

Estudi de la capacitat generadora d'energia d'un sensor piezoelèctric PZT

Alumne: Guillem Rosselló Baiges

Curs i grup: 2n Batxillerat A

Període d'execució: Juny - Octubre 2014

Tutor: Rosa Panosa Arnau

AGRAÍMENTS

Vull donar les gràcies d'una forma molt especial a totes aquelles persones que no només m'han ajudat a fer aquest treball, sinó que a més han tingut la paciència d'aguantar-me durant aquests últims mesos, una mica difícils i pèl caòtics, però que han estat una mica més fàcils de passar gràcies al suport de tots els que han estat amb mi.

Agrair primerament als professionals que m'han dedicat el seu temps, a mi i al meu treball, i que sense els quals aquest treball no seria el mateix. Moltes gràcies a la Rosa Panosa, la meva tutora, per l'ajut i el material prestats. Moltes gràcies a en Jordi Serra, responsable del laboratori d'electrònica de la universitat de Vic, per les prestacions i l'ajut que m'ha proporcionat. Gràcies a la Dra. Consol Cavallé Mariné per proporcionar-me tot el material relacionat amb la petjada i les pressions. També es mereix un lloc el meu pare, que tot i que ja l'anomenaré més endavant, he de reconèixer que els seus coneixements professionals en l'àmbit energètic han estat indispensables per a mi i per al treball.

Gràcies als amics tant de Girona com de Reus per preocupar-vos per mi i pel desenvolupament del meu treball i per donar-me suport moral en tot moment, i gràcies en especial al meu company d'habitació Guillem Ramírez per el seu ajut i suport incondicional.

I finalment vull agrair aquest treball als que realment han estat el piló base d'aquest projecte: La meva família.

A la meva mare, per tota la feina que ha fet i per tot el temps que ha dedicat, ja no només al treball, sinó a mi personalment. Tota la preocupació, tots els ànims. Gràcies, mama. Al meu germà petit, que tot i ser un adolescent perdut i un "gallet" també ha estat importantíssim en el meu estat d'ànim, animant-me quan tocava o fent-me desconnectar quan portava masses hores treballant. Gràcies Martí! I finalment, al meu pare. Perquè ha sabut estar en tot moment al meu costat. Quan estava de bon humor, quan estava enfadat, quan estava frustrat, quan estava estressat, fins i a l'estar malalt. En cada moment ha estat el que jo necessitava; un pare, un tutor, un company, un amic...Papa, sense tu aquest treball no hagués existit.

Moltes gràcies a tots per el vostre ajut, hagi estat més o menys, ha estat fonamental. Aquest treball no és només meu, és de tots i cadascun de vosaltres.

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	1
1.1 Elecció del tema i motivació personal	2
1.2 Metodologia	4
1.3 Objectius	5
1.4 Abast i acotació del treball	6
2. FONAMENTS TEÒRICS	7
2.1 Context energètic	7
2.1.1 Sistema energètic	7
2.1.2 Smart City	7
2.1.3 Smart Grid	9
2.1.4 Generació distribuïda	10
2.1.5 Energy Harvesting	12
2.1.6 Piezoelectricitat i la generació distribuïda	12
2.2 Història	14
2.2.1 Precedents	14
2.2.2 Origen i primera etapa	14
2.2.3 Segona etapa	15
2.2.4 Tercera etapa : Segona Guerra Mundial	15
2.3 Efecte piezoelèctric	16
2.4 Paràmetres i equacions piezoelèctriques	18
2.4.1 Paràmetres piezoelèctrics	18
2.4.2 Taula resum paràmetres	21
2.4.3 Equacions típiques de materials piezoelèctrics	21
2.5 Materials piezoelèctrics	24
2.6 Piezoelèctrics com a generadors d'energia	25
2.7 Aplicacions i camps d'aplicacions	29
2.7.1 Àmbit musical	29
2.7.1.1 Micròfon i altaveu	30
2.7.1.2 Pastilla piezoelèctrica	31
2.7.2 Sistemes mecànics	31
2.7.2.1 Injectors mecànics	31
2.7.3 Generadors piezoelèctrics	32
2.7.3.1 Generadors de simple capa	32
2.7.3.2 Generadors de múltiple capa	33
2.8 Resum fonaments teòrics	33

3. PART EXPERIMENTAL	34
3.1. Estudi de la petjada humana	35
3.2. Constants i característiques del material piezoelèctric	
Iliurades pel fabricant	36
3.3. Experimentació	38
3.3.1. <i>Pràctica primera</i>	38
3.3.2. <i>Pràctica segona</i>	40
3.3.3. <i>Pràctica tercera</i>	42
3.3.4. <i>Pràctica quarta</i>	44
3.3.5. <i>Pràctica cinquena</i>	46
3.3.6. <i>Pràctica sisena</i>	47
3.3.7. <i>Pràctica setena</i>	49
3.3.8. <i>Pràctica vuitena</i>	52
3.3.9. <i>Pràctica novena</i>	54
3.3.10. <i>Pràctica desena</i>	58
3.3.11. <i>Pràctica onzena</i>	61
4. CONCLUSIONS	64
5. REFERÈNCIES	66
6. BIBLIOGRAFIA	68
7. ANNEXOS	69

1. INTRODUCCIÓ

L'home, des dels seus inicis, ha buscat facilitar la seva feina mitjançant la invenció de noves eines i materials. Aquest fet ha estat el que ens ha diferenciat des d'un bon inici de la resta d'animals del planeta, ja que prové d'un pensament racional que ens inculca la idea de buscar de forma lògica una forma més senzilla de realitzar les nostres empreses. Així doncs, la història de l'home està completament marcada pels avenços i els nous descobriments, fins a arribar al punt de diferenciar èpoques per mitjà de grans invencions, com és el cas de la creació del llenguatge o la invenció de la impremta. I l'home, mai tenint-ne prou, ha seguit investigant i avançant, a ritme d'assaig i error, amb l'afany de descobrir cada cop més coses noves. Tant ha estat així, que hem arribat a un punt de la nostra història en el que els avenços han estat tants i tant contemporanis entre ells que ja és impossible diferenciar-les per mitjà d'invencions. Només en els últims segles han aparegut avenços molt importants en camps com la medicina, la mobilitat o les telecomunicacions, i destaca en aquest darrer internet, una xarxa de comunicació i informació a escala mundial, capaç de mantenir-nos informats d'allò que passa a l'altra punta del món, sense haver de sortir de casa.

Parlar de revolució científica cada cop sembla més factible a l'hora d'anomenar l'època que estem vivint, i aquesta revolució ha generat una reacció en cadena que ha remogut el planeta i que ha causat un augment increïble de l'activitat humana, la qual cosa ha facilitat la comunicació i el desplaçament a milers de milions de persones. I sens dubte, aquesta cadena no ha acabat aquí, ja que en conseqüència a aquest augment d'activitat humana, un altre element s'ha vist arrossegat per aquesta necessitat: l'energia. Això ha dut els investigadors a treballar novament en la recerca de millores energètiques, que alhora ha aportat nous avenços, encadenat a un nou augment de l'activitat humana i novament a més i més necessitats, demostrant-nos que no es tracta d'una cadena sinó d'un cercle. Un peix que es mossega la cua que cal seguir alimentant per a poder avançar, un procés en el qual l'home es genera una necessitat a sí mateix per a poder millorar la seva condició de vida i assegurar la seva supervivència: la retroalimentació.

En aquest treball em centraré en l'aspecte energètic d'aquest cicle de continu progrés, en el que la necessitat d'obtenir energia augmenta dia rere dia, el que obliga a investigar

totes les formes possibles d'obtenir tot tipus d'energia i per tant treballar amb nous mètodes que es troben en procés d'expansió. Més concretament l'objectiu del meu treball serà centrar-me en estudiar un d'aquests mètodes novells d'aprofitament d'energia, anomenat efecte piezoelèctric.

1.1 Elecció del tema i motivació personal

La raó per la qual vaig decidir dedicar el meu treball de recerca al tema de la piezoelectricitat fou fruit de la pura casualitat. Un dia qualsevol estava llegint notícies interessants per internet, sense seguir cap criteri ni buscar notícies sobre cap camp en concret, quan de sobte vaig trobar un article que em va interessar. Es tractava d'una notícia publicada a la web de National Geographic (la seva versió en castellà) en la que es presentava un invent pioner que acabava de ser llençat a mode de prova en un centre comercial de Londres: les rajoles piezoelèctriques. Segons resumia el títol de l'article, aquestes rajoles tenien la capacitat de generar energia a partir de les petjades de la gent al caminar, i fou en aquest precís moment en què vaig decidir que volia estudiar aquest fet tant innovador. Podeu imaginar que de cop tot el meu cap va començar a originar preguntes i més preguntes: és veritat això? Realment funciona? Quanta energia podem arribar a aconseguir amb aquest sistema? Hem trobat una nova via de producció d'energia equiparable a la solar o la eòlica? I és que realment un descobriment com aquest és una bomba plena de millores, avenços i de noves possibilitats, que en un món com l'actual en el que la sostenibilitat i la conservació del planeta està tant de moda i és tant important, pot tenir una grandíssima importància.

Tot i això i després d'asserenar-me una mica i de posar totes les qüestions mentals en ordre, vaig començar a pensar lògicament en aquest fet, ja que la meva reacció fruit de la notícia havia estat molt optimista, i ara calia veure si realment el que s'explicava era tal i com deia. Primerament calia adonar-se que si la notícia no havia aparegut en cap altre medi de comunicació ni escrit ni digital, potser la

revolució energètica que jo havia imaginat dins el meu cap no era realment tal i com jo creia. Així doncs, em vaig ficar a investigar sobre el tema.

Vaig trobar l'empresa encarregada d'aquest invent, anomenada Pavegen Systems, i que era relativament nova. Es tractava d'una empresa creada per un jove emprenedor londinenc, que havia decidit investigar en el camp de la piezoelectricitat i que pel que semblava no li havia anat pas malament. Tot i això vaig seguir buscant i vaig descobrir un fet que no em va fer molt bona espina, i és que aquesta empresa no havia volgut desvetllar completament el funcionament del seu nou invent. O sigui, que tot i que se sabia que les rajoles incorporaven algun sistema piezoelèctric, no es coneixia realment si era completament d'aquesta manera. Així doncs vaig decidir seguir buscant per a veure si la piezoelectricitat havia estat estudiada per a un ús energètic com és el cas, i si s'havien extret resultats i conclusions sobre això. Vaig trobar certs treballs orientats en el tema, tot i que al final s'acabaven resumint tots en el disseny d'una rajola piezoelèctrica. És per això que em vaig decidir finalment a estudiar pròpiament els piezoelèctrics, per a comprovar si realment podien tenir aquesta utilitat, i sen el cas que els resultats fossin prometedors, començar a pensar en aplicacions a escala real de la generació a partir de la piezoelectricitat.

El treball que teniu al davant és doncs un estudi de la capacitat generadora d'un element piezoelèctric i la introducció al concepte de recollida d'energia elèctrica provinent del medi ambient , i l'elecció d'aquest s'ha degut a les raons que he esmentat amb anterioritat. No he volgut flirtejar en aquest cas amb la idea de crear un invent que sigui capaç de generar energia aprofitable per a un ús real, ja que tots els treballs que he trobat i que tenien aquesta finalitat eren realitzats per estudiants universitaris o de post grau. Així doncs, finalment m'he decidit per un estudi molt més bàsic però, valgui'm la redundància, que acabarà sent la base de tots els treballs que es facin en relació amb la piezoelectricitat. És en part per això que tota la part pràctica del treball ha estat realitzada de forma experimental i no simulada, i que els resultats s'han obtingut tots a partir d'un procés realitzat de primera mà.

1.2 Metodologia

El desenvolupament d'aquest treball constarà de dues parts :

- La primer part serà una feina de recopilació d'informació. Primerament realitzaré una recerca al voltant de temes i conceptes relacionats amb la generació d'energia, tals com la generació distribuïda, les *Smart Cities* o l'*Energy Harvesting*. El següent pas d'aquesta recerca serà contactar amb professionals de l'àmbit energètic, que puguin complementar tota la informació que jo hagi recopilat anteriorment amb informació i experiències de primera mà.

Un cop hagi recollit i estudiat suficient informació sobre el camp energètic, definiré els objectius i les claus del meu treball, tenint en consideració el nivell de coneixement en la matèria del que disposi en aquell moment. Per acabar aquesta primera part, quan ja hagi definit l'abast i els objectius del treball el que faré serà aprofundir a nivell més específic envers el tema elegit per a ser l'objecte d'estudi del projecte. En aquest cas el tema seleccionat és la capacitat generadora dels material piezoelèctrics, així doncs els temes en els que aprofundiré seran els següents (més endavant explicaré el perquè) :

1. Piezoelèctrics
2. Components electròniques i circuits electrònics
3. Equipament de mesura electrònica: Oscil·loscopi i multímetre
4. Característiques de la petjada humana: Força i dimensions

La recopilació d'informació en aquest cas estarà fixada en altres treballs, articles o estudis que s'hagin realitzat en relació amb la piezoelectricitat i la generació d'energia, excepte en el cas de la petjada humana, en el que intentaré contactar amb un professional del tema per a aconseguir informació directa i provinent d'una font fiable.

- La segona part consistirà en posar en pràctica tota la informació que haguem recollit durant la part més pròpiament teòrica del treball, i ho farem en una part pràctica que es proposarà com a meta assolir els objectius plantejats en la part anterior. Els resultats que n'extraguem seran presentats al final del treball en les conclusions.

El redactat del projecte serà l'últim i definitiu procés del treball, en el que lligaré tots els apartats del projecte per a donar-li sentit i concordança a tot el treball.

1.3 Objectius

Els objectius fixats i, que amb l'ajuda de tota la informació recopilada i de la part pràctica realitzada intentaré assolir, són els següents:

• *Objectius generals:*

- Realitzar un projecte de generació elèctrica mitjançant un sensor piezoelèctric PZT (titanat-zirconat de plom). La raó per la qual treballarem amb aquest material és la relativa facilitat amb la que l'hem pogut aconseguir i la dificultat que hem tingut per a trobar cap altre material piezoelèctric.
- Adquirir nous coneixements vers els elements principals del treball: sostenibilitat energètica, piezoelèctrics, circuits electrònics i eines de mesura electrònica.

• *Objectius específics:*

- Experimentar de primera mà en un laboratori electrònic.
- Dissenyar un circuit de transducció mecànica-elèctrica mitjançant un sensor piezoelèctric PZT, que sigui capaç d'estimular un díode LED.
- Comprovar que és possible emmagatzemar energia elèctrica mitjançant la recollida d'energia provinent de l'activitat humana.
- Realitzar un seguit d'experiments de varies configuracions, amb l'objectiu d'estimular un sistema d'il·luminació de díodes LED.
- Poder treballar amb una experimentació real sense simulacions, per a adquirir experiència manual i operativa dins d'un laboratori.
- Adquirir mètode científic, basat en l'anàlisi i la investigació.

1.4 Abast i acotació del treball

La idea bàsica del treball és estudiar la capacitat de recollida d'energia elèctrica dels materials piezoelèctrics. També intentarem demostrar que és possible captar l'energia mecànica de l'activitat humana per mitjà de transductors piezoelèctrics PZT, que posteriorment transformaran aquesta energia mecànica en energia elèctrica. Derivat d'aquest objectiu, haurem de realitzar una conversió del senyal elèctric altern produït pel piezoelèctric, amb l'ajuda d'un circuit de transformació del senyal sinodal de sortida que ens donarà com a resultat un senyal continu. L'objectiu d'aquest senyal serà ser eficient i capaç d'estimular un díode LED. Per tant, no desenvoluparé cap sistema d'emmagatzematge d'energia.

Un altre punt important del projecte serà realitzar experiències reals dutes a terme en un laboratori en comptes de treballar amb programes de simulacions electròniques. L'objectiu d'aquest punt és aconseguir una familiarització amb l'electrònica i el treball de laboratori, encarat més aviat en facilitar una millor adaptació a un futur acadèmic o professional relacionat amb l'àmbit experimental i/o electrònic.

2. FONAMENTS TEÒRICS

2.1 Context energètic

2.1.1 Sistema energètic

El sistema energètic està compost per tres sectors : generació, transport i distribució. La generació es troba centralitzada i concentrada en centrals de molt alta producció i distanciada dels centres de consum. Tanmateix, el consum també es troba concentrat i localitzat en les grans ciutats. Aquesta distribució i ubicació de la generació i dels grans consumidors, provoca la necessitat de fer grans inversions en construcció i en manteniment d' infraestructures energètiques, ja siguin per al transport o per a la distribució. De tota l'energia generada, es calcula que el 85% del total és consumida per les grans ciutats, i això ha generat la necessitat de modificar el sistema elèctric actual, en el qual el transport entre les centrals de generació i distribució propicien la pèrdua d'una considerable quantitat d'energia.

