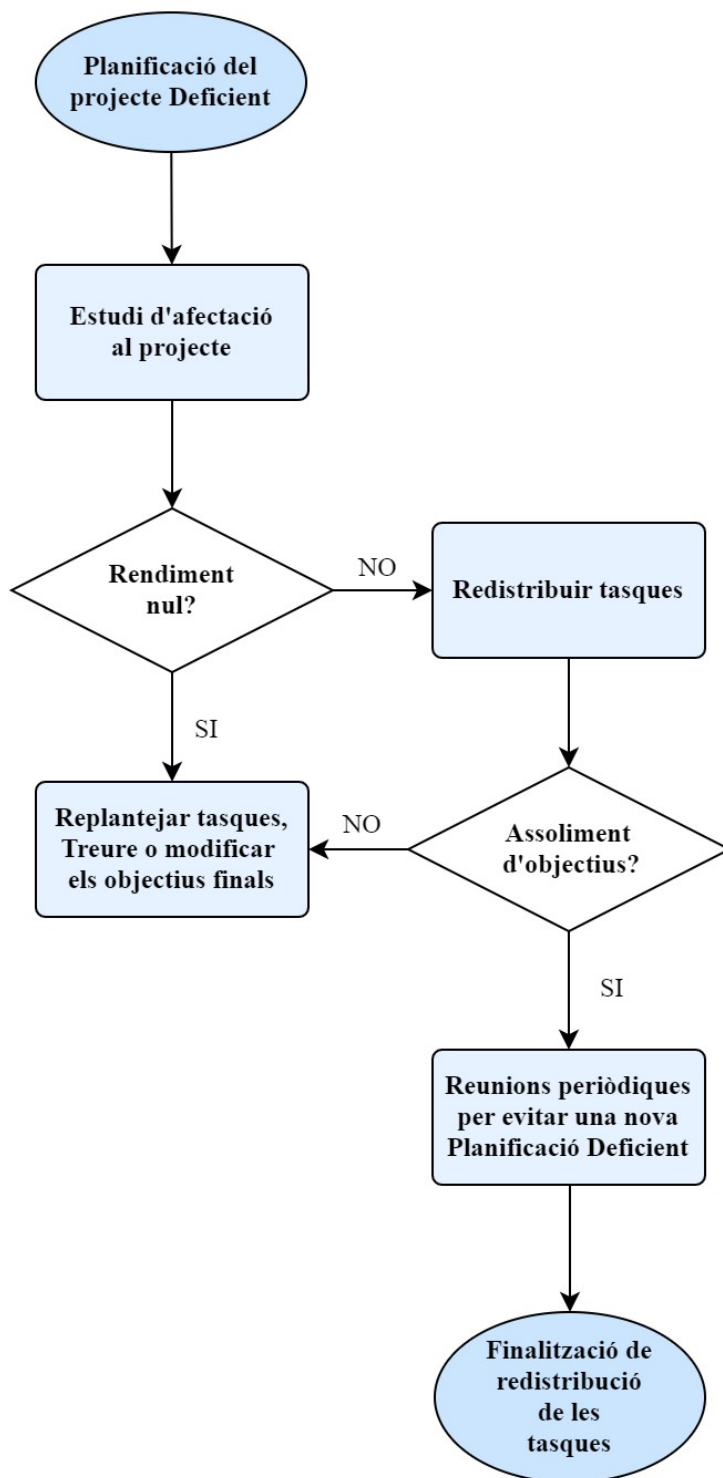


Figura 10.1. Pla de contingència sobre una planificació deficient del projecte

### 10.3.2. Pla de contingència – Prototip físic desigual a la simulació

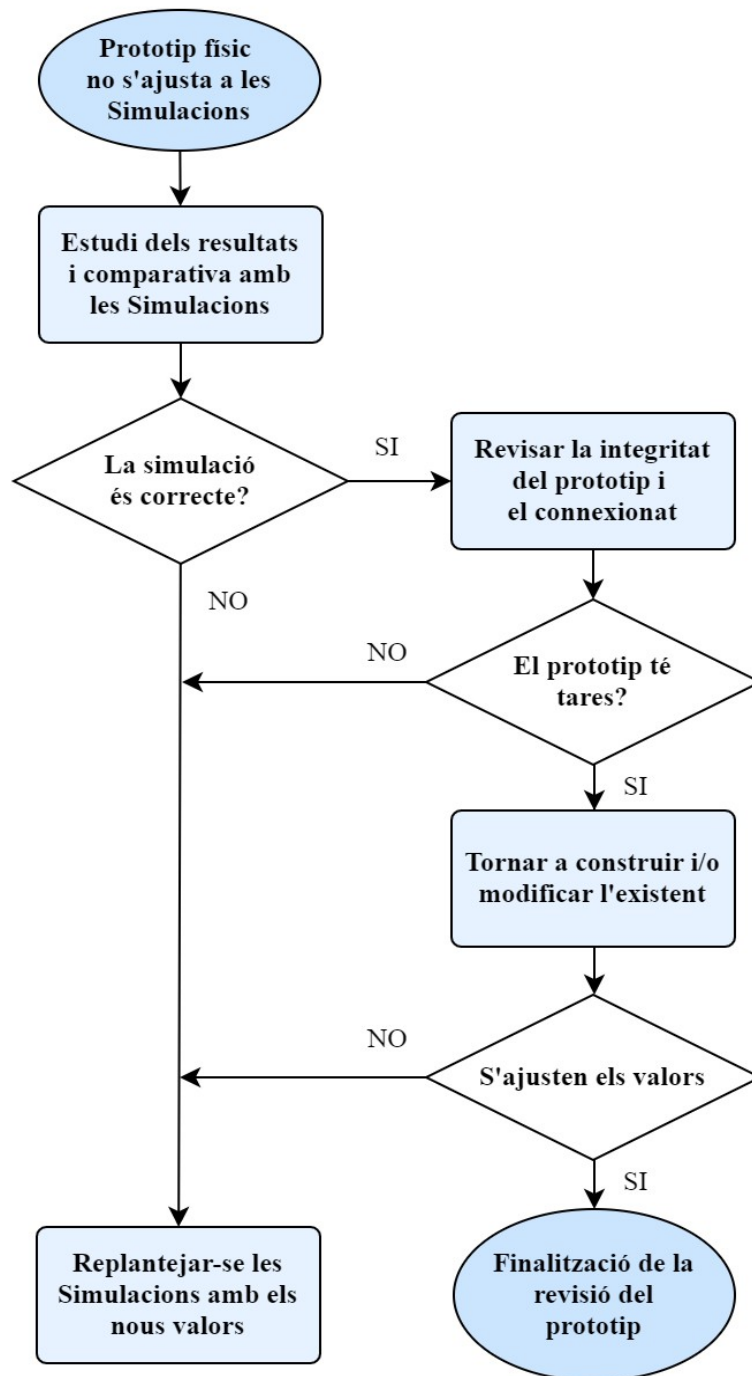


Figura 10.2. Pla de contingència sobre el prototip físic desigual a la simulació

## 11. Conclusions

Amb relació al document prèviament exposat, es poden extreure certes conclusions.

Primerament, s'ha plantejat una problemàtica relacionada amb la sensòrica i amb la imperiosa necessitat de trobar nous usos energètics. Així doncs, s'arriba a identificar el problema i es defineix una solució tècnica a la qüestió.

En segon lloc, s'especifiquen diferents etapes per realitzar la solució prèviament definida: el condicionament, emmagatzematge i posterior ús d'aquesta energia acumulada pel dispositiu piezoelèctric. Així doncs, un cop definides les etapes se simulen mitjançant el software LTSpice les fases de condicionament i emmagatzematge. En aquest procés s'assoleix l'objectiu de confirmar la viabilitat energètica del sistema, calculant els consums, temps i requeriments necessaris per a fer-lo funcionar. També se simulen altres circuits per comprovar la seva viabilitat tècnica (com ara el del regulador LTC3405) reconsiderant el circuit prèviament ideat.

Seguidament, es conformen els esquemàtics necessaris per a la construcció de la PCB flexible. Tots ells validats per l'enginyer d'Eurecat encarregat de seguir el projecte David Ortero. Per tant, el propòsit de crear esquemes capaços d'integrar tots els sistemes (*harvesting*, comunicació i microcontrolador) es compleix amb èxit. Tots aquests esquemàtics es fan amb el software Altium.

Algunes de les fites com és la programació del programari per a l'aplicació, no s'han complert completament. Aquests programes ha usat el programa STM32CubeIDE, propietat d'ST. Per tant, es valida un programa el qual recull dades mitjançant un ADC del microcontrolador i les converteix a temperatura.

