



UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI
Școala Doctorală de Inginerie Electrică



TEZĂ DE DOCTORAT

**Sistem multisursă piezoelectric și termoelectric de
recoltare a energiei pentru mașini industriale**

- REZUMAT -

Doctorand

ing. Claudia-Irina BORZEA

Conducător