2.1.2 Smart City

Nous conceptes estan apareixent amb l'objectiu de canviar aquest sistema, de fer-lo evolucionar i millorar, amb l'objectiu d'aconseguir fer un sistema energètic molt més eficient. I aquest canvi comença, en part, per eliminar la fase del transport, entenent que a l'eliminar aquest pas aconseguim eliminar les pèrdues que origina, i aproximar la generació als punts de consum. És així com neix el concepte de les *SmartCities*. Es tracta de la idea d'una ciutat moderna, futurista, en la que tot està connectat entre sí, en la que la tecnologia i la comunicació tenen una importància transcendental per al funcionament de la ciutat, i en la que s'intenta generar part de l'energia que suposa l'ús de tota aquesta tecnologia directament des de la ciutat. Un dels objectius principals d'aquestes ciutats és millorar l'eficiència energètica i la sostenibilitat de la ciutat, i així aconseguir un equilibri amb l'entorn i garantir la preservació de les zones salvatges i vegetals que conviuen avui dia juntament amb les zones urbanes.

Tal i com ho exposa l'empresa IDOM [1]:

Una **ciudad inteligente** es aquella que es capaz de aprovechar los **datos** que produce en su funcionamiento diario para generar **información nueva** que le permita mejorar su gestión y ser más **sostenible**, más **competitiva** y ofrecer mejor **calidad de vida**, gracias a la **participación** y **colaboración** de **todos** los actores ciudadanos.

[2]

Ja avui dia podem començar a trobar les primeres proves i demostracions de la portada a terme d'aquest model sostenible. La més propera i una de les pioneres d'Europa és Màlaga, on s'està duent a terme un projecte de prova amb l'objectiu de comprovar el funcionament i la millora que suposen aquests models urbans. Es tracta d'una àrea de 4 km² que engloba 11.000 clients domèstics i 1.200 indústries. És un projecte liderat per Endesa[3] i sota la direcció de deu empreses més, que està intentant posar sobre la taula tota aquella tecnologia actual que pugui ajudar al bon funcionament d'aquest model energètic.



[4] Imatge que mostra els models de fanals eficients que s'han disposat dins del projecte *SmartCity Málaga*



[5] Imatge publicitària del projecte SmartCity Málaga

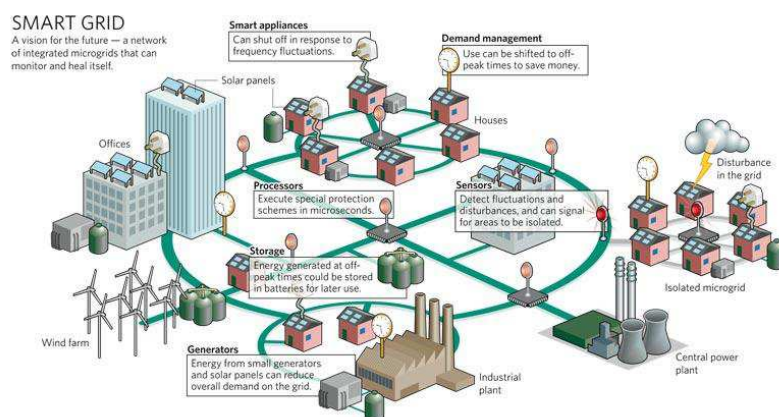
2.1.3 Smart Grid

Les *SmartCities* es poden englobar en un altre concepte també de caire sostenible anomenat *SmartGrid*, i que com indica la paraula ve definit a mode de xarxa. Una xarxa que integra de forma intel·ligent tots els usuaris que la comprenen, tant generadors com consumidors, i que té com a objectiu aconseguir un subministrament elèctric eficient, segur i sostenible. La web www.energiaysociedad.es, portal que ofereix tot el material relacionat amb el sector energètic espanyol, defineix les *SmartGrides* a partir dels seus objectius, que són els esmentats a continuació (Informació extreta directament dels seus arxius) :

Objectius de les *SmartGrides*:

1. Enfortir i automatitzar la xarxa.
2. Optimitzar la connexió de les zones amb fonts d'energia renovable.
3. Desenvolupar arquitectures de generació descentralitzades.
4. Millorar la integració de la generació intermitent i de noves tecnologies d'emmagatzemat.
5. Avançar en el desenvolupament del mercat elèctric.
6. Aconseguir una generació activa de la demanda.
7. Possibilitar la generació del vehicle elèctric.

Resumint, les característiques que descriuen les *SmartCities* poden ser també per a les *SmartGrids*, ja que l'objectiu és sempre el mateix: lluitar per una millor sostenibilitat i per un major estalvi energètic.



[6] Imatge oferta per Google com exemple per mostrar el concepte de *SmartGrid*

Actualment hi ha tota una xarxa d'empreses unides i dedicades explícitament a l'estudi i a la implantació d'aquests sistemes a nivell d'Europa, que està treballant en portar a terme aquestes xarxes a nivell de continent.

"European technology platform for the electricity networks of the future"
[7]

És tal i com es defineix aquesta campanya, de la qual es pot trobar tota la informació a la seva web www.smartgrids.eu, ja sigui política de l'empresa, funcionament de les xarxes intel·ligents o projectes futurs i en funcionament.

2.1.4 Generació distribuïda

Dins també de les Smart Cities trobem un nou concepte energètic conegut com *generació distribuïda*. Tal i com podem extreure del seu nom, entenem per generació distribuïda la generació d'energia mitjançant diverses tecnologies de generació, situades el més proper possible a les zones de càrrega [8].

Algunes de les fonts d'energia utilitzables en la generació distribuïda són les següents:

- **Plaques solars fotovoltaïques:**

S'acostumen a situar dins les ciutats a la part més alta dels edificis, de tal manera que rebin sense problema la llum del sol per a poder-la transformar posteriorment en energia. Amb aquestes plaques el que s'aconsegueix és un edifici autosuficient a nivell energètic, i que fins i tot pot aportar part de l'electricitat a la xarxa elèctrica de la ciutat.



[9] Imatge de Friburg (Alemanya), la primera ciutat solar del món.

· Aerogeneradors:

Consisteixen en una versió reduïda dels molins de vent que se situen a les muntanyes, de tal forma que puguin tenir cabuda dins de les zones urbanes sense significar cap problema ni logístic ni visual. Funcionen de la mateixa forma que els ja esmentats molins de vent, recullen l'energia que produeix el vent al moure les seves aspes, per a poder-la utilitzar posteriorment en l'enllumenat de la ciutat i així pugui auto alimentar-se. Així com les plaques solars, els aerogeneradors també aporten aquella l'energia que els sobra a la xarxa elèctrica de la comunitat.



A dalt, aerogeneradors rústics en la part més alta d'una fàbrica [10]. A la dreta, model de fanal amb aerogenerador introduït en el mobiliari urbà de ciutats d'arreu del món [11].



Podem veure doncs com aquests conceptes i prototips ja s'estan duent a terme avui dia i aparentment fins ara estan tenint un bon rendiment. Una de les poques raons que està frenant temporalment aquestes noves iniciatives és que lògicament totes elles suposen una gran inversió inicial, que no totes les ciutats del món són capaces de fer avui dia. És per això que la investigació no para, i segueix buscant vies més econòmiques que facilitin la implementació del concepte Smart City.

2.1.5 *Energy Harvesting*

Conegut en català com a recollida d'energia, guarda una relació molt propera amb la generació distribuïda. Es tracta d'un procés per mitjà del qual, de la mateixa manera que en la generació distribuïda, s'extreu energia per mitjà de fonts d'energia mediambientals, tals com les vibracions, la llum o els gradients d'energia. La diferència és doncs que l'energia captada és de molt baixa potència i que necessita ser emmagatzemada. D'aquesta manera s'aconsegueix recollir petites quantitats d'energia que son idíl·liques per a l'electrònica de baix consum, la qual actualment està tenint molta importància en el nostre dia a dia. Així doncs, l'Energy Harvesting apareix com una valuosa alternativa a les bateries o piles que s'utilitzen per a alimentar l'electrònica de baix consum, oferint una opció més sostenible, duradora i econòmica de recollir energia. Es tracta sens dubte d'un nou concepte de recol·lecció d'energia.

2.1.6 *Piezoelectricitat i la generació distribuïda*

Una de les vies d'aprofitament de l'energia en les que actualment s'està treballant és la piezoelectricitat. Més endavant definiré i parlaré a nivell més teòric sobre l'efecte piezoelèctric, tot i això és fàcil d'entendre perquè la piezoelectricitat pot arribar a tenir una importància tant rellevant en la generació distribuïda. El que ens ofereix la piezoelectricitat és l'oportunitat d'agafar tota l'energia motora que els humans realitzem durant el nostra dia a dia, i que normalment es desaprofita totalment, i convertir-la en energia elèctrica que pot ser utilitzada per a satisfer la demanda energètica de la nostra ciutat.

Pot ser que la gent ara mateix pensi si realment l'energia motora que generem els humans és tanta com per a poder ser aprofitada, ignorant segurament la quantitat d'activitats que produeixen aquesta energia. En la següent taula podem veure la quantitat aproximada d'energia que dissipa el nostre cos en cada determinada acció.

Actividad	Kilocal/hr	Wattios
Dormir	70	81
Tumbado	80	93
Sentado	100	116
Estar relajado	110	128
Hablar	110	128
Comiendo	110	128
Pasear	140	163
Conducir un coche	140	163
Tocar el violín	140	163
Tareas domésticas	150	175
Pasar aspiradora	230	268
Caminar (4 mph)	350	407
Nadar	500	582
Alpinismo	600	698
Correr gran distancia	900	1048
Esprintar	1400	1630

[12]

Imaginem hipotèticament, doncs, que podem recollir part d'aquesta energia per a poder usar-la posteriorment en la nostra ciutat. L'avantatge amb el que compta un sistema piezoelèctric és en part el mateix que podem trobar a l'extreure energia solar en relació amb altres mètodes: mentre que hi ha altres formes d'extracció d'energia que requereixen zones més aïllades i distanciades dels nuclis urbans, les plaques solars poden ser instal·lades a sobre de qualsevol edifici de les ciutats. El cas doncs de la piezoelectricitat és encara més extrem, ja que el sistema piezoelèctric ha d'estar en contacte directe amb l'energia motora que el fa funcionar, fet que transforma l'opció de situar aquest sistema dins d'una ciutat en una necessitat.

2.2 Història

2.2.1 Precedents

A mitjans del segle XVIII els científics Carl Linnaeus (de nacionalitat suïssa) i Franz Aepinus (de nacionalitat alemanya i russa), estudiaren l'anomenat efecte piroelèctric, definit a grans trets com la capacitat de certs materials per generar un potencial elèctric en resposta a un canvi de temperatura. Seguint en aquesta línia, els científics francesos René Just Haüy i Antoine César Becquerel establiren una relació entre tensió mecànica i càrrega elèctrica. Aquests estudis foren el començament del procés que finalitzà amb el descobriment de la capacitat piezoelèctrica de certs materials i el seu posterior desenvolupament. Tot i això els experiments d'aquests científics no foren suficientment concloents per a poder confirmar de forma pràctica l'efecte piezoelèctric

2.2.2 Origen i primera etapa

La primera demostració directa de l'efecte piezoelèctric fou realitzada pels germans Pierre i Jacques Curie, també de nacionalitat francesa, el 1880. Gràcies als coneixements físics que tenien de les estructures fonamentals dels cristalls i basant-se en el coneixement heretat de Haüy i Becquerel sobre la posteriorment anomenada piezoelectricitat, foren capaços de predir el comportament de les estructures cristal·lines al ser sotmeses a una càrrega elèctrica. Més endavant van demostrar les seves hipòtesis per mitjà d'una experimentació realitzada amb turmalina, topazi, canya de sucre, quars i sal Rochelle [13], i van ser els dos últims els que demostraren un major efecte piezoelèctric. Tot i això, la parella de físics no va arribar més lluny i no va predir l'efecte piezoelèctric invers.



[14] Imatge dels germans Jacques (esquerra) y Pierre (dreta) Curie.

Fou Gabriel Lippman, físic francès guardonat el 1908 amb el premi Nobel de física, qui deduí matemàticament l'efecte invers el 1881, basant-se en els principis

fonamentals de la termodinàmica. Així doncs, immediatament després d'aquest



[15] Retrat del Nobel de física Gabriel Lippmann

descobriment els germans Curie demostraren experimentalment l'obtenció de potencial elèctric com a reacció a una deformació del material piezoelèctric.

Després d'aquest breu però intens període d'investigacions i etapes, l'estudi de l'efecte piezoelèctric fou apartat de les prioritats científiques de l'època i la piezoelectricitat quedà com una simple curiositat científica durant gairebé tres dècades.

2.2.3 Segona etapa

No va ser fins el 1910 que es va reprendre la investigació gràcies a la publicació del llibre *Lehrbuch der Kristallphysik* del físic alemany Woldemar Voigt, qui va estudiar i descriure les vint classes de cristalls piezoelèctrics naturals, a més de definir les constants piezoelèctriques, tot usant l'anomenat anàlisi tensorial. En part, l'arribada de la primera guerra mundial també va ajudar al desenvolupament de la tecnologia piezoelèctrica, en aquest cas en l'àmbit bèl·lic, i va donar lloc a l'aparició d'un dels recursos més utilitzats en el cas de la tecnologia militar, el sonar, primera aplicació de la piezoelectricitat i èxit rotund, usat al llarg dels últims gairebé cent anys a escala mundial. La piezoelectricitat, però també, va aparèixer a la vida quotidiana de l'època, tot i que només es tractà d'un cas puntual, en millorar el sistema de funcionament del tocadiscs, i el va fer més precís i econòmic.



[16] Woldemar Voigt, físic alemany del segle XX

2.2.4 Tercera etapa : Segona Guerra Mundial

Una altra etapa que va potenciar la indústria de la piezoelectricitat, va ser la segona guerra mundial, època en què es crearen grups de recerca a Rússia, Japó i als Estats Units. Aquests equips, tot i treballar independentment els uns dels altres, van

arribar tots al mateix punt, i descobriren una nova classe de materials sintètics, els quals, després de ser sotmesos a una polarització, mostraven constants piezoelèctriques molt més grans que les dels materials piezoelèctrics naturals. Els van anomenar *ferroelèctrics*. Van aparèixer també diverses aportacions d'aquests materials en el camp militar, que va afavorir la segona guerra mundial, sent el sistema de radiocomunicació aèria un dels més significatius i destacables per la seva utilitat i satisfactori funcionament. També en aquesta època es va començar a comercialitzar amb el quars, donada la seva senzilla obtenció i el seu bon rendiment piezoelèctric. Però la indústria de la piezoelectricitat als Estats Units va avançar de forma relativament lenta a causa dels interessos científics de conservar les patents. Va ser Japó qui, gràcies al treball cooperatiu i a la compartició d'informació, va crear un mercat fort i avançat que va aportar invents i materials completament competitius als americans, però molt més econòmics, gràcies al seu sistema de treball sense restriccions de patents.

2.3 Efecte piezoelèctric

El concepte piezoelectricitat prové del terme grec "piezein" (que significa comprimir, rebregar, prémer) unit a la paraula electricitat. Amb això ja tenim una primera i senzilla definició de l'efecte piezoelèctric: en el moment en què un element piezoelèctric rep una pressió externa, aquest genera energia. En el cas invers, i com ja he comentat en l'apartat històric, quan aquest mateix cristall rep una descàrrega elèctrica externa, es veu sotmès a un moviment mecànic, normalment de vibració. Per poder entendre millor aquest succés utilitzaré una definició més científica d'aquest efecte.

El terme cristall, científicament parlant, no fa referència a una aparença externa. Un cristall és qualsevol element sòlid que estigui format per un conjunt d'àtoms o molècules, disposats d'una manera molt ordenada i basat en un conjunt interminable de repeticions del mateix bloc de construcció bàsica d'àtoms, anomenat cel·la unitat. En la majoria de cristalls aquesta cel·la o unitat de repetició bàsica és simètrica, excepte en el cas dels piezoelèctrics, ja que no tenen centre de simetria. No obstant

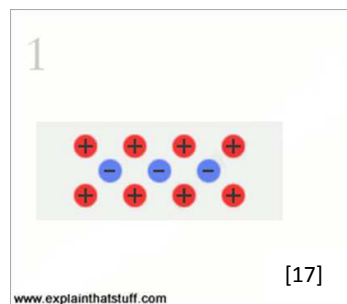
això i malgrat no comptar amb una disposició simètrica dels seus àtoms, els cristalls piezoelèctrics estan en perfecte equilibri de càrregues.

L'efecte piezoelèctric succeeix en el moment en què pressionem aquesta estructura, ja que la deformem alterant l'equilibri de càrregues anteriorment anomenat i fem aparèixer càrregues elèctriques netes.

L'efecte invers també té a veure amb la seva estructura atòmica o molecular: en sotmetre els seus àtoms o molècules a una pressió elèctrica, aquests es veuen obligats a reequilibrar-se a si mateixos, procés que genera un moviment de vibració.