La comunicació sèrie és l'objectiu de software que no s'ha pogut assolir completament. Tot i que s'han fet proves al respecte i s'ha pogut establir una comunicació via UART amb l'ordinador, donat que el mòdul BLE no s'ha pogut desenvolupar, no s'ha aprofundit en aquest aspecte. El programa manca de la transformació dels valors de temperatura a valors usables via UART (estan en `int16_t` i s'han de passar a `uint8_t []`) i dels codis AT a enviar al mòdul *wireless*. Sí que s'han estudiat i proposat, però no s'han dut a terme.

Tot seguit s'ha conformat la placa impresa en Kapton. En aquest punt tots els objectius s'han complert, ja que tant el disseny mono-capa com la impressió i el posterior revelat s'ha realitzat amb resultat positiu. Després, la soldadura dels components també s'ha fet sense majors complicacions.

Per finalitzar, així com en el disseny la majoria dels objectius s'han pogut assolir, en la fase de proves no s'han aconseguit tots els resultats esperats.

Primerament, es comprova el programa sobre un Kit de desenvolupament. Així es pot comprovar la validesa dels components incorporats a la placa sense necessitat de provar



directament aquesta. Les proves són satisfactòries, amb alguns problemes menors però amb fàcil solució. Així doncs, i menys la comunicació UART esmentada abans, s'assoleix l'objectiu de fer un programa funcional que pugui tractar les dades.

Un cop es veu que el programa "funciona", es caracteritza el piezoelèctric com a generador. Com en el cas anterior, es valida mitjançant l'experimentació la seva propietat *energy harvesting* podent generar energia amb una vibració mecànica.

El mòdul *harvesting* (LTC3588) també es valida mitjançant una prova experimental amb el seu Kit de desenvolupament. Amb cert marge d'error comparant amb les simulacions prèviament realitzades, s'obté una càrrega i descàrrega en cicles periòdics.

Tot seguit es prova a la placa el mateix experiment. En primera instància sembla que el sistema funciona correctament, fent la primera càrrega i descàrrega amb normalitat i amb un temps similar al del Kit. No obstant això, les següents carreges i descàrregues són anòmales, no arribant a la tensió requerida i descarregant-se només en part. A més a més, en aquests cicles anòmals també la sortida es posa a una tensió errònia. Amb tot això, es deixa sense concloure l'experiment sense trobar l'error que ocasiona això. Així i tot, es creu que pot ser un condensador foradat a causa d'una sobrecàrrega o una resistència cremada.

La següent prova es fa amb el microcontrolador a la placa. Aquest experiment també és fallit a causa de problemes crítics amb les GPIO de la MCU. No es descobreix l'error del problema, però es descarta que sigui per una errònia configuració en el programa o per curtcircuit dels pins en la placa.

Amb tot això, el projecte presenta una sèrie de línies futures per a desenvolupar les quals les podem categoritzar en dues parts:

- Línies a futur pròxim: Aquestes poden ser tals com investigar els problemes ocasionats per la placa, solucionant el problema de la GPIO i de la càrrega del mòdul *harvesting*.
- Línies de futur mitjà-llarg termini: En aquesta línia es pretén donar cobertura a la comunicació *wireless* BLE, un dels grans objectius d'aquest projecte. També es poden fer altres consideracions com implementar una comunicació per RF, donant més distància d'enviament.

Pel que fa al projecte, el projectista ha pogut desenvolupar-se com a enginyer en una institució com Eurecat. Aquesta experiència ha fet que l'estudiant pugui fer-se com a enginyer usant no només eines professionals com poden ser l'Altium, l'STM32CubeIDE o el LTSpice, fent els pertinents esquemàtics, simulacions i comanda per a la compra de components a proveïdors. També en metodologies de treball, així com construcció i disseny d'una PCB mono-capa en material flexible i la soldadura de tots els components necessaris.

Per tot això i més, el projectista malgrat alguns dels resultats obtinguts en el projecte, no només s'enriqueix extraordinàriament de forma personal, sinó també de forma professional.