Així doncs aquest és el funcionament bàsic d'un cristall piezoelèctric:

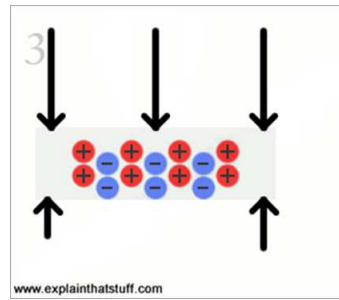
1. Les càrregues en un cristall piezoelèctric es troben generalment equilibrades, si bé com he dit abans no estan col·locades de forma simètrica.



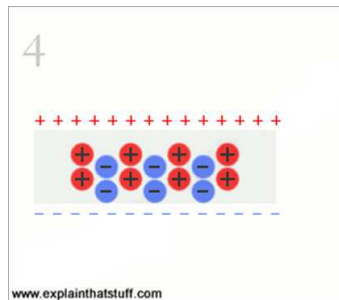
2. També dins les seves característiques normals trobem el cristall totalment neutre, ja que totes les seves càrregues positives es troben anul·lades per les seves respectives càrregues negatives.



3. En el moment en que apliquem una pressió sobre el cristall, l'estructura formada per les seves càrregues, que com he dit abans es troba en estat neutre, es desequilibra i el cristall perd la seva qualitat de càrrega neutra.



4. Degut a aquesta pressió al material, apareixen càrregues positives i negatives netes en les cares oposades del cristall. Aquest fenomen és conegut com piezoelectricitat.



2.4 Paràmetres i equacions piezoelectriques

2.4.1 Paràmetres piezoelectrics

Els principals paràmetres que defineixen els materials piezoelectrics són:

- **Constant de càrrega piezoelectrica, representada per “d”**

És el paràmetre que defineix la proporció entre la variació dimensional del piezoelectric (en metres) i la tensió aplicada (en Volts), i entre la generació de càrregues elèctriques (en Columbils) i la força aplicada en el material (en Newtons).

Les seves unitats son: **m / V** (metres / Volt) o **C / N** (Coulomb / Newton)

- **Constant de tensió piezoelectrica, representada per “g”**

Ens informa de l'índex de proporcionalitat entre la tensió generada, en Volts, i la força aplicada en Newtons. Els valors típics són de 1 a 60 Volts per a cada Newton aplicat (considerant dimensió de l'eix en qüestió d'1 metre), i per ceràmiques piezoelectriques de PZT.

La seva unitat: **Vm / N** (Volts x metres / Newton)

- **Coeficient d'acoblament, representat per “k”**

Ens indica l'eficiència del material en la seva transducció d'energia elèctrica-mecànica o bé mecànica-elèctrica. El rang habitual dels seus valors i per les ceràmiques piezoelèctriques de PZT, és del 2% al 75% d'eficiència.

- **Factor de qualitat mecànica, representat per “Q”**

És la mesura relacionada amb l'esmortiment del material. Els seus valors típics són de 50 a 1500 per les ceràmiques piezoelèctriques de PZT.

- **Factor de dissipació dielèctrica, representada per “Tan δ ”**

És la mesura relacionada amb les disminucions dielèctriques del material.

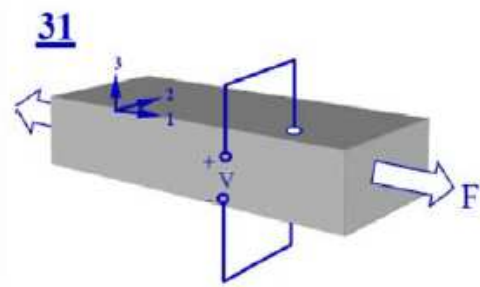
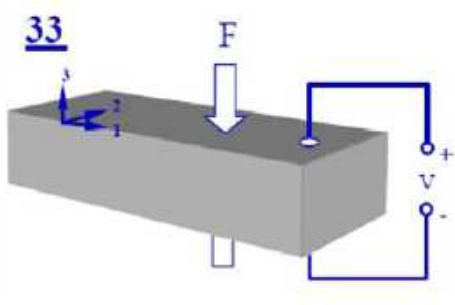
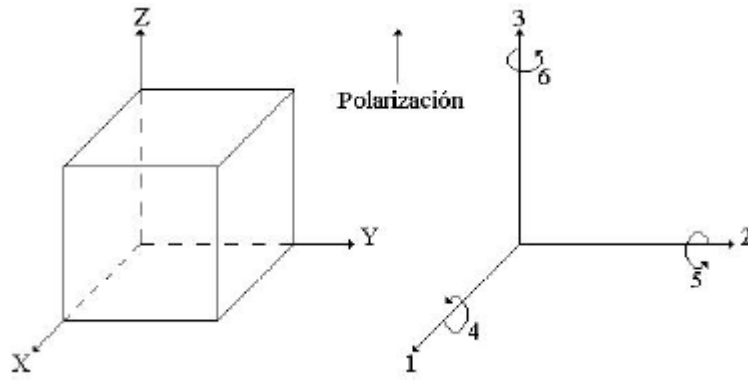
- **Temperatura de Curie, representada per “Tc”.**

Unitat: Graus Celsius

Ens indica la temperatura a la qual l'estructura cristal·lina del material piezoelèctric pateix una transició de fase deixant de presentar propietats piezoelèctriques. Després de superar aquesta temperatura, el material perd la polarització romanent induïda i es torna inútil per a la utilització com a element transductor d'energia elèctrica en mecànica. La seva unitat és Graus Celsius i pels piezoelèctrics ceràmics solen ser temperatures entre 150 a 350° C.

He de dir que els paràmetres definits anteriorment sempre van acompanyats per subíndexs. Els primers subíndexs ens indiquen la direcció del camp elèctric/força aplicada i el segon subíndex ens indica la direcció en que ha estat sotmès la deformació/càrrega elèctrica.

Identifiquem els subíndex, “i” i “j” iguals a 1 pel l'eix x, igual a 2 per l'eix y i igual a 3 per l'eix z.



[18]

2.4.2 Taula resum paràmetres

Taula resum del principals paràmetres característics dels materials piezoelèctrics.

Cantidades y Símbolos	Unidad	PXE 3	PXE 4	PXE 5	PXE 7	PXE 10	PXE 11
Datos Mecánicos							
Masa Específica ρ	10^3 Kg/m^3	7.8 a 7.95	7.45 a 7.55	7.55 a 7.65	7.6	7.6	4.5
Módulo de Elasticidad	Y_{11}^E	0.88	0.77	0.65	0.82	0.58	1.2
	Y_{33}^E	0.79	0.79	0.59	-	-	-
	Y_{55}^E	0.27	-	0.26	0.28	-	0.41
Calor Específico	J/Kg °C	420	420	420	420	420	420
Conductividad del Calor	W/m °C	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Compresión		> 6	> 6	> 6	> 6	> 6	> 6
Tensión	10^8 N/m^2	≈ 0.8	≈ 0.8	≈ 0.8	≈ 0.8	≈ 0.8	≈ 0.8
Flexión		≈ 1.0	≈ 1.0	≈ 1.0	≈ 1.0	≈ 1.0	≈ 1.0
Constante de Poisson σ	Numerica	≈ 0.3	≈ 0.3	≈ 0.3	≈ 0.3	≈ 0.3	≈ 0.3
Datos Eléctricos							
Temperatura Curie (temperatura de transición)	°C	395	265	285	320	185	400 (195)
Constante Dieléctrica Relativa	ϵ_{33}^{T/E_0}	570	1500	1750	680	3000	450
	ϵ_{11}^{T/E_0}	900	-	1800	1050	-	600
Resistividad Volumétrica ρ_{el} (25 °C)	Ωm	10^{12}	10^{11}	10^{14}	-	-	-
Constante de Tiempo $\rho_{el}\epsilon_{33}^T$ (25 °C)	Minutos	> 30	> 30	> 300	-	-	-
Disipación Dieléctrica, Factor $\tan \delta$ ($\times 10^{-2}$)	Numerica	0.5	0.6	2.0	2.0	3	2.5
Datos Electro - Mecánicos							
Factores de Acoplamiento	k_p	0.52	0.55	0.62	0.53	0.65	0.73
	k_{31}	0.30	0.32	0.36	-	0.38	0.25
	k_{33}	0.65	0.68	0.70	-	-	-
	k_{15}	0.71	-	0.66	0.66	-	0.65
Constantes de Carga Piezoelèctrica	d_{31}	-74	-141	-178	-84	-275	-44.5
	d_{33}	166	265	356	-	-	-
	d_{15}	385	-	515	350	-	235
Constante de Voltaje Piezoelèctrico	g_{31}	-14.8	-9.4	-11.3	-14.0	-9.1	-11.2
	g_{33}	34.5	20.0	23.2	-	-	-
	g_{15}	48.5	-	32.5	44.2	-	44.0
Factor de Calidad Mecànica $(Q_m^E)_p$ para modo radial	Numerica	300	500	80	Abt. 80	Abt. 80	270
Constantes de Frecuencia	N_p^E	2300	2200	2000	2250	1900	3600
	N_1^E	1680	1620	1460	1640	1390	2650
	N_3^E	1560	1610	1390	-	-	-
	N_5^E	930	-	930	970	-	1500

[19]

2.4.3 Equacions típiques dels materials piezoelèctrics

En el moment d'aplicar una pressió al material piezoelèctric, apareix un camp elèctric degut a les propietats dels PZT i la seva conseqüent càrrega a la superfície del piezoelèctric.

Les equacions matemàtiques que descriuen l'efecte piezoelèctric en qualsevol direcció són :

$$[D_i] = [\epsilon_{im}][E_m] + [d_{in}][T_n] \quad (1)$$

La variable (D) és el desplaçament elèctric, i és proporcional a la pressió aplicada (T) i al camp elèctric (E) existent.

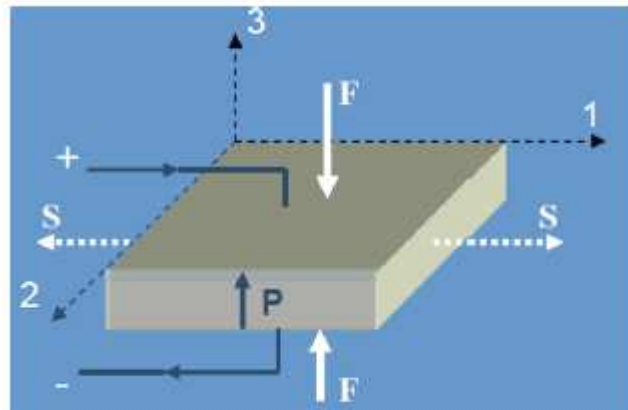
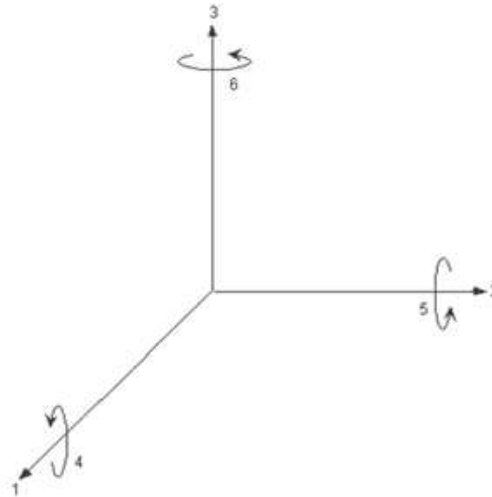
$$[S_i] = [s_{ij}][T_j] + [d_{ik}][E_k] \quad (2)$$

De la mateixa manera, la variable (S) és la deformació provocada i és també proporcional a la pressió aplicada (T) i al camp elèctric (E) existent.

TAULA RESUM DE VARIABLES I PARAMETRES EQUACIONS (1) I (2)

Comportament mecànic	
d_{ikl}	Coeficient deformació piezoelèctrica
s^E_{ijkl}	Constant mecànica (E=cte.)
S_{ij}	Deformació mecànica
T_{kl}	Tensió mecànica
Comportament elèctric	
ϵ^T_{ik}	Constant dielèctrica (T=cte.)
D_i	Desplaçament elèctric
E_k	Camp elèctric

D'acord amb la bibliografia emprada, la forma més efectiva per obtenir energia caminant és d'acord amb els subíndexs (direcció del camp de força) en mode 31. Aquesta conclusió és el resultat de varis estudis realitzats pels investigadors L. Mateu i F. Moll l'any 2005.



[20]

És a dir, l'equació nº (1) ens queda simplificada com:

$$D_3 = d_{31}T_1$$

Aquesta fórmula és la que defineix l'efecte piezoelèctric directe.

Per altra part, l'equació nº (2) ens queda simplificada com:

$$S = sT$$

Aquesta fórmula és la que defineix l'efecte piezoelèctric invers.

Així doncs, podem extreure que en una ceràmica piezoelèctrica polaritzada existeix una relació lineal entre les seves propietats mecàniques i elèctriques.

D'ençà del punt de vista elèctric, la ceràmica piezoelèctrica es comporta com un condensador. Els seus paràmetres elèctrics, la capacitat, C , la carrega, Q , i el voltatge, V queden definits d'acord amb la fórmula:

$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon_0 \frac{A}{h}$$

2.5 Materials piezoelèctrics

Al principi i durant els anys immediatament posteriors al descobriment de l'efecte piezoelèctric, els materials que s'estudiaven eren únicament d'origen natural, com el quars o la sal de Rochelle. A mesura que la investigació va anar avançant, van començar a treballar en la invenció de nous elements piezoelèctrics, dissenyats expressament per a treballar amb ells i sens dubte amb l'objectiu de trobar nous materials capaços de donar unes constants piezoelèctriques molt més positives de cara a la investigació.

Entre els nous materials creats per a aquest objectiu cal destacar les ceràmiques policristal·lines, molt emprades gràcies a la seva utilitat en diverses aplicacions. Elements com el titanat de bari (BaTiO_3), el titanat de plom (PbTiO_3) o el titanat-circinat de plom (PZT), formen part d'aquest conjunt. Un altre conjunt digne de mencionar són els polímers piezoelèctrics, el capdavanter dels quals i el més desenvolupat és el polifluorur de vinilidè (PVDF), material molt emprat gràcies a la seva gran flexibilitat, si tenim en compte la fragilitat dels materials ceràmics.



Quars



Turmalina



Nitrat de liti



Tantali de liti

2.6 Piezoelèctrics com a generadors d'energia

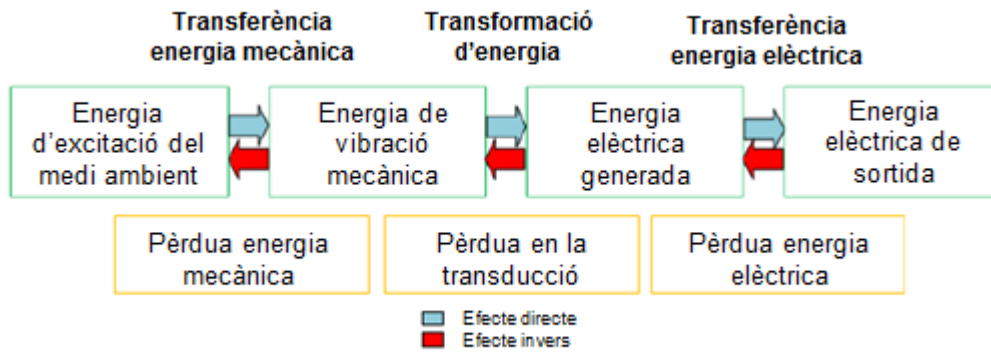
D'acord amb la presentació a l'apartat 4.5, el terme Energy Harvesting és la recollida d'energia residual de l'ambient. Aquesta energia es pot emmagatzemar com a energia elèctrica o bé, aprofitar-la per a consumir petits dispositius electrònics o elèctrics.

Les fonts d'energia ambientals identificades fins a l'actualitat són: les vibracions, la llum i els gradients de temperatura.

Els materials transductors de vibracions són els piezoelèctrics. Aquests tenen la qualitat física de transformar l'energia mecànica en energia elèctrica.

L'electrònica ens permet la transducció de la senyal sinodal de la sortida del piezoelèctric en un senyal emmagatzemable i preparat per alimentar els dispositius electrònics.

El diagrama de blocs del procés de transformació d'energia és:



[21]

El senyal elèctric que obtenim dels piezoelèctrics, i considerant el signe de la magnitud, és una ona bidireccional, amb polaritat de la magnitud positiva i negativa i canviant en el temps, és a dir, un senyal sinodal.

Si considerem la repetició del valor de la magnitud en el temps, és una funció no periòdica, és a dir, el valor que pren la funció és totalment arbitrari en el temps.



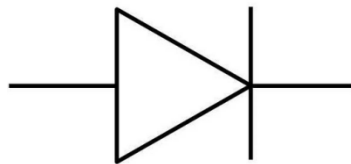
Exemple d'una funció d'ona no periòdica

Per tal d'emmagatzemar l'energia recol·lectada i/o alimentar als dispositius electrònics, hem de convertir el senyal sinodal (AC) en corrent continu (DC). Com que el senyal obtingut a la sortida del piezoelèctric és un senyal molt dèbil en intensitat, ens interessa que el circuit convertidor sigui el més fàcil possible, per tal de provocar la mínima caiguda de tensió.