## 12. Bibliografía

[1] (Anònim). (2020). «Energía 2020». *Foro de la Industria nuclear Española*. [Online]

URL: [https://www.foronuclear.org/wp-content/uploads/2020/06/ENERGI%CC%81A\\_2020.pdf](https://www.foronuclear.org/wp-content/uploads/2020/06/ENERGI%CC%81A_2020.pdf)

[2] (Anònim). (2021). «Consumo de energía primaria». *Observatorio Climático*. [Online]

URL: <https://observatorioclima.seo.org/consumo-de-energia-primaria-mtep/>

[3] (Anònim). (2021). «España cumple los objetivos europeos de renovables y eficiencia energética en 2020». *La Moncloa*. [Online]

URL: <https://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/transicion-ecologica/Paginas/2021/271221-objetivos-cumplidos-2020.aspx#:~:text=El%20consumo%20de%20energ%C3%ADa%20primaria%20en%20Espa%C3%B1a%20durante,a%202019%2C%20hasta%20un%20total%20de%2079.436%20ktep.>

[4] López Redondo, Noelia. (2021). «El porcentaje de renovables en España crece hasta el 20,9% en 2020». *Energy News*.

[5] Yang Bai, Heli Jantunen, and Jari Juuti. 2018. «Energy Harvesting Research: The Road from Single Source to Multisource». *Advanced Materials*. DOI: 10.1002/adma.201707271

[6] Ricardo Santiago Netto. «Seebeck, Thomas Johann». *Fisicanet*. [Online]

URL: <https://www.fisicanet.com.ar/biografias/cientificos/s/seebeck-thomas-johann.php>

[7] (Anònim). *Sistelec*. [Online]

URL: <http://descargas.cetronic.es/Termoelectricidad.pdf>

[8] Harb, Adnan. (2011). «Energy Harvesting: State-of-the-Art». *Renewable Energy*. DOI: 10.1016/J.RENENE.2010.06.014.

[9] (Anònim). «Photovoltaic History: A Timeline of Important Breakthroughs». [Online]

URL: <https://dbmsolar.com/photovoltaic-history/>

[10] Cultier J. Cleveland. (2008). «Fritts, Charles Edgar». *The Encyclopedia of Earth*. [Online]

URL: [https://editors.eol.org/eoearth/wiki/Fritts,\\_Charles\\_Edgar](https://editors.eol.org/eoearth/wiki/Fritts,_Charles_Edgar)

[11] Javier García Guinea i Julio González-Alcalde. «Cuarzo Piezoeléctrico, prototipo de Pierre Curie». *naturamlente*, no 27.

[12] Pawel Ziolkowski, Knud Zabrocki, Eckhard Müller. 2018. «TEG Design for Waste Heat Recovery at an Aviation Jet Engine Nozzle». *Applied Sciences*. DOI: 10.3390/app8122637

[13] G. Jeffrey Snyder. 2009. «Thermoelectric Energy Harvesting». *Springer*. DOI:10.1007/978-0-387-76464-1 11

- [14] Arhel. 2010. «Efecto Fotoeléctrico». [Online]  
 URL: <https://es.slideshare.net/presentaciones/efecto-fotoelectrico>
- [15] Sonali Das, Deepak Pandey, Jayan Thomas and Tania Roy. «The Role of Graphene and Other 2D Materials in Solar Photovoltaics». DOI: 10.1002/adma.201802722
- [16] (Anònim). «Nanogenerator». [Online]  
 URL: <https://hmong.es/wiki/Nanogenerator>
- [17] Jin Yang, Jun Chen, Ying Liu, Weiqing Yang, Yuanjie Su and Zhong Lin Wang. 2014. «Triboelectrification-Based Organic Film Nanogenerator for Acoustic Energy Harvesting and Self-Powered Active Acoustic Sensing». *ACSnano*. DOI: 10.1021/nn4063616
- [18] Zhangxian Deng and Marcelo J Dapino. 2017. «Review of magnetostrictive vibration energy harvesters». *IOPscience*. DOI: 10.1088/1361-665X/aa8347
- [19] Anne Marie Helmenstine. (2019). «How to Make Rochelle Salt From Kitchen Ingredients». *ThoughtCo*. [Online]  
 URL: <https://www.thoughtco.com/how-to-make-rochelle-salt>
- [20] (Anònim). «Piezoelectric (adj.)». *Online Etymology Dictionary*. [Online]  
 URL: <https://www.etymonline.com/word/piezoelectric>
- [21] (Anònim). «A History of the Piezoelectric Effect. The Discovery of Piezoelectricity». [Online].  
 URL: <https://onscale.com/piezoelectricity/history-of-piezoelectricity/>
- [22] Gabriela González. (2020). «Pierre Curie: biografía, aportes y obras». *Lifeder*. [Online]  
 URL: <https://www.lifeder.com/pierre-curie/>
- [23] Agustín Arca. (2006). «CURIE, Jacques (1855-1941)». *Histel*. [Online]  
 URL: [https://histel.com/z\\_histel/biografias.php?id\\_nombre=40](https://histel.com/z_histel/biografias.php?id_nombre=40)
- [24] (Anònim). (2022). «Gabriel Lippmann Biographical». *The Nobel Prize*. [Online]  
 URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1908/lippmann/biographical/>
- [25] Miguel Cúpich Rodríguez i Fernando J. Elizondo Garza. (2000). «Actuadores piezoeléctricos». *Ingenierías*. [Online].  
 URL: [http://eprints.uanl.mx/10005/1/6\\_Miguel\\_Cupich\\_et\\_al\\_actuadores\\_Piezo.pdf](http://eprints.uanl.mx/10005/1/6_Miguel_Cupich_et_al_actuadores_Piezo.pdf)
- [26] Ismael Plaza Guerra. (2021). «DISSENY DE L'ADQUISICIÓ DEL SENYAL D'UN SENSOR PIEZOELÈCTRIC IMPRÈS PER A APLICACIONS EN ELECTRÒNICA IMPRESA FLEXIBLE». *UPF – TecnoCampus*.

- [27] (Anònim). «WHAT IS “PZT”?» . *APC International*. [Online]  
URL: <https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/pzt.html>
- [28] (Anònim). (2010). «Materiales piezoelétricos». *Fundación OPTI y Centro tecnológico ASCAMM*. [Online].  
URL: [https://icono.fecyt.es/sites/default/files/filepublicaciones/bvt\\_mat\\_n3.pdf](https://icono.fecyt.es/sites/default/files/filepublicaciones/bvt_mat_n3.pdf)
- [29] (Anònim) . (1993). «DOE Fundamentals Handbook». *U.S. Department of Energy*. Volume 1 and 2. DOE: DOE-HDBK-1017/1-93
- [30] Renato Calìò, Udaya Bhaskar Rongala, Domenico Camboni, Mario Milazzo, Cesare Stefanini, Gianluca De Petris, Calogero Maria Oddo. 2014. «Piezoelectric Energy Harvesting Solutions». *Sensors*. DOI: 10.3390/s140304755
- [31] H. Han, Y. Nakagawa, Y. Takai, K. Kikuchi and S. Tsuchitani. «PVDF film micro fabrication for the robotics skin sensor having flexibility and high sensitivity». *2011 Fifth International Conference on Sensing Technology*. DOI: 10.1109/ICSensT.2011.6137052.
- [32] Font: Departament intern i articles d'Eurecat. Penjats sota l'aprovació de l'entitat per a la divulgació d'aquest TFG.
- [33] Miguel Ángel Lama. *ResearchGate*. «Figura efecto piezoelectrico directo e inverso». [Online]  
URL: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-116-Efecto-piezoelectrico-directo-e-inverso-3\\_fig9\\_321084545](https://www.researchgate.net/figure/Figura-116-Efecto-piezoelectrico-directo-e-inverso-3_fig9_321084545)
- [34] *PI*. «Piezo Motors, Linear Motor Positioners & Rotary Piezo Motor Stages». [Online]  
URL: <https://www.pi-usa.us/en/products/piezo-motors-stages-actuators>
- [35] Shashank Priya, Hyun-Cheol Song, Yuan Zhou, Ronnie Varghese, Anuj Chopra, Sang-Gook Kim, Isaku Kanno, Liao Wu, Dong Sam Ha, Junggho Ryu and Ronald G. Polcawich. 2017. «A Review on Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Methods, and Circuits». *De Gruyter*. DOI: 10.1515/ehs-2016-0028
- [36] (Anonim). (2000). «CHARACTERISTICS OF FERROELECTRIC PZT CERAMICS». [Online]  
URL: <https://www.birmingham.ac.uk/Documents/college-eps/irc/hydrothermal-phd-thesis/CHAPTER2.pdf>
- [37] Tristan Miller i Boris Stoeber. 2011. «Design of corona Apparatus». UBC Electrical Engineering. [Online]  
URL: <https://sbsp.sites.olt.ubc.ca/files/2012/07/Corona-Project-Report-Tristan-Miller.pdf>