Tot el posterior assaig l'he fet amb un pont rectificador d'ona completa i un condensador en paral·lel amb la càrrega, en aquest cas un LED.

L'element clau en el pont rectificador és el díode. El díode és un component electrònic semiconductor. És la unió de dos tipus de materials semiconductors, un tipus N i un altre tipus P. El seu funcionament pot ser en polarització directa i en polarització inversa.

En polarització directa, el díode condueix com un curt circuit i en polarització inversa, el corrent no travessa el díode i es comporta com un circuit obert.



La configuració del circuit electrònic conversor d'energia ha estat:

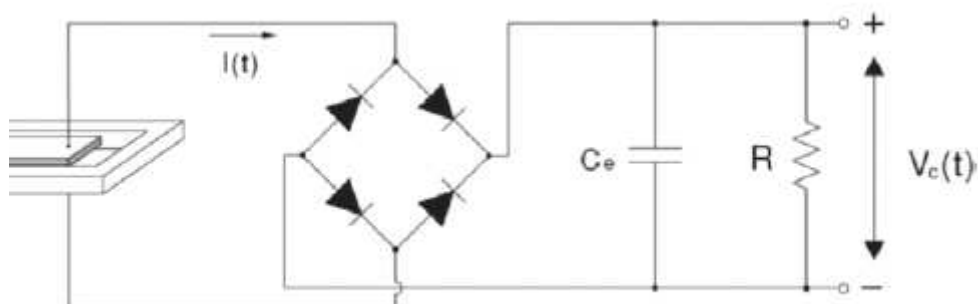


Fig.1 circuit electrònic amb pont rectificador d'ona completa i filtratge amb condensador.

El senyal sinodal a la sortida del piezoelèctric, el senyal rectificat d'ona completa a la sortida del pont rectificador i el senyal filtrat en bornes del condensador són:

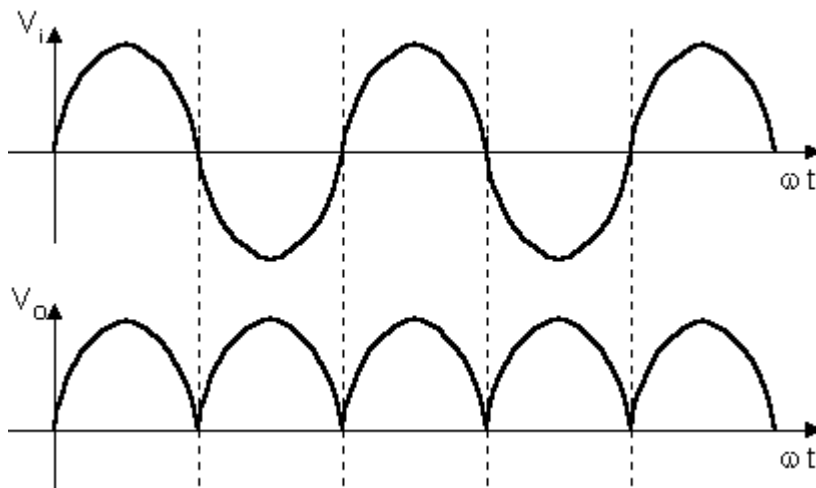


Fig.2 senyal sinodal rectificada d'ona completa, utilitzant pont de díodes.

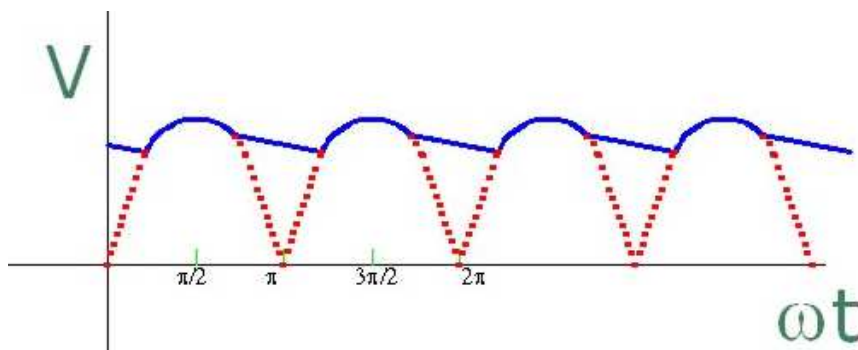


Fig.3 senyal rectificada i filtrada a la sortida del condensador.

2.7 Aplicacions i camps d'aplicacions

Malgrat els anys d'investigació i els fruits que ha generat, la piezoelectricitat és, encara avui dia, un recurs rarament conegut a la nostra societat. Una de les raons de pes amb la qual els científics justifiquen aquest desconeixement és que es tracta d'un camp complex. Amb això es refereixen al fet que, per molt que l'aparició de noves substàncies piezoelèctriques generin una àmplia gamma de possibilitats, això no vol dir que explotant aquestes possibilitats es generin una infinitat de productes que canviïn les nostres vides. El problema és que en el cas de la piezoelectricitat tant la demanda del mercat com la tecnologia d'empenta són importants factors interrelacionats, el que significa que els requisits tècnics i econòmics de les aplicacions noves fan difícil la relació del producte amb el comprador particular. No obstant això, a nivell de grans empreses s'estima un volum de negoci que actualment mou al voltant de milers de milions de dòlars (bilions de dòlars segons el sistema americà) a escala mundial. El ventall d'aplicacions derivades de la piezoelectricitat és molt ampli, i destaca especialment en importants camps com la comunicació, l'automatització industrial, el diagnòstic mèdic, el control de trànsit, i el pioner i ja anomenat camp militar.

Així doncs, i amb l'afany de mostrar la proximitat entre el món actual i la piezoelectricitat, faré una petita introducció a algunes aplicacions que usen l'efecte piezoelèctric. Realment la majoria d'aplicacions que funcionen per mitjà de la piezoelectricitat tenen una funció molt característica i dedicada únicament a processos tecnològics imperceptibles per al públic. És per això que en aquest apartat introduiré elements d'ús més aviat quotidià i propis del dia a dia, el que m'ajudarà posteriorment a introduir el camp en el que basaré l'estudi i la part pràctica d'aquest projecte.

2.7.1 Àmbit musical

Es tracta d'un camp conegut i senzill, i en el que els piezoelèctrics han tingut una gran importància ja des dels seus inicis, perquè, tal i com he dit a l'apartat històric d'aquest treball, una de les primeres utilitats que se l'hi va trobar a la

piezoelectricitat fou de fet una millora en el sistema del tocadiscs. Així doncs, a continuació anomenaré un seguit d'invents que funcionen per mitjà de l'efecte piezoelèctric.

2.7.1.1 Micròfon i altaveu

És de sobres conegut que la manera de funcionar d'un micròfon es basa en transformar les vibracions que emet la nostra veu en energia elèctrica, que posteriorment un altaveu rebrà i s'encarregarà de transformar un altre cop en energia sonora.

El micròfon rep unes ones sonores que fan vibrar un aparell anomenat diafragma, localitzat dins del micròfon. El moviment que realitza aquest diafragma fa que el material que conté a l'interior es mogui (en aquest cas un cristall piezoelèctric com pot ser el quars o la sal Rochelle), de manera que les partícules d'aquest cristall generen sobre la superfície del diafragma una tensió elèctrica. L'únic inconvenient que tenen aquest tipus de micròfons és que la seva resposta en freqüència és molt irregular, fet pel qual aquests aparells no són molt populars entre els professionals.

L'element receptor del corrent que envia el micròfon, l'altaveu, també pot utilitzar un sistema piezoelèctric, i a diferència del micròfon en aquest cas si que es tracta d'un producte molt apreciat pel comprador.

El funcionament és el mateix que el del micròfon però invers, i és considerat una molt bona opció dins del camp dels altaveus ja que és barat, senzill, capaç de funcionar amb molt poca potència elèctrica i òptim a l'hora de reproduir altes freqüències. El seu punt feble, però, són les freqüències baixes, fins a arribar al punt de ser incapaç de reproduir un cert rang d'aquestes. Tot i això, es troba entre les millors opcions d'altaveus del mercat i gaudeix d'un cert prestigi dins del gènere.

2.7.1.2 Pastilla piezoelèctrica

Sense marxar de l'àmbit musical, trobem en el cas dels instruments elèctrics una eina essencial a l'hora de fer-los sonar: la pastilla. Es tracta d'un transductor [22] que, dit de forma col·loquial, "electrifica" el so de l'instrument, tant en els instruments ja dissenyats i coneguts sota el nom d'instruments elèctrics (guitarra elèctrica, baix elèctric, violí elèctric...), com amb tota la resta d'instruments, transformant el seu so normal en un so propi dels instruments elèctrics.

Aquestes elements són molt apreciats en aquest àmbit degut al gran rendiment i al bon resultat que ofereixen. Tot i això, els transductors piezoelèctrics no estan limitats a aquesta utilitat ni a aquest àmbit, els acceleròmetres o els comandaments a distància són exemples d'altres aplicacions en les que trobem aquests transductors.

Actualment, però, el nombre d'aparells en què trobem transductors piezoelèctrics és reduït, ja que existeixen moltes altres alternatives en elements transductors, i els piezoelèctrics no estan prou desenvolupats encara com per a fer-los front. En la següent taula podem veure les característiques de diferents tipus de transductors, incloent els piezoelèctrics, i observem clarament com no són una de les millors opcions en la majoria de característiques.

2.7.2 Sistemes mecànics

2.7.2.1 Injectors mecànics

Es tracta de l'element que s'encarrega d'injectar el Diesel al motor per a generar la combustió i d'aquesta forma fer moure el pistó. En aquest cas, a l'interior de l'injector hi trobem un dispositiu piezoelèctric, que és el que genera el moviment mecànic que permet la injecció del combustible.

El dispositiu piezoelèctric que es troba localitzat a l'interior de l'injector està format per plaques metàl·liques separades per quars, que és l'element piezoelèctric.

En el moment en què la injecció ha de tenir lloc, s'aplica una tensió de setanta volts sobre les plaques del dispositiu piezoelèctric de manera que el material pròpiament piezoelèctric del dispositiu (el quars) es contrau, i fa que la distància entre plaques metàl·liques sigui més petita, i obre la vàlvula que possibilita la inserció del Diesel [23]. Acte seguit, i un cop el Diesel ha estat subministrat, l'injector realitza un curtcircuit entre els terminals de connexió, i fa que el piezoelèctric (que anteriorment s'havia carregat fins a setanta volts a mode de condensador) es descarregui, expandint el mecanisme del dispositiu i tancant la vàlvula.

2.7.3 Generadors piezoelèctrics

I arribem finalment al camp d'interès per al treball, un camp que està sent objecte de múltiples estudis actuals i que de segur en un futur no molt llunyà presentarà fruits molt importants. L'objectiu del treball, com ja he dit, serà estudiar la capacitat generadora dels piezoelèctrics, i a l'hora la capacitat de recollir i emmagatzemar l'energia que un generador piezoelèctric proporioni, i fer una primera comprovació de si realment aquesta funció dels piezoelèctrics és viable.

Dins de l'àmbit de la generació piezoelèctrica podem diferenciar dos tipus diferents de generadors, de capa simple o de múltiple capa, tot i que el seu funcionament és generalment el mateix: en activar mecànicament una ceràmica piezoelèctrica per mitjà de pressió, aquesta genera un voltatge elèctric suficient per crear una espurna. Depenent del tipus de generador que hi hagi entre els dos anteriorment anomenats, el voltatge i el corrent variaran.

2.7.3.1 Generadors de simple capa

Els generadors de simple capa es caracteritzen per una alta tensió, però amb un corrent molt baix. Tot i ser petits i senzills, disposen d'una gran autonomia i

gairebé no necessiten de manteniment. Un bon exemple dels generadors de capa simple són els encenedors més moderns, els que en comptes de funcionar fent rodar la pedra, s'encenen prement un simple botó. El funcionament és simple: En aplicar una pressió sobre el botó, l'element de ceràmica produeix un voltatge que genera una petita espurna i que serveix per encendre el combustible.

2.7.3.2 Generadors de múltiple capa

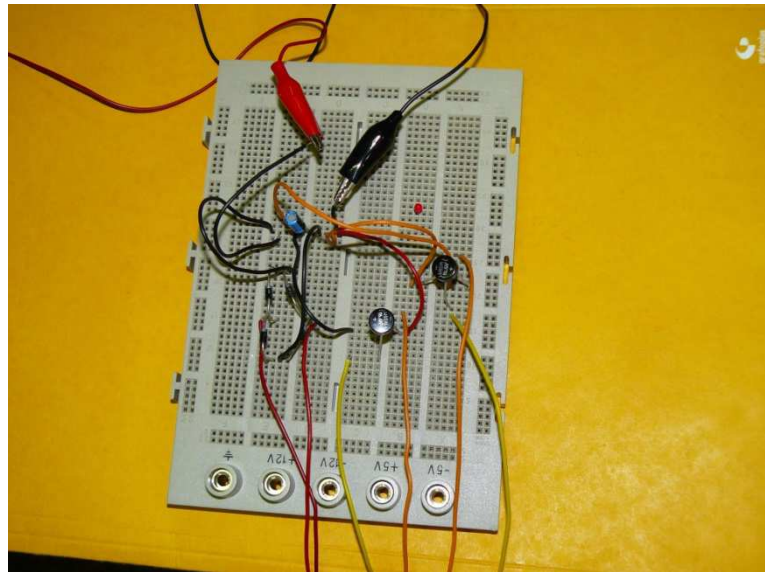
Els generadors de múltiple capa estan formats per un conjunt de plaques apilonades i alternades amb elèctrodes. El voltatge que generen és molt més baix que el dels generadors de simple capa, però el corrent és significativament més gran. A més, el fet que no produeixen interferències electromagnètiques els converteix en excel·lents bateries d'estat sòlid per a circuits electrònics.

2.8 Resum fonaments teòrics

Podem veure doncs que la piezoelectricitat, tot i la desconeixença del concepte per part de la gran majoria de la població, és un element considerablement present en la nostra vida. Després d'aquest apartat penso que s'entenen més clarament les xifres que he mencionat a l'inici d'aquest punt, on he parlat de milers de milions de dòlars. Tot i això, les opcions d'investigació i descobriment que ens ofereix la piezoelectricitat no estan ni de bon tros saturades, i tots els descobriments que puguin aparèixer en un futur proper, només poden calcular-se per mitjà d'hipòtesis i suposicions aproximades.

Aquesta última secció de l'apartat, la generació piezoelèctrica, em serveix per introduir la segona part del treball, la part pràctica. Tal i com veurem a continuació la part pràctica comença amb l'estudi de les constants relacionades amb la generació del material piezoelèctric. Abans de donar pas a aquesta part pràctica només cal afegir que, per tema de disponibilitat dels materials piezoelèctrics, hem treballat amb generadors de simple capa, el que significa que no tindrem problema amb la tensió generada, però que sí que el tindrem amb la intensitat del corrent generat pel piezoelèctric, la qual cosa significa que haurem de buscar-hi una solució.

3. PART EXPERIMENTAL



3.1 Estudi de la petjada humana

Abans de començar a experimentar amb el material piezoelèctric, he d'estudiar l'element que realitzarà la pressió sobre el sensor. Tal i com he presentat amb anterioritat en el treball, una de les funcions que desprèn més energia mecànica és caminar o córrer; per tant, he considerat que l'element que efectuarà la pressió i per tant l'objecte d'estudi d'aquest apartat serà la petjada humana.

Primerament he buscat informació a internet relacionada amb la petjada i la seva pressió. Segons un article científic anomenat *Low-power Electronics Desing* (Starner&Paradiso, New York, 2004), el pes estàndard que s'utilitza en estudis científics és de 68 kg amb un percentatge de greix corporal del 15%, i equival a 384 MJ.

Seguidament he considerat necessari per al meu treball identificar com és la petjada humana i conèixer la distribució de les pressions en la planta del peu. Per a fer-ho he comptat amb l'ajuda d'una professional en l'àmbit, la Dra. Consol Cavallé, podòloga. A la seva consulta he pogut realitzar un estudi baropodomètric del meu peu (ja que jo realitzaré les proves de la part pràctica). En aquest estudi i mitjançant una plataforma de pressions, he obtingut una anàlisi de les pressions que exerceix el meu peu vers la plataforma i quines són les superfícies de contacte, amb gradients de pressió.



Aquests han estat els resultats obtinguts :

Alçada: 1.90 m

Pes: 80 kg

Número de peu: 45

Superfície contacte avantpeu: 73-68 cm²

Pressió màxima: 1442 gr/cm²

Pressió mitjà: 990 gr/cm²

He decidit no considerar la freqüència que donava l'estudi (2,73 s) perquè no es va realitzar en condicions normals. Per contra, he decidit usar una freqüència de pas al caminar de 2 segons per passa, més adequada a la realitat. Pel que fa a la zona del peu que he considerat per a treballar, l'avantpeu, ha estat per les següents raons:

Primerament és una de les dues zones del peu en què s'observa una major pressió al caminar, juntament amb el taló. Tot i això i coneixent les mides dels sensors PZT piezoelèctrics, he considerat que la superfície de pressió de l'avantpeu s'adaptava perfectament a la mida de dos sensors. Així doncs he decidit situar els sensors sota l'avantpeu a l'hora de realitzar la part pràctica ja que penso que és la situació que donarà la màxima eficiència.