- [38] Félix Rodríguez Trelles. 1984. «Temas de Electricidad y Magnetismo». EUDEBA.  
ISBN: 978-950-23-0108-2
- [39] D. Tarddioli i R. Martínez. 2017. «Modelado de Sistemas». *Centro Universitario de la Defensa – Academia General Militar*.
- [40] Corina Covaci i Aurel Gontean. 2020. «Piezoelectric Energy Harvesting Solutions: A Review». *Sensors*. DOI: 10.3390/s20123512
- [41] Dibin Zhu. 2011. «Vibration Energy Harvesting: Machinery Vibration, Human Movement and Flow Induced Vibration». *Sustainable Energy Harvesting Technologies - Past, Present and Future*. DOI: 10.5772/25731
- [42] Ahmed Tausif Aijazi. 2014. «Printing Functional Electronic Circuits and Components». *Western Michigan university*.
- [43] James Temple. (2019). «Cómo resolver el gran mal de la energía renovable: el almacenamiento». *MIT Technology Review*. [Online]  
URL: <https://www.technologyreview.es/s/11537/como-resolver-el-gran-mal-de-la-energia-renovable-el-almacenamiento>
- [44] Bellis, Mary. (2021). «Biography of Benjamin Franklin, Printer, Inventor, Statesman» *ThoughtCo*. [Online]  
URL: <https://www.thoughtco.com/story-of-benjamin-franklin-1989852>
- [45] Bellis, Mary. (2020). «Biography of Luigi Galvani, Electrophysiology Pioneer». *ThoughtCo*. [Online]  
URL: <https://www.thoughtco.com/luigi-galvani-theory-animal-electricity-1991692>
- [46] Bellis, Mary. (2020). «Biography of Alessandro Volta, Inventor of the Battery». *ThoughtCo*. [Online]  
URL: <https://www.thoughtco.com/alessandro-volta-1992584>.
- [47] Edgar Cucurella i Víctor Fuses Navarra. (2017). «Caracterización de los acumuladores con condensadores en comparación con los acumuladores electroquímicos». *Facultad de Náutica de Barcelona - Universidad Politécnica de Catalunya*.
- [48] (Anònim). (2015). «New Google Doodle Honors Alessandro Volta, Forefather of the Modern Battery». *TIME*. [Online]  
URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1908/lippmann/biographical/>
- [49] Denis Marshinsky. «Thomas Edison es un genio con una reputación controvertida». *I-Engineer*. [Online]  
URL: <https://1-engineer.ru/tomas-edison-geniy-s-protivorechivoy-reputatsiey/>

- [50] (Anònim). «Biografia de Gilbert N. Lewis». *Biografias.Wiki*. [Online]  
URL: <http://biografias.wiki/gilbert-n-lewis/>
- [51] (Anònim). (2018). «This Day in History: Thomas Edison Patents the Alkaline Battery». *Key Capture Energy*. [Online]  
URL: <https://www.keycaptureenergy.com/this-day-in-history-thomas-edison-patents-the-alkaline-battery/>
- [52] (Anònim). (2022). «William Watson». Wikipedia. [Online]  
URL: [https://es.wikipedia.org/wiki/William\\_Watson](https://es.wikipedia.org/wiki/William_Watson)
- [53] (Anònim). (2022). «Botella de Leyden». Apoyo al Estudiante. [Online]  
URL: [https://100cia.ucoz.com/index/botella\\_de\\_leyden/0-57](https://100cia.ucoz.com/index/botella_de_leyden/0-57)
- [54] (Anònim). 2015. «Benjamin Franklin - the Founding Father». *BenjaminFranklin*. [Online]  
URL: <https://benjaminfranklin.net/>
- [55] (Anònim). 2015. «Historia del Circuito Eléctrico». *ProfesorEnLinea*. [Online]  
URL: [https://www.profesorenlinea.cl/mediosocial/Circuito\\_ElectricoHistoria.htm](https://www.profesorenlinea.cl/mediosocial/Circuito_ElectricoHistoria.htm)
- [56] (Anònim). Wikipedia. [Online]  
URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sonar>
- [57] (Anònim). TocaVinilos. [Online]  
URL: <https://www.tocavinilos.com/como-funciona-un-tocadiscos/>
- [58] (Anònim). «¿Cómo funcionan los relojes de cuarzo?». MÜSS. [Online]  
URL: <https://musswatch.com/blog/como-funciona-un-reloj-de-cuarzo/>
- [59] Luisyep. (2020). «El efecto piezoelétrico: Corriente inducida por percusión». [Online]  
URL: <https://ingenieriabasica.es/efecto-piezoelctrico/>
- [60] Shafik A. i Ben Mrad R. (2016). «Piezoelectric Motor Technology: A Review». *Springer*. DOI: 10.1007/978-3-319-23853-1\_2
- [61] Han, Liling, Yu, Liandong, Pan, Chengliang, Zhao, Huining i Yizhou, Jiang. (2018). «A Novel Impact Rotary–Linear Motor Based on Decomposed Screw-Type Motion of Piezoelectric Actuator». *Applied Sciences*. DOI: 10.3390/app8122492
- [62] Peng Zhang. (2010). «Chapter 3 - Sensors and actuators». *Advanced Industrial Control Technology*. DOI: 10.1016/B978-1-4377-7807-6.10003-8