NOTA: Per a poder apreciar l'estudi baropodomètric sencer, l'he adjuntat als annexos del projecte en el seu format original.

3.2 Constants i característiques del material piezoelèctric lliurades pel fabricant

Per a realitzar la part pràctica vaig comprar sensors piezoelèctrics model 27EE45 de la casa *Ariston*. En aquesta taula proporcionada per l'empresa fabricant i distribuïdora dels sensors podem apreciar les característiques d'aquest model de sensor piezoelèctric.

Código	Frecuencia Hz \pm 500	Dimensiones en mm				Fig n°
		D	d	a	c	
20 EE 35	3.500	20,0	14,0	0,2	0,20	1
20 EE 45	4.500	20,0	15,0	0,12	0,26	1
20 EE 63	6.300	20,0	14,0	0,2	0,20	1
20 EE 65	6.500	20,0	14,0	0,2	0,20	1
20 EF 35	3.500	20,0	14,0	0,4	0,20	2
20 EF 65	6.500	20,0	14,0	0,2	0,20	2
27 EE 28	2.800	27,0	19,0	0,2	0,15	1
27 EE 30	3.000	27,0	14,0	0,2	0,20	1
27 EE 35	3.500	27,0	19,0	0,2	0,20	1
27 EE 41	4.100	27,0	19,0	0,2	0,22	1
27 EE 45	4.500	27,0	19,0	0,5	0,30	1
27 EF 28	2.800	27,0	19,0	3,5	0,20	2
27 EF 41	4.100	27,0	19,0	0,5	0,30	2
27 EF 45	4.500	27,0	19,0	0,5	0,30	2

Sin electrodo de realimentación

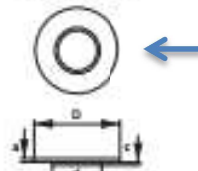


Figura 1

Con electrodo de realimentación

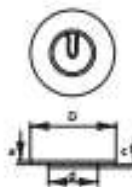


Figura 2

[24] Taula models piezoelèctrics marca Ariston

Per a confirmar aquestes característiques i trobar altres constants, vaig anar al laboratori d'electrònica de la Universitat de Vic on vaig poder comptar amb eines molt precises que em van facilitar dades que no hauria pogut aconseguir d'altra manera. Una d'aquestes eines fou l'oscil·loscopi.

Un oscil·loscopi és una eina de mesura electrònica que mostra gràfics en dues dimensions d'una o varies diferències de potencial. Els gràfics que utilitza l'oscil·loscopi acostumen a venir definits pel temps a l'eix X i el voltatge a l'eix Y. Segons ens convingui, podem modificar l'escala tant de l'eix X com de l'eix Y per a poder veure els pics que desitgem de forma més precisa.

Nota: Les imatges dels circuits han estat realitzades amb una combinació de Paint i un programa específic per a la realització de circuits elèctrics anomenat *Quite Universal Circuit Simulator*.

3.3 Experimentació

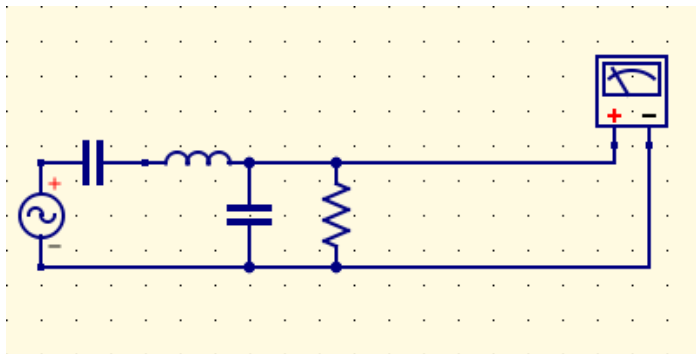
3.3.1 Pràctica primera

Objectiu: Estudi de la tensió generada per un únic sensor piezoelèctric al ser sotmès a una pressió qualsevol. En aquest cas la realitzarem pressionant el sensor amb el dit polze.

Material:

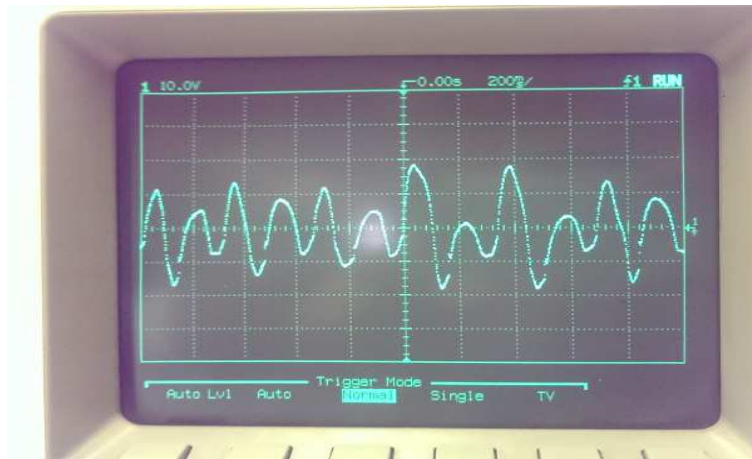
1. Sensor piezoelèctric
2. Oscil·loscopi (Eix OX: 200 ms; Eix OY: 10.0 V)
3. Cablejat
4. Material de soldadura (Estany i soldador)

Circuit electrònic equivalent:



Resultats: Obtenim un senyal en forma d'ona bidireccional, polaritat de la magnitud positiva i negativa, i no periòdica, és a dir, la magnitud de la funció pren el valor en funció de la pressió exercida i el coeficient de deformació piezoelèctrica.

Obtenim uns valors de tensió de cresta a cresta de gairebé 40 Volts i una tensió cresta de 19 Volts.



Conclusions:

1. Obtinc una ona sinodal amb un valor de tensió pic molt interessant per l'objectiu de l'experiment, la recollida d'energia.
2. El senyal de sortida del piezoelèctric és sinodal, per tant necessitaré transformar-lo en senyal continu si vull emmagatzemar l'energia mitjançant bateries, o bé utilitzar-la per alimentar sistemes d'enllumenat LED.
3. La tensió que es genera és directament proporcional a la pressió que s'exerceix sobre el sensor i d'acord amb la teoria ja exposada. El nivell de tensió generat vindrà determinat per les característiques dels piezoelèctrics, més concretament pel seu coeficient de deformació i la pressió exercida.
4. Identifico que l'acoblament de piezoelèctrics en paral·lel o en sèrie abans de rectificar el seu senyal és inviable. Sinó som capaços de proporcionar la mateixa deformació a tots els piezoelèctrics per tal d'obtenir un senyal amb la mateixa sincronització, obtindrem un senyal resultant de les magnituds positives i negatives, amb la qual cosa es neutralitzaran les unes a les altres.

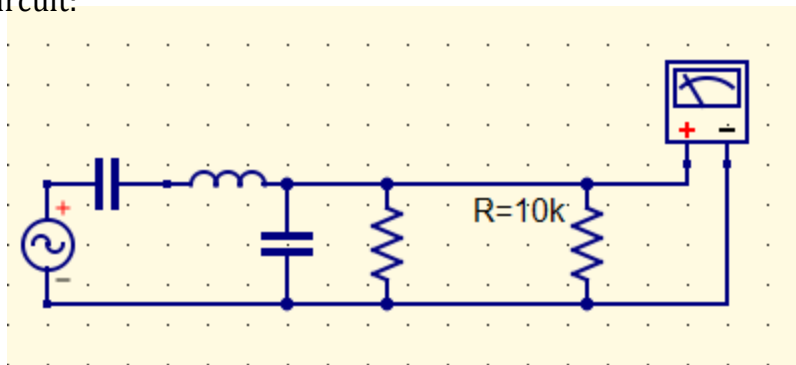
3.3.2 Pràctica segona

Objectiu: Estudi de la tensió generada per un únic sensor piezoelèctric al ser sotmès a una pressió qualsevol i a l'incorporar una resistència externa al circuit.

Material:

1. Sensor piezoelèctric
2. Resistència 10k Ω
3. Oscil·loscopi (Eix OX: 200 ms; Eix OY: 1.0 V)
4. Material de soldadura (Estany i soldador)

Circuit:



Resultats: Obtinc un senyal sinodal amb una tensió de cresta a cresta de com a màxim ± 1 V.

Conclusions:

1. L'energia generada pel piezoelèctric és insuficient per a energitzar un circuit electrònic amb resistència, i s'obté una tensió insuficient per alimentar un díode rectificador, amb una caiguda de tensió de 0,7 Volts.
2. El piezoelèctric genera un senyal sinodal amb uns valors absoluts de tensió interessant per a treballar, però amb una intensitat de molt poc valor.

3. El material piezoelèctric amb el que treballem no està preparat per l'ús que li estem donant. Són piezoelèctrics PZT, habitualment ubicats en els rellotges com a dispositiu d'alarma acústica. La placa de ceràmica dels piezoelèctrics és molt dèbil, tant per generar una energia suficient per a treballar i gestionar en un circuit electrònic, com per a suportar els esforços mecànics a què la faig treballar.
4. És habitual que després d'exercir varies proves la placa de ceràmica acabi destrossada i esmicolada.

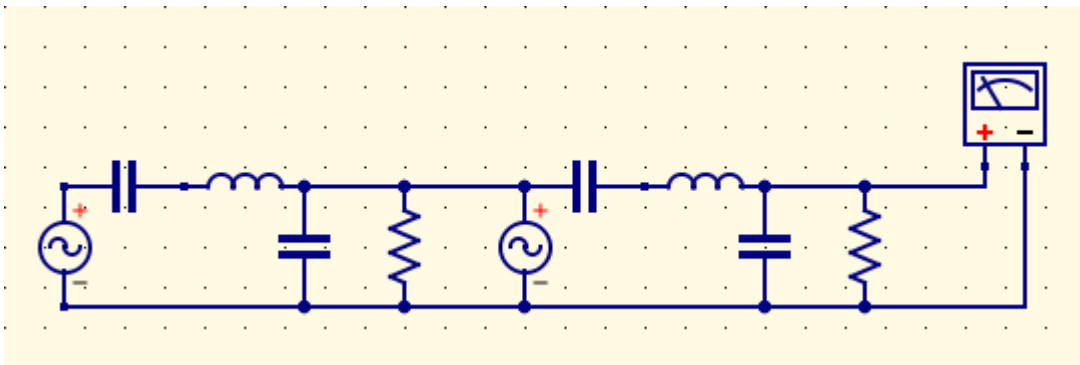
3.3.3 Pràctica tercera

Objectiu: Estudi de la tensió generada per dos sensors piezoelèctrics connectats en paral·lel al ser sotmesos a pressió en el mateix moment.

Material:

1. Dos sensors piezoelèctrics
2. Oscil·loscopi
3. Cablejat
4. Material de soldadura (Estany i soldador)

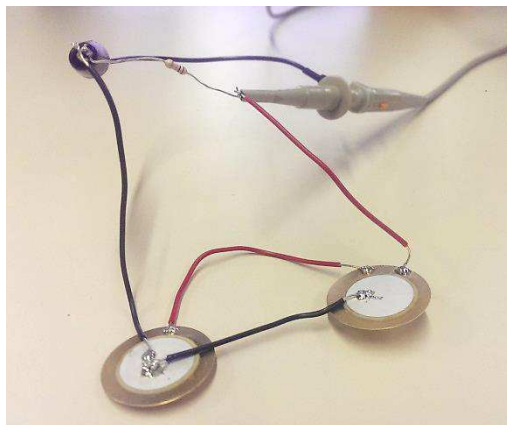
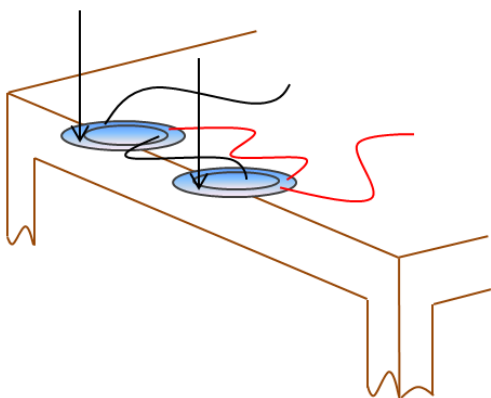
Circuit:



Resultats: Obtinc un senyal sinodal bidireccional i no periòdic, amb una tensió de cresta a cresta màxima de ± 20 V.

Observacions: En aquesta experiència era molt important ser capaços de pressionar alhora i amb una força aproximadament igual els dos sensors, i per tant els hem situat sobre la vora de la taula, de forma que mig sensor quedava fixat a la taula i l'altre quedava lliure a l'aire. Així doncs, en aquest cas, al pressionar el piezoelèctric hem realitzat un moviment de flexió que, sense esperar-ho, ha estat capaç de generar

molta més tensió (ja que després hem provat de realitzar aquest procés però amb un únic sensor, i hem aconseguit arribar fins a pics de ± 50 V).



Conclusions :

1. Confirmem que al connectar dos sensors en paral·lel obtenim el mateix voltatge que al pressionar-ne només un. És gairebé impossible aplicar la mateixa pressió per tal d'obtenir el mateix senyal de tensió sincronitzat per addicionar les magnituds.
2. A l'efectuar un moviment de flexió sobre el sensor piezoelèctric, la tensió de sortida és més alta, fet degut probablement a que l'estructura cristal·lina del piezoelèctric es veu sotmesa a una major deformació. A més deformació de la placa ceràmica, més tensió obtenim del piezoelèctric.
3. L'inconvenient que hem trobat al realitzar un moviment de flexió sobre el sensor és que les soldadures amb el cablejat, fetes amb estany, eren massa rígides i no suportaven la flexibilitat del moviment, i per això es trencaven i ocasionaven l'apertura del circuit, i per tant la inhibició de l'element generador. Així doncs hem vist que haurem de buscar una alternativa per a les soldadures, molt més flexible que l'estany.

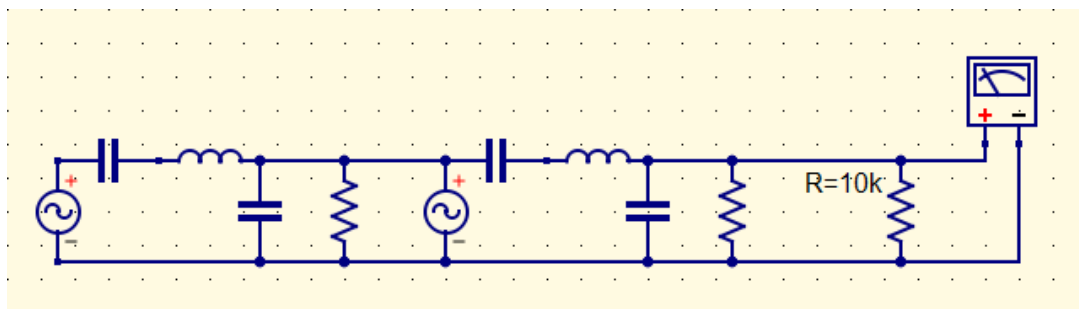
3.3.4 Pràctica quarta

Objectiu: Estudi de la tensió generada per dos sensors piezoelèctrics connectats en paral·lel al ser sotmesos a una pressió qualsevol i a l'incorporar una resistència externa al circuit.

Material:

1. Dos sensors piezoelèctrics
2. Resistència 10k Ω
3. Oscil·loscopi
4. Cablejat
5. Material de soldadura (Estany i soldador)

Circuit:



Resultats: Obtinc un senyal sinodal bidireccional i no periòdic, amb una tensió de cresta a cresta màxima de ± 4 V.

Conclusions:

1. La intensitat generada per cada piezoelèctric és addicionada i per tan s'obté una intensitat que sí dona esperances de recol·lectar energia dels materials piezoelèctrics. Suma de les intensitats.

2. Al connectar una resistència, la intensitat generada és insuficient per alimentar un circuit electrònic.
3. S'obté un nivell de tensió en bornes de la resistència superior a la segona pràctica.
4. L'energia generada per la configuració dels piezoelèctrics és suficient per a energitzar un circuit electrònic amb resistència. En aquesta pràctica, s'obté una tensió suficient per alimentar un díode rectificador, amb una caiguda de tensió de 0,7 Volts.