- [63] (Anònim). «Sustainable Dance Club, Rotterdam». Domus. [Online]  
URL: <https://www.domusweb.it/en/design/2009/02/05/sustainable-dance-club-rotterdam.html>
- [64] Thomas K. Grose. (2012). «Tiles May Help Shrink Carbon Footprint by Harnessing Pedestrian Power». National Geographic News. [Online]  
URL: <https://www.nationalgeographic.com/science/article/120518-floor-tiles-turn-footfalls-to-electricity>
- [65] Oliver Balch. (2012). «Power generating tiles pave the way to renewable energy breakthrough». [Online]  
URL: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/power-generating-tiles-renewable-energy>
- [66]. Yousuke Ogasawara. (2008). «Revamped ‘Power Generating Floor’ to Be Tested at Tokyo Station». *Railgroup*. [Online]  
URL: <https://railgroup.wordpress.com/2008/12/09/revamped-power-generating-floor-to-be-tested-at-tokyo-station/>
- [67] (Anònim). (2009). «Power Generating Floor Tested at JR Tokyo Train Station». *Japan For Sustainability*. [Online]  
URL: [https://www.japanfs.org/en/news/archives/news\\_id027023.html](https://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id027023.html)
- [68] Prasad Gurunath Phatak, Nitish Rajan Parab. (2016). «PIEZOELECTRICITY: KEY WAY TO ALTERNATIVE ENERGY». *International Journal of Technical Research and Applications*. E-ISSN: 2320-8163, Issue 41.
- [69] Xuezheng Jiang, Yancheng Li, Jianchun Li, Jiong Wang, Jin Yao . (2016). «Piezoelectric energy harvesting from traffic-induced pavement vibrations». *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 6 . DOI: 10.1063/1.4891169
- [70] (Anònim). « Polyvinylidene Fluoride (PVDF): Properties, Production, & Applications». Matmatch. [Online]  
URL: <https://matmatch.com/learn/material/polyvinylidene-fluoride-pvdf>
- [71] John O’Neill, Jason Lu, Rodney Dockter i Timothy Kowalewski Ph.D. (2015). «Practical, Stretchable Smart Skin Sensors for Contact-Aware Robots in Safe and Collaborative Interactions». *IEEE – ICRA*.
- [72] Negin Nikafrooz, Zachary Fuge, Alexander Leonessa. (2022). «Grasp Control of a Cable-Driven Robotic Hand Using a PVDF Slip Detection Sensor». *Cornell University*. DOI: 10.48550/arXiv.2202.06140

- [73] P. Bifulco, G. d'Gargiulo, G. d'Angelo, A. Liccardo, M. Romano, F. Clemente, M. Cesarelli. (2014). «Monitoring of respiration, seismocardiogram and heart sounds by a PVDF piezo film sensor». *IMEKO TC4*.
- [74] Yagmur Akin Yildirim, Alperen Toprak i Onur Tigli. (2017). «Piezoelectric Membrane Actuators for Micropump Applications using PVDF-TrFE». *Journal of Microelectromechanical Systems*. DOI: 10.1109/JMEMS.2017.2773090
- [75] S. M. Yang i Y. C. Liu. (1995). «Frequency Domain Control of Flexible Beams With Piezoelectric Actuator». *ASME*.
- [76] Pooja Rani i Deepak Chhabra. (2016). «Piezoelectric Energy Harvesting from Fluid Flow Dynamism using PVDF». *INTERNATIONAL JOURNAL OF R&D IN ENGINEERING, SCIENCE AND MANAGEMENT*.
- [77] Anja Lund, Karin Rundqvist, Erik Nilsson, Liyang Yu, Bengt Hagström i Christian Müller. (2018). «Energy harvesting textiles for a rainy day: woven piezoelectrics based on melt-spun PVDF microfibrils with a conducting core». *npj Flexible Electronics*. DOI: 10.1038/s41528-018-0022-4
- [78] WEBEDIA BRAND SERVICES . (2015). «¿Qué es el efecto memoria de las baterías de móviles? ¿Sigue existiendo?». Xataka. [Online]  
URL: <https://www.xatakamovil.com/espacio-sony/que-es-el-efecto-memoria-de-las-baterias-de-moviles-sigue-existiendo>
- [79] Justin R. Farmer. (2007). «A comparison of power harvesting techniques and related energy storage issues». *Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University*
- [80] Miguel Ángel Monge i Begoña Savoini. «Energía del campo electrostático: Condensadores». *Universidad carlos III de Madrid*. [Online]  
URL: <http://ocw.uc3m.es/fisica/fisica-ii/clases/OCW-FISII-Tema05.pdf>
- [81] Marin S. Halper i James C. Ellenbogen. (2006). «Supercapacitors: A Brief Overview». *MITRE*. [Online]  
URL: [https://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/06\\_0667.pdf](https://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/06_0667.pdf)
- [82] Huidong Li, Chuan Tian, and Z. Daniel Deng. 2014. «Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials». *Applied Physics Reviews*. DOI: 10.1063/1.4900845
- [83] Yang Sun, Nguyen Huy Hieu, Chang-Jin Jeong, and Sang-Gug Lee, Member, IEEE . 2012. «An Integrated High-Performance Active Rectifier for Piezoelectric Vibration Energy Harvesting Systems». *IEEE*. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2162078
- [84] Moncef B. Tayahi, Bruce Johnson, and Melinda Hotzman . «Piezoelectric Materials for Powering Wireless Remote Sensors». *University of Nevada*



[85] Figure of Analog Devices. [Online]

URL: <https://www.analog.com/en/products/ltc1474.html>

[86] M.J. Guan, W.H. Liao. 2007. «Characteristics of Energy Storage Devices in Piezoelectric Energy Harvesting Systems». DOI: 10.1177/1045389X07078969

[87] Imatge del dispositiu LTC3588EMSE-1. Analog devices. [Online]

URL: <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/dc1459b-a.html>

[88] Imatge del dispositiu TPS61094EVM-066. *Texas instruments*. [Online]

URL: <https://www.ti.com/tool/TPS61094EVM-066>

[89] Datasheet del dispositiu TPS61094. *Texas instruments*. [Online]

URL: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61094.pdf?ts=1646735917912&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTPS61094](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61094.pdf?ts=1646735917912&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTPS61094)

[90] Datasheet del dispositiu RN4020. *Microchip*. [Online]

URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002265A.pdf>

[91] Datasheet del dispositiu LoRa-E5. *Digital-Key*. [Online]

URL: <https://www.digikey.es/es/products/detail/seeed-technology-co.-ltd/113990934/13926230>

[92] Manual d'usuari del dispositiu NUCLEO-32. *ST*. [Online]

URL: [https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user\\_manual/e3/0e/88/05/e8/74/43/a0/DM00231744.pdf/files/DM00231744.pdf/jcr:content/translations/en.DM00231744.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/e3/0e/88/05/e8/74/43/a0/DM00231744.pdf/files/DM00231744.pdf/jcr:content/translations/en.DM00231744.pdf)

[93] Datasheet del dispositiu LTC3588-1. *Analog Devices*. [Online]

URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/35881fc.pdf>

[94] Datasheet del dispositiu LTC3405. *Analog Devices*. [Online]

URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3405fa.pdf>

[95] Manual d'usuari mòdul RN4020. *Microchip*. [Online]

URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70005191B.pdf>

[96] Imatge e informació de les sondes NTC. *AMETHERM*. [Online]

URL: <https://www.ametherm.com/thermistor/ntc-thermistor-beta>