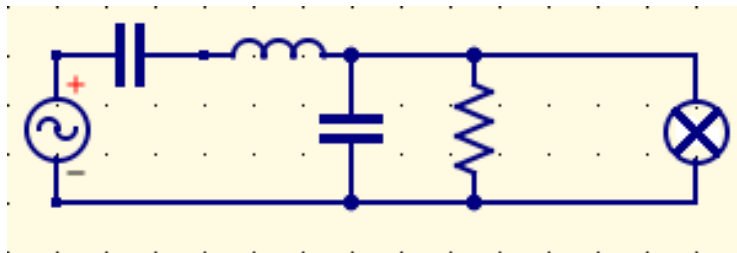
3.3.5 Pràctica cinquena

Objectiu: Comprovació de la capacitat d'un circuit amb dos sensors piezoelèctrics connectats en paral·lel per estimular un receptor, en aquest cas un díode LED.

Material:

1. Dos sensors piezoelèctrics
2. Díode LED
3. Cablejat
4. Material de soldadura (Estany i soldador)

Circuit:



Resultats: El sistema és incapaç d'estimular el LED, ja que els valors absoluts dels paràmetres de sortida de la font generadora, en aquest cas els dos piezoelèctrics, són insuficients per excitar el díode LED. No s'obté ni tensió llindar ni la intensitat mínima d'excitació del díode LED.

Conclusions:

1. La tensió de sortida dels sensors no arriba a la tensió llindar del LED.
2. La resistència interna del LED fa davallar la tensió de sortida del sistema generador, els piezoelèctrics. No s'obtenen les variables suficients pe alimentar el díode LED, ni tensió llindar ni intensitat nominal, al voltant de 20 mA.

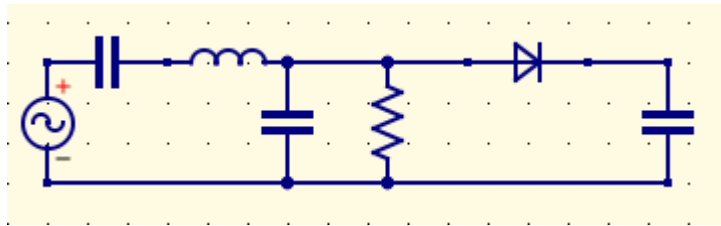
3.3.6 Pràctica sisena

Objectiu: Comprovar la capacitat d'un únic sensor piezoelèctric de carregar un condensador. Per a poder carregar el condensador abans hem de transformar el senyal de corrent altern del generador en un senyal de corrent continu, i ho farem amb un díode.

Material:

1. Sensor piezoelèctric
2. Condensador electrolítics de 16 V i 10 microfarads.
3. Díode
4. Voltímetre
5. Cablejat
6. Material de soldadura (Estany i soldador)

Circuit:



Resultats: Gràcies al díode obtenim un senyal de sortida contínua. Efectuant la pressió amb el polze, aconseguim carregar amb un breu període de temps el condensador fins a gairebé la meitat de la seva capacitat.

Conclusions:

1. Degut a que encara no comptem amb un element de soldadura alternatiu, seguim treballant amb estany. Per això en aquesta experiència no podem treure altra conclusió que l'afirmació que **sí** que es pot carregar un condensador amb un sensor piezoelèctric. Més endavant i quan comptem amb un material de soldadura flexible,

buscarem formes d'estimular el sensor de manera que carregui més ràpidament i amb més capacitat el condensador.

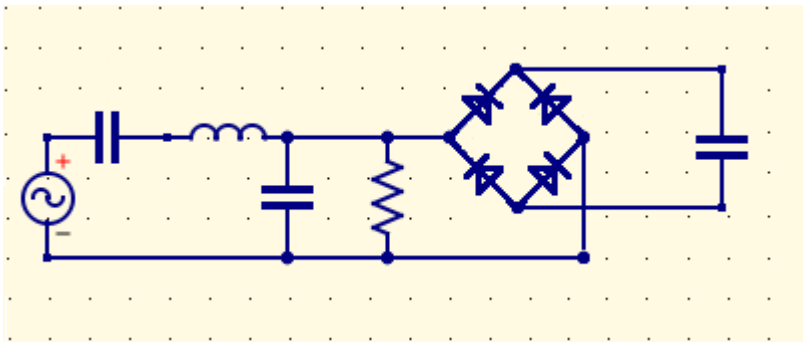
3.3.7 Pràctica setena

Objectiu: Estudi de la generació de tensió d'un circuit format per un únic sensor piezoelèctric i un pont rectificador, al ser sotmesos a la pressió efectuada per la petjada d'una persona. Se substitueix la soldadura i es fixa el material piezoelèctric amb els elèctrodes mitjançant cinta americana. Els piezoelèctrics són ubicats en una base flexible.

Material:

1. Sensor piezoelèctric
2. Quatre díodes (Pont rectificador)
3. Condensador electrolític de 16 V i 10 microfarads.
4. Voltímetre
5. Cablejat
6. Material de soldadura (Cinta americana)

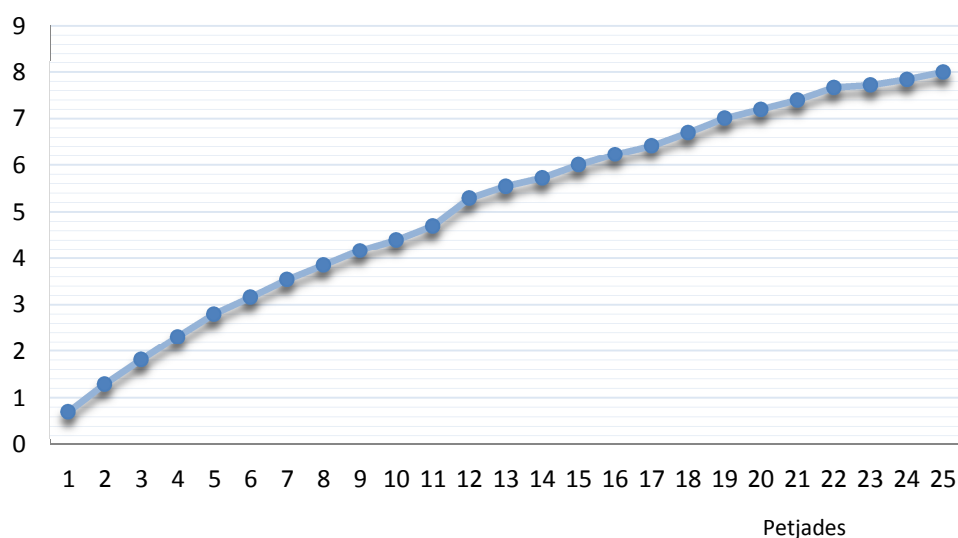
Circuit:



Resultats: Gràcies al pont rectificador d'ona completa, format per quatre díodes, aconseguim un senyal de sortida rectificat continu. Aconseguim carregar el condensador fins a la meitat de la seva capacitat amb 25 petjades, comprovant que al realitzar l'experiència amb la pressió de tot el cos en comptes de la del dit polze, i al usar un pont rectificador en comptes d'un únic díode, la càrrega del condensador és molt més ràpida.

N. Pressions	Voltatge (V)	N. Pressions	Voltatge (V)	N. Pressions	Voltatge (V)	N. Pressions	Voltatge (V)
1	0,7	8	3,85	15	6	22	7,67
2	1,29	9	4,17	16	6,23	23	7,72
3	1,81	10	4,4	17	6,42	24	7,84
4	2,31	11	4,7	18	6,7	25	8
5	2,8	12	5,29	19	7,01		
6	3,16	13	5,54	20	7,2		
7	3,54	14	5,72	21	7,4		

Voltatge (V)



Observacions: Hem començat treballant amb un moviment de flexió sobre els sensors damunt una base flexible, amb l'objectiu de cercar la màxima flexibilitat dels piezoelèctrics. Tot i això al cap de pocs minuts ens hem adonat que l'augment de tensió era cada cop menys apreciable, i al desenganxar la cinta americana del sensor, hem pogut comprovar que el sensor piezoelèctric és massa rígid per a suportar flexió durant tanta estona seguida.

Tal i com passava amb les soldadures d'estany, el material ceràmic s'ha aixafat en molts bocins i s'ha anul·lant l'efecte piezoelèctric. Així doncs hem considerat seguir treballant com a l'inici de la part pràctica, pressionant els sensors contra una superfície dura (el terra en aquest cas) però mantenint les soldadures realitzades amb cinta americana, ja que si haguéssim seguit treballant amb soldadures d'estany, el sistema s'hagués malmès a l'aplicar la pressió amb la petjada.

Conclusions:

1. Podem observar un augment progressiu del voltatge acumulat a mesura que realitzem petjades.
2. Sembla que la progressió vagi corbant-se lleugerament, tendint cap a un nombre que probablement és el límit de capacitat del condensador, però també hem de considerar la fatiga del material piezoelèctric, així com la ineficiència del sistema implementat.

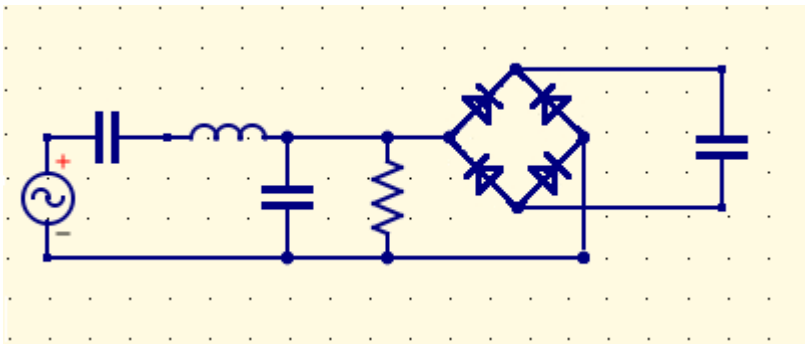
3.3.8 Pràctica vuitena

Objectiu: Conèixer el nombre de petjades necessàries per a que un únic sensor piezoelèctric pugui carregar un condensador electrolític de 16 V i una capacitat de 10 microfarads fins a, aproximadament, la seva màxima capacitat.

Material:

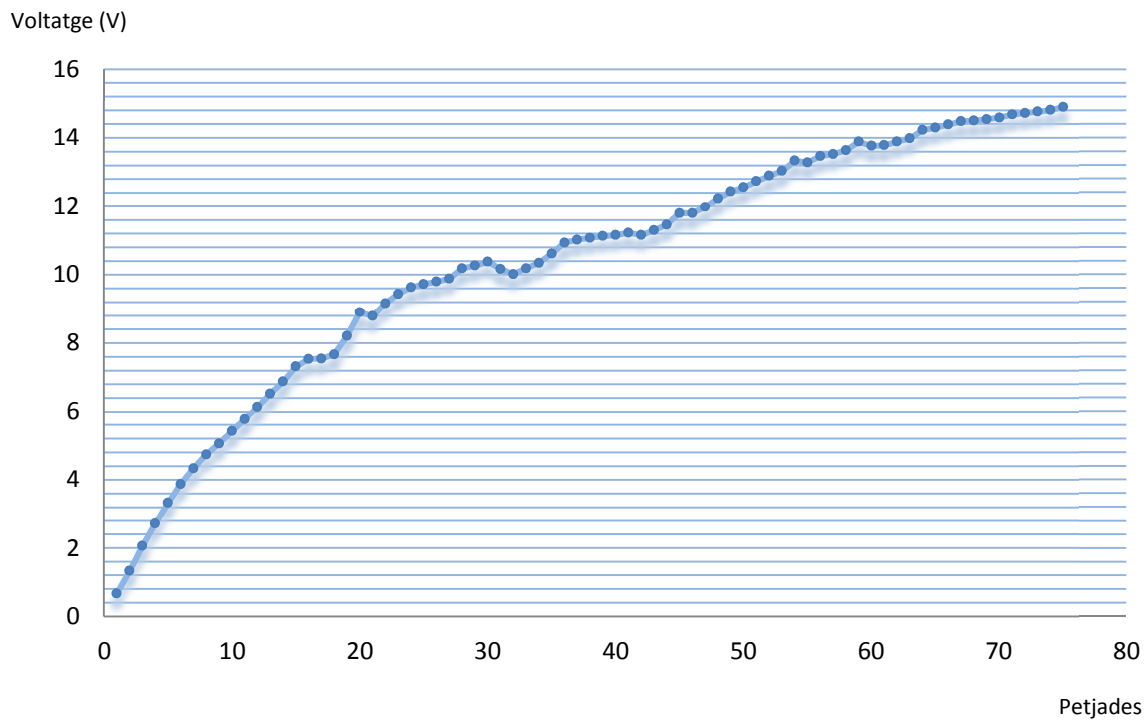
1. Sensor piezoelèctric
2. Quatre díodes (Pont rectificador)
3. Condensador electrolític de 16 V i 10 microfarads.
4. Voltímetre
5. Cablejat
6. Material de soldadura (Cinta americana)

Circuit:



Resultats:

N. Pressions	Volatge (V)	N. Pressions	Volatge (V)	N. Pressions	Volatge (V)	N. Pressions	Volatge (V)
1	0,67	21	8,79	41	11,23	61	13,79
2	1,33	22	9,17	42	11,16	62	13,89
3	2,06	23	9,44	43	11,3	63	13,99
4	2,72	24	9,63	44	11,46	64	14,23
5	3,33	25	9,73	45	11,8	65	14,3
6	3,88	26	9,8	46	11,8	66	14,39
7	4,34	27	9,89	47	11,98	67	14,48
8	4,74	28	10,19	48	12,24	68	14,5
9	5,06	29	10,27	49	12,44	69	14,54
10	5,42	30	10,38	50	12,56	70	14,59
11	5,77	31	10,17	51	12,74	71	14,68
12	6,14	32	10,02	52	12,9	72	14,72
13	6,53	33	10,19	53	13,04	73	14,76
14	6,88	34	10,35	54	13,34	74	14,81
15	7,32	35	10,62	55	13,29	75	15,01
16	7,54	36	10,94	56	13,47		
17	7,55	37	11,02	57	13,53		
18	7,67	38	11,08	58	13,64		
19	8,21	39	11,13	59	13,89		
20	8,9	40	11,16	60	13,77		



Conclusions:

1. Amb un sol piezoelèctric necessitem vora unes 80 petjades per carregar el condensador electrolític de 16 V i una capacitat de 10 microfarads.

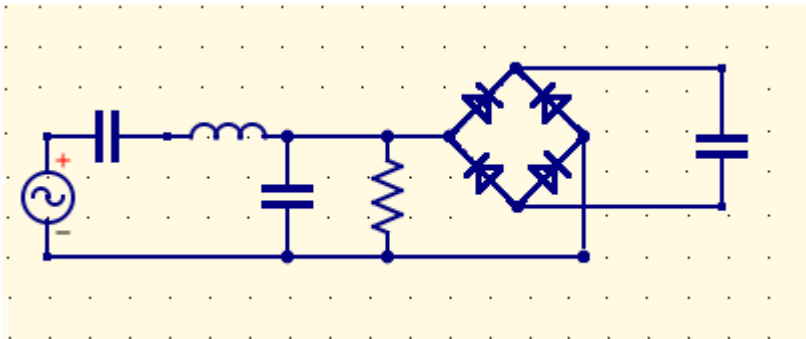
3.3.9 Pràctica novena

Objectiu: Estudi d'una situació real de petjada sobre un únic sensor piezoelèctric, amb una freqüència d'1 petjada cada 2 segons. Càlcul de les petjades necessàries per arribar a la màxima capacitat del condensador.

Material:

1. Sensor piezoelèctric
2. Quatre díodes (Pont rectificador)
3. Condensador electrolític de 16 V i una capacitat de 10 microfaradis.
4. Cronòmetre
5. Voltímetre
6. Cablejat
7. Material de soldadura (Cinta americana)

Circuit:

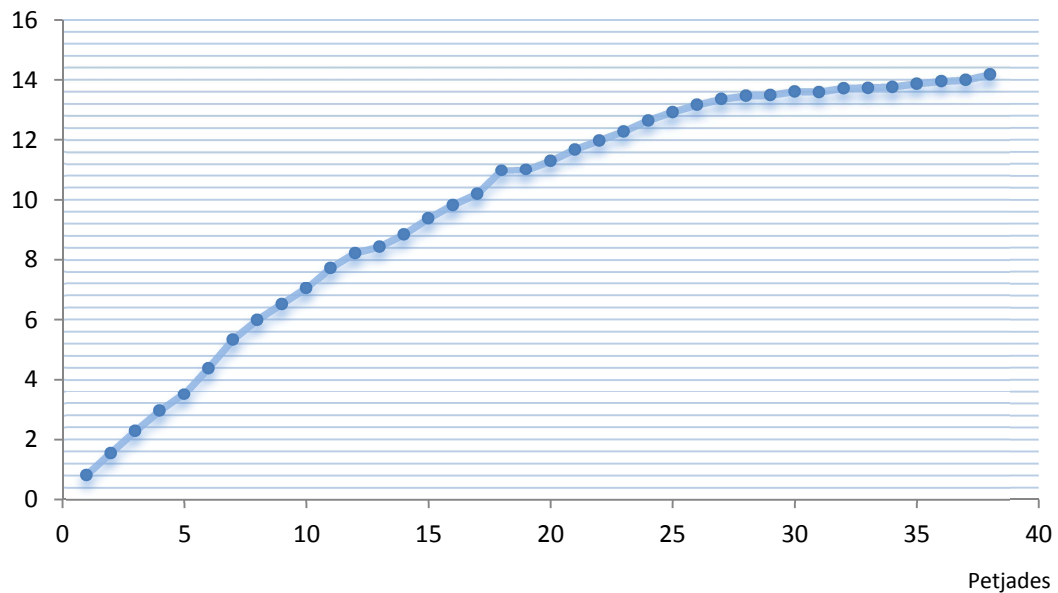


Resultats: Hem realitzat el procediment dos cops, per aconseguir una millor precisió.

1r cop:

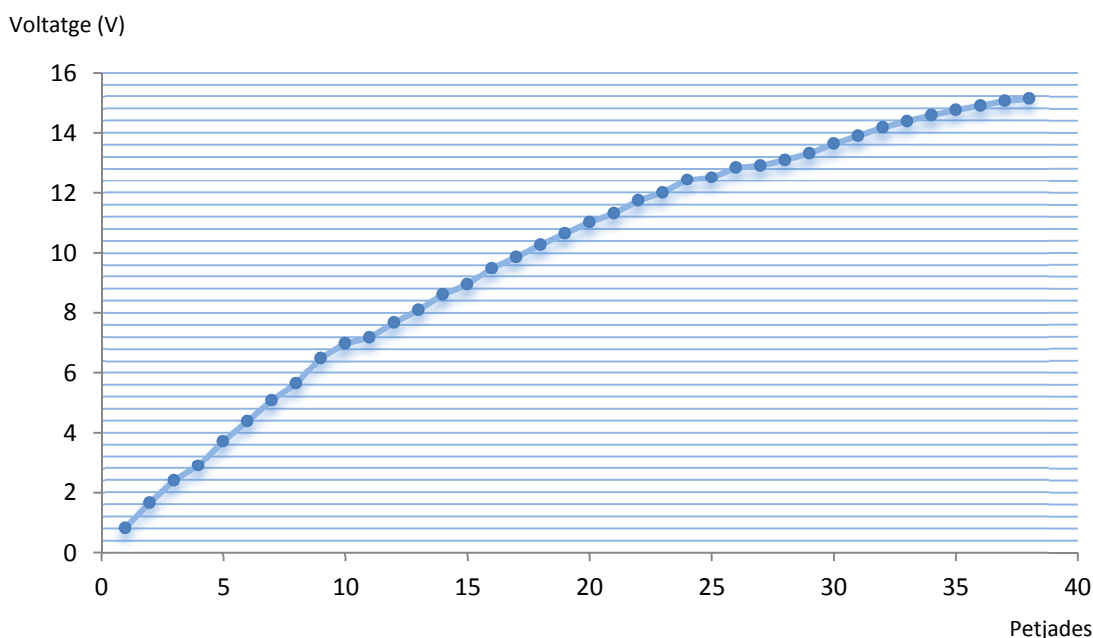
N. Pressions	Voltatge (V)	N. Pressions	Voltatge (V)	N. Pressions	Voltatge (V)	N. Pressions	Voltatge (V)
1	0,82	11	7,74	21	11,69	31	13,59
2	1,55	12	8,23	22	11,99	32	13,72
3	2,28	13	8,44	23	12,29	33	13,73
4	2,95	14	8,85	24	12,65	34	13,76
5	3,51	15	9,38	25	12,93	35	13,87
6	4,39	16	9,82	26	13,17	36	13,95
7	5,34	17	10,19	27	13,36	37	13,99
8	5,99	18	10,98	28	13,47	38	14,17
9	6,51	19	11,01	29	13,49		
10	7,04	20	11,31	30	13,61		

Voltatge (V)



2n cop:

N. Pressions	Voltatge (V)	N. Pressions	Voltatge (V)	N. Pressions	Voltatge (V)	N. Pressions	Voltatge (V)
1	0,82	11	7,19	21	11,31	31	13,9
2	1,65	12	7,68	22	11,74	32	14,17
3	2,39	13	8,1	23	12	33	14,38
4	2,89	14	8,61	24	12,43	34	14,58
5	3,71	15	8,94	25	12,51	35	14,75
6	4,38	16	9,5	26	12,85	36	14,89
7	5,08	17	9,87	27	12,91	37	15,05
8	5,64	18	10,28	28	13,1	38	15,12
9	6,51	19	10,65	29	13,32		
10	7	20	11,02	30	13,64		



Conclusions:

1. He aconseguit carregar el condensador electrolític només amb 40 petjades, és a dir , he carregat el condensador en un temps de 80 segons. Tot i que l'energia obtinguda és insuficient per donar continuïtat a un circuit electrònic, he aconseguit recol·lectar i emmagatzemar l'energia generada pel piezoelèctric en un condensador.
2. He comprovat el correcte funcionament del diagrama de transformació d'energia mecànica a elèctrica plantejat en l'aparta de fonaments teòrics.

3. Observant les gràfiques i considerant que les petjades les ha realitzat una mateixa persona, jo, podem comprovar la gran dificultat d'obtenir els mateixos resultats i magnituds de la senyal sinodal del transductor piezoelèctric.

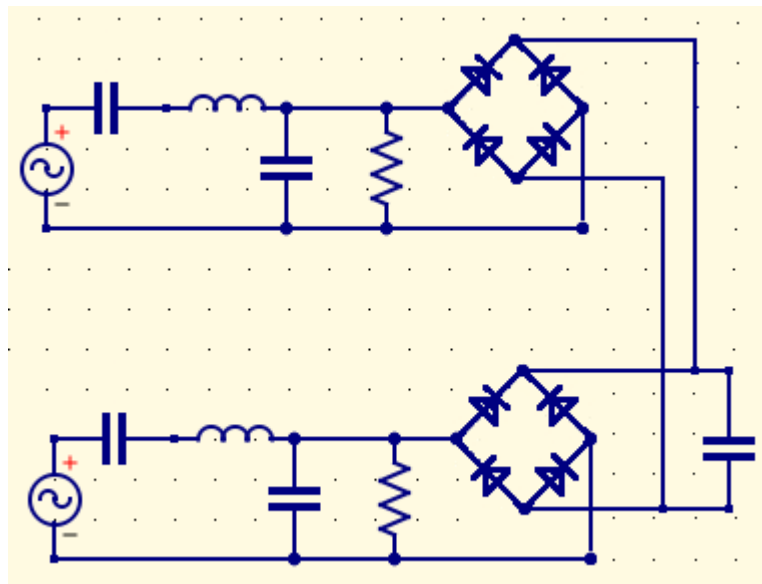
3.3.10 Pràctica desena

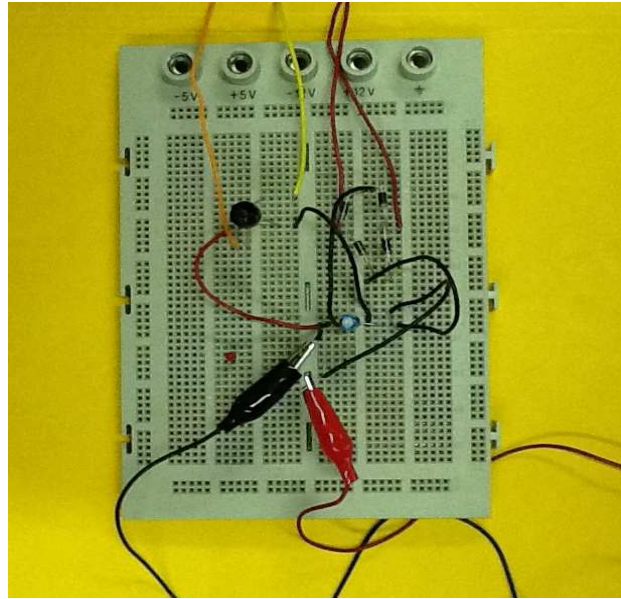
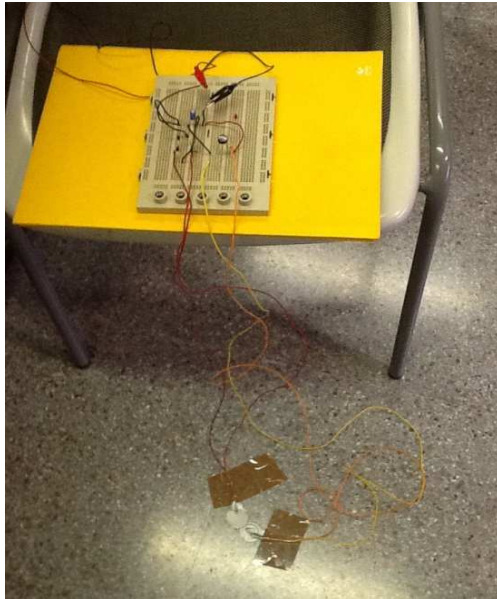
Objectiu: Estudi d'una situació real de petjada sobre un sistema de generació format per dos sensors piezoelèctrics independents, amb una freqüència d'1 petjada cada 2 segons. Càlcul de les petjades necessàries per a arribar a la màxima capacitat del condensador.

Material:

1. Dos sensors piezoelèctrics
2. Dos ponts rectificadors
3. Condensador electrolític de 16 V i 10 microfarads.
4. Cronòmetre
5. Voltímetre
6. Cablejat
7. Material de soldadura (Cinta americana)

Circuit:





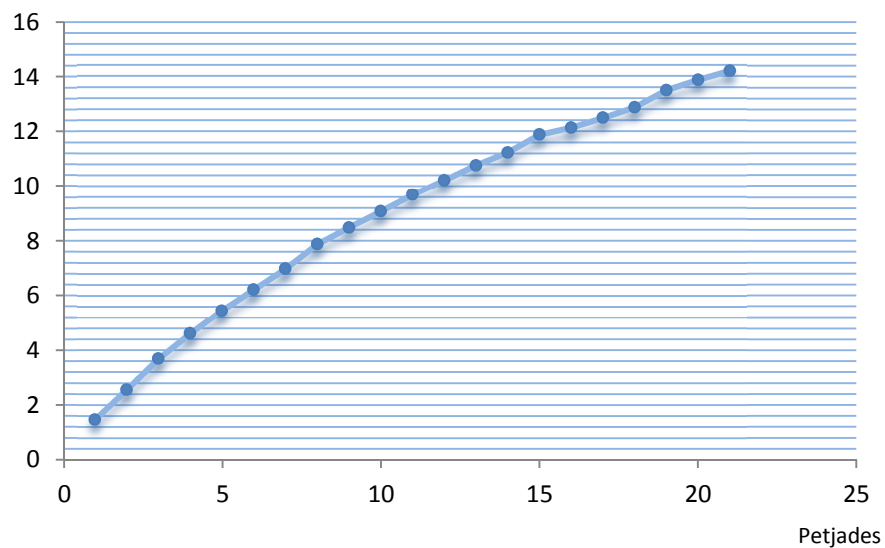
Fotografies de la taula REPRO amb la configuració del circuit electrònic rectificador de doble ona i condensador. Elaboració pròpia.

Resultats:

1r cop:

N. Pressions	Voltatge (V)	N. Pressions	Voltatge (V)	N. Pressions	Voltatge (V)
1	1,47	8	7,88	15	11,88
2	2,56	9	8,48	16	12,13
3	3,69	10	9,07	17	12,49
4	4,61	11	9,68	18	12,87
5	5,46	12	10,22	19	13,49
6	6,23	13	10,76	20	13,86
7	6,99	14	11,23	21	14,19

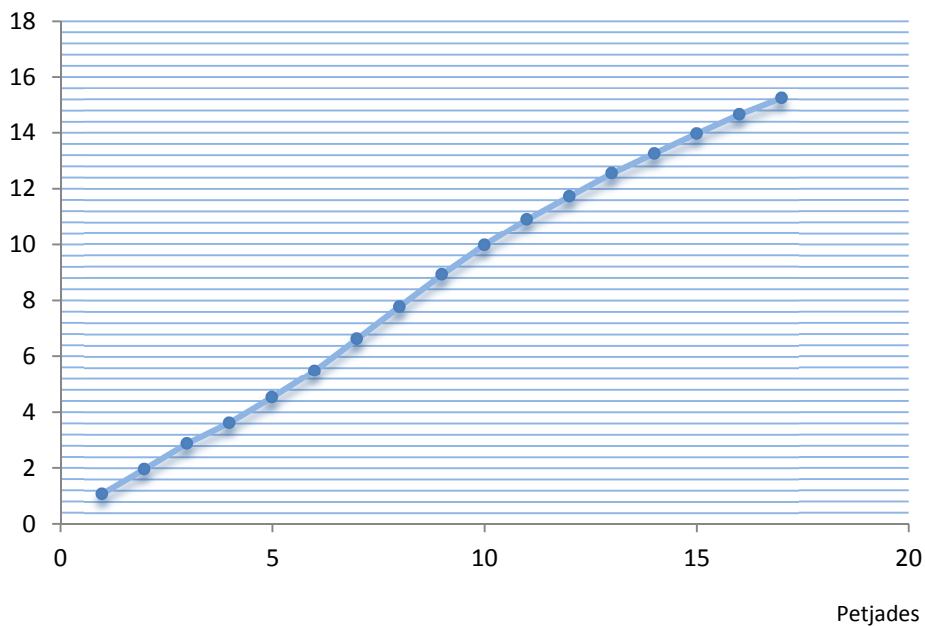
Voltatge (V)



2n cop:

N. Pressions	Voltatge (V)	N. Pressions	Voltatge (V)	N. Pressions	Voltatge (V)
1	1,08	8	7,78	15	13,97
2	1,97	9	8,92	16	14,65
3	2,88	10	9,97	17	15,24
4	3,62	11	10,9		
5	4,53	12	11,73		
6	5,49	13	12,55		

Voltatge (V)



Conclusions:

1. Al treballar amb dos sensors, es genera una senyal de tensió addicionada i gairebé espectacular. He arribat a generar i emmagatzemar un voltatge en el condensador de 1 Volt per petjada.
2. Necessitem la meitat de petjades que amb un únic sensor. L'efecte piezoelèctric es multiplica d'acord el nombre de sensors.
3. Les diferències entre les dues gràfiques es deuen a la irregularitat de la petjada d'un home al caminar.

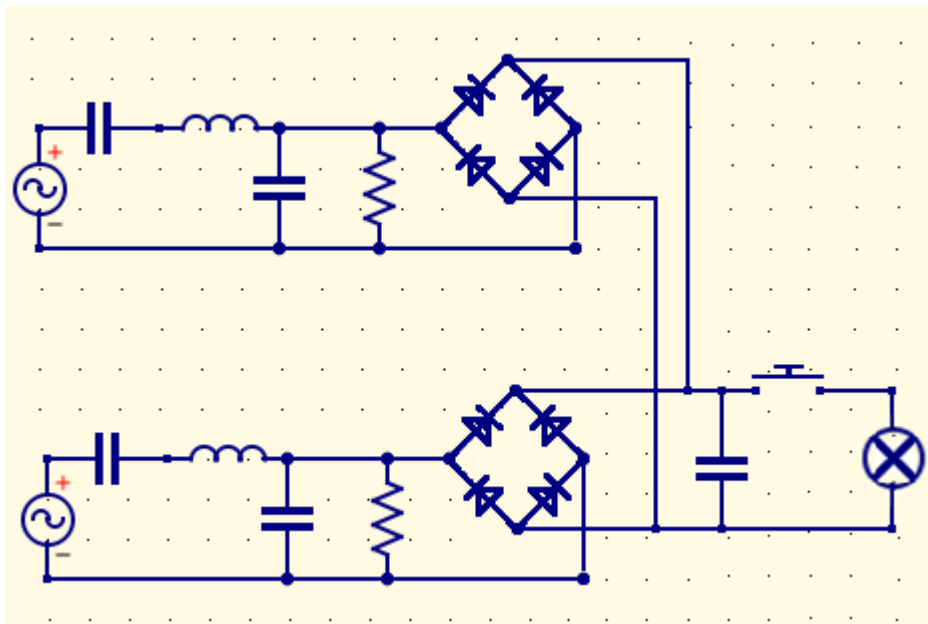
3.3.11 Pràctica onzena

Objectiu: Energitzar un díode LED amb energia prèviament acumulada en un condensador i generada amb un sistema de dos sensors piezoelèctrics independents.

Material:

1. Dos sensors piezoelèctrics
2. Dos ponts rectificadors
3. Condensador de tàntal de 35 V i 47 microfarads.
4. Cronòmetre
5. Voltímetre
6. Cablejat
7. Material de soldadura (Cinta americana)

Circuit:

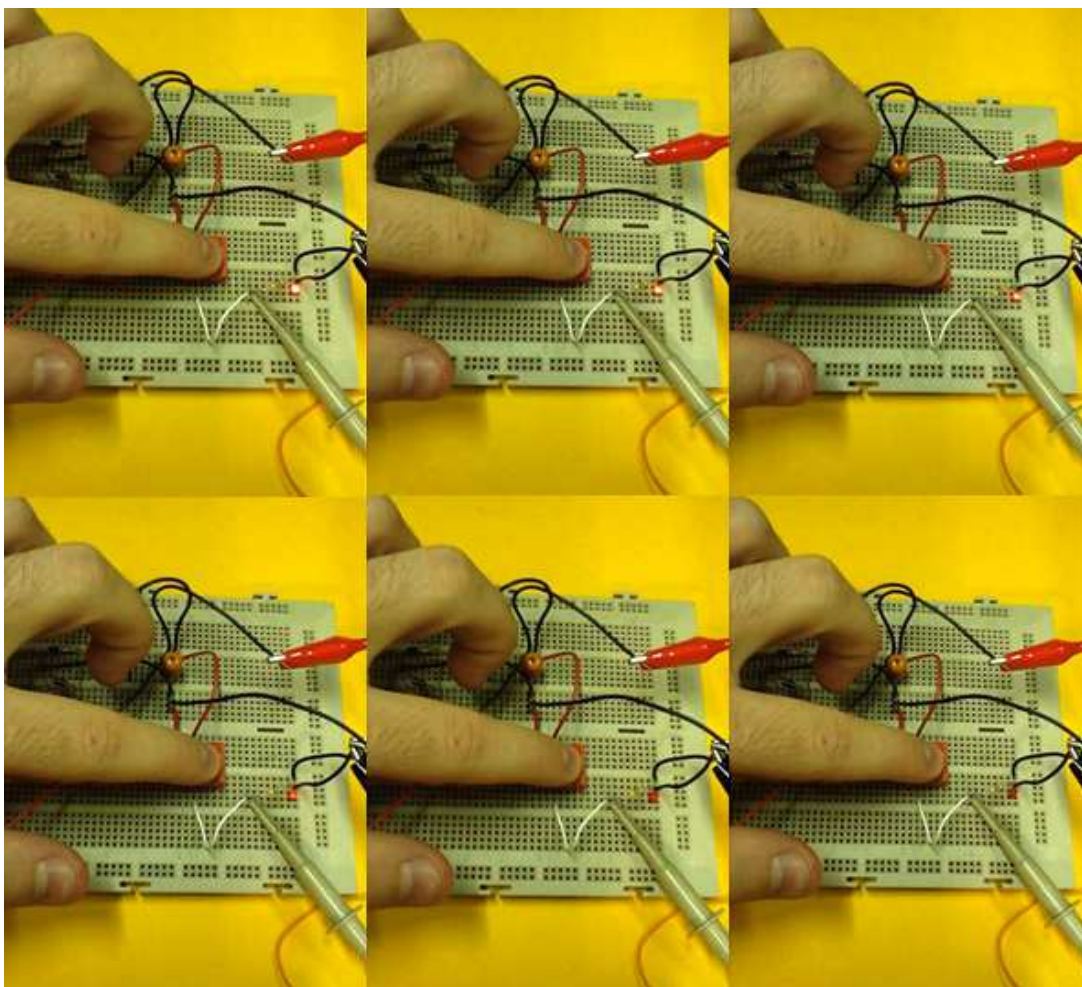


Resultats: En aquest cas he treballat amb un condensador de més capacitat perquè, tot i que la càrrega ha estat més lenta, he aconseguit emmagatzemar més energia, i per tant que el senyal lluminós del LED duri més temps. Un cop carregat el

condensador fins a 15 V (una tensió suficientment alta com per a superar la tensió llindar del LED), he pressionat el polsador.

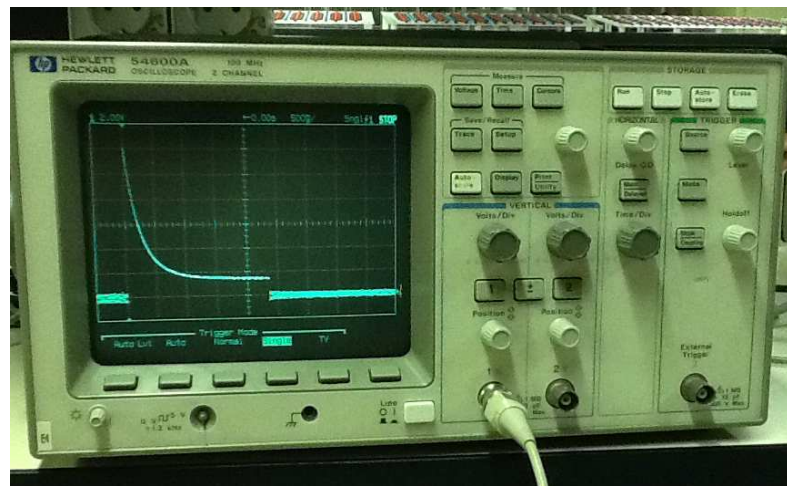
He aconseguit encendre el LED durant un instant molt curt, en el qual el senyal lluminós ha anat atenuant-se fins a apagar-se completament.

La seqüència de fotogrames següent mostra l'atenuació de la llum del díode LED:



Conclusions:

1. L'energia generada per un sistema generador piezoelèctric i emmagatzemada és capaç d'estimular un díode LED.
2. Tant bon punt transmetem l'energia emmagatzemada del condensador cap al díode LED, l'energia del condensador es descarrega quasi instantàniament. En la imatge de sota podem comprovar que la gran majoria d'energia es descarrega en el primer mig segon. Així doncs durant la resta de temps (aproximadament dos segons) l'energia que queda per descarregar-se és tant poca que no arriba a la tensió llindar del LED, fet pel qual el període de temps en el que podem observar el díode LED encès és poc més de mig segon.
3. He aconseguit dissenyar un generador i recol·lector d'energia elèctrica, generador de pocs volts i miliampers , però suficients per energitzar un LED i suficientment identificador de les possibilitats de l'Energy Harvesting, la transformació de l'energia del medi ambient, en aquest cas, la pròpia energia generada per l'energia mecànica de la petjada humana.



Corba de descàrrega del condensador en el període d'alimentació del LED. Elaboració pròpia.

4. CONCLUSIONS

Un cop realitzada la part pràctica en base a tot el coneixement adquirit durant la recollida d'energia, em dispenso a redactar les conclusions. Per a presentar-les he decidit catalogar-les segons la seva importància en relació amb els diferents objectius presentats a l'inici del treball. Així doncs, he seguit la mateixa classificació que als objectius, i he obtingut les següents conclusions generals i específiques.

▪ **Conclusions generals**

He demostrat que la recollida d'energia per mitjà d'un sistema piezoelèctric és viable. Tot i haver-ho fet en petita mida, podem considerar-ho com a un prototip a petita escala. D'aquesta manera entenem que els resultats i les conclusions obtinguts poden ser perfectament extrapolables a una escala de més alt valor, com és una situació de la vida real en una zona urbana. Lliguem ara aquesta recollida d'energia amb els conceptes presentats a l'inici del treball.

Gràcies als resultats obtinguts, he pogut demostrar que la capacitat generadora de la piezoelectricitat pot fer-se lloc en el camp de les Smart Cities. Imaginem una calçada construïda sobre un sistema de generació piezoelèctrica, sensible a les petjades de tots els vianants i als vehicles que circulin pel carrer, i connectada a un sistema d'emmagatzematge format per un conjunt de bateries de gran capacitat. Tota l'energia que es recollís, aniria connectada a la xarxa d'abastiment elèctric de la ciutat i significaria un estalvi molt gran d'energia per a la ciutat, a part de tractar-se d'una recollida d'energia sostenible i respectuosa amb el medi ambient.

Per altra banda, podríem lligar també l'efecte piezoelèctric amb l'Energy Harvesting, més encarat cap al consum propi. Si poguéssim recollir de manera eficient i individual l'energia que generéssim cadascú de nosaltres, podríem utilitzar aquesta energia per a estimular o carregar els nostres aparells electrònics de baix consum, tals com telèfons mòbils, reproductors mp3 o ordinadors portàtils.

Les expectatives que tenia abans de començar el treball eren, en part, demostrar la viabilitat de la capacitat generadora dels piezoelèctrics. Un cop finalitzat el treball puc dir que aquesta expectativa s'ha complert, ja que no només he estat capaç de recollir l'energia generada pel sensor piezoelèctric, sinó que a més l'he pogut canalitzar i usar per estimular un receptor.

- **Conclusions específiques**

Pel que fa a l'experiència més relacionada amb l'electrònica, l'objectiu era aconseguir dissenyar un circuit transductor d'energia mecànica a energia elèctrica, mitjançant l'element piezoelèctric PZT. La conclusió és que s'ha aconseguit realitzar de forma suficientment correcta com per a poder demostrar l'objectiu principal del treball , demostrar la viabilitat de la capacitat generadora de l'element piezoelèctric.

Derivat d'aquest fet, vull afegir que els meus coneixements tant teòrics com pràctics envers la piezoelectricitat i l'electrònica han augmentat en gran mesura. I no és aquest l'únic cas de millora personal. Realitzar aquest projecte m'ha obert moltes oportunitats de creixement personal que no he volgut desaproveitar. D'aquesta manera he adquirit mètode d'anàlisi i investigació, així com experiència a l'hora de treballar en un laboratori i destresa en la manipulació de components electrònics i equips de mesura.

Un dels objectius secundaris del treball era poder aprendre a treballar en l'àmbit experimental, a nivell pràctic, treballant cara a cara amb el material físic. És per això que he intentat evitar al màxim qualsevol tipus de simulació computacional. D'aquesta manera el que volia aconseguir era poder començar a entrar en matèria amb allò que vull estudiar en un futur, i que, si bé encara no ho he decidit, estic convençut que guarda una propera relació amb el treball que he realitzat. Així doncs, considero que aquest treball m'ha ajudat en el desenvolupament de les meves habilitats i capacitats, de la mateixa manera que m'ha apropat personalment a l'àmbit acadèmic i professional al que em vull dedicar en els propers anys de la meva vida.

5. REFERÈNCIES

- [1] *Idom* és una empresa espanyola dedicada a serveis professionals d'enginyeria, amb influència en quatre sectors diferents i interrelacionats entre ells: Indústria de l'energia, infraestructures, arquitectura i consultoria. Nascuda el 1957 de mans de dos enginyers espanyols, *Idom* ha anat creixent fins a arribar a actuar avui dia en cinc continents i amb l'ajuda d'un equip de més de 2.500 treballadors. Actualment està dedicant gran part dels seus esforços a l'estudi i la duta a terme de l'obtenció d'energia renovable per mitjà de varis mètodes, com poden ser la generació de biomassa, l'obtenció d'energia elèctrica, l'obtenció d'energia eòlica i la creació de preses hidroelèctriques. És per això que també està estudiant i finançant la investigació d'altres projectes sostenibles, com per exemple el projecte de les *SmartCities* i les *SmartGrides*.
- [2] Tomás, F. *SMART CITIES* [Presentació Slideshare]. Recuperat de <http://www.smartcities.es>
- [3] *Endesa* pertany al grup energètic italià ENEL. És l'empresa energètica de referència a Espanya, tant en generació com en distribució i comercialització d'energia.
- [4] *Farolas eficientes alimentadas con energía eólica* [Imatge]. Recuperat de http://www.endesa.com/es/conoceendesa/lineasnegocio/principalesproyectos/Malaga_SmartCity
- [5] Sense títol [Imatge corporativa]. Recuperat de http://www.endesa.com/es/conoceendesa/lineasnegocio/principalesproyectos/Malaga_SmartCity
- [6] *Avision for the future – a network of integrated microgrids that can monitor and heal itself* [Esquema gràfic]. Recuperat de <http://www.galvinpower.org/resources/electric-revolution/chapter-one-1776-energy-page-3>
- [7] Traducció literal de l'anglès al català: *Plataforma tecnològica europea per a les xarxes elèctriques del futur*
- [8] Aquest fet és deu a l'aspecte que hem tractat en el apartat sistema energètic i que recordo tenia relació amb el transport de l'energia. Si posem el concepte de generació distribuïda en estudi i ho raonem lògicament, podem comprovar que al tractar-se de petites i diverses fonts d'energia, l'energia que produeixen sempre es troba en petites quantitats. D'aquesta manera si aquestes fonts d'energia es trobessin a una distància considerable del seu destí i per tant haguéssim de transportar-la, l'energia que es perdria en el viatge faria que la generació distribuïda vista d'aquesta manera no fos en absolut rendible. És per aquesta raó que es busca situar la font d'energia a la màxima proximitat del receptor de tal energia.
- [9] *Ciudad solar en Alemania* [Imatge]. Recuperat de <http://energialimpiaparatodos.com/2014/09/15/643/>

- [10] *Generadores urbanos donQi* [Imatge]. Recuperat de <http://www.ecoticias.com/energias-renovables/39119/rss.php>
- [11] *Sense títol* [Imatge]. Recuperat de <http://www.mywindowpowersystem.com/2014/04/23/visionair3>
- [12] T. Starner, J. Paradiso, "Human generated power for mobile electronics". Capítol 45.
- [13] Conegut científicament com tartrat mixt de potassi i sodi, la seva fórmula és $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Fou descobert el 1672 per Pierre Seignette, i popularment pot ser coneguda com a sal de Seignette, agafant el nom del seu descobridor, o sal de Rochelle, població francesa i ciutat natal del seu descobridor.
- [14] Brothers and colleagues: Jacques and Pierre Curie. [Imatge]. Recuperat de <http://www.aps.org/publications/apsnews/201403/physicshistory.cfm>
- [15] Gabriel Lippman. [Imatge]. Recuperat de http://en.wikipedia.org/wiki/Gabriel_Lippmann
- [16] Woldemar Voigt. [Imatge]. Recuperat de http://en.wikipedia.org/wiki/Woldemar_Voigt
- [17] How piezoelectricity work [Dibuix]. Recuperat de <http://www.explainthatstuff.com/piezoelectricity.html>
- [18] Projecte final de carrera d'Enginyeria Industrial UPC. Autor : Javier Ibáñez García. Títol : "Diseño de un prototipo para generación energética mediante tecnología piezoeléctrica. Aplicación a escaleras".
- [19] Universitat Tecnològica Nacional, facultat regional Mendoza. Títol : "Materiales piezoeléctricos y efecto piezoeléctrico". Autor : Ing. Adolfo González
- [20] Treball final de carrera "Valoración de la capacidad de generación de energía eléctrica por medio de un dispositivo con efecto piezoeléctrico en las entradas vehiculares de la sede central de la UIS". Autores : Claudia Marcela Espitia Rey y Evelin Hernández Hernández. Universidad de Santander.
- [21] TFC. "Baldosa piezoeléctrica para alimentar sistemas de iluminación de bajo consumo energético". Autor : Jorge Andrés Cifuentes. Escuela de Ingeniería de Antioquía.
- [22] Entenem per transductor tot aquell element que té la capacitat de transformar una magnitud física en una senyal elèctrica.
- [23] Hidrocarbur líquid usat com a combustible per a calefaccions i motors específics de Diesel.
- [24] Taula de constants de discos ceràmics piezoelèctrics. [Taula]. Recuperat de <http://www.ondaradio.es/Portals/0/img/marcas/Ariston/Catalogo%20212.pdf>

6. BIBLIOGRAFIA

- Llibres, articles i treballs:

Adolfo F. González, Ricardo M. Cesari, Rubén O. Vicioli, *MATERIALES PIEZOELECTRICOS Y EFECTO PIEZOELECTRICO*. Universidad Tecnologia Nacional, 2009.

Antoine Ledoux, *Theory of Piezoelectric Material and Their Applications in Civil Engineering*. Massachusetts Institute of Technology, 2011.

Antônio Henrique Alves Pereira, *Cerámicas piezoeléctricas: funcionamiento y propiedades*. ATCP Engenharia Física, 2010.

Javier Ibáñez García, *E-STEP: Diseño de un prototipo para generación energética mediante tecnología piezoelèctrica. Aplicación a escaleras*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.

Marc Schmidt, *Desarrollo de un sistema compacto para la medición de propiedades atenuadoras de zapatillas deportivas*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2013.

Walter Heywang, Karl Lubitz, Wolfram Wersing, *Piezoelectricity Evolution and Future of a Technology*. Berlin: Springer series in Material Science, 2008.

- Pàgines web:

Applications of piezoelectric ceramics. APC International.

<https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/applications.html>

[Última consulta: 20/06/2014]

Ferroelectricitat y piezoelectricitat. Tecnum, escuela de ingenieros.

http://www.tecnun.es/asignaturas/PFM_Mat/Prog/Ferroelec2.pdf

[Última consulta: 04/07/2014]

Generación distribuida, Endesa educa. http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/smart-city/generacion-distribuida [Última consulta: 07/09/2014]

Piezoelectric generators: Applications. APC International.

<https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/generators.html> [Última consulta:

20/06/2014]

Piezoelectricidad, Historia, Mecanismo, Clases de Crystal, Materiales y Aplicaciones.

E-CENTRO. http://centrodeartigo.com/articulos-utiles/article_112831.html

[Última consulta: 04/07/2014]

Diversos articles, Wikipedia The Free Encyclopedia <http://en.wikipedia.org>

[Última consulta: 15/09/2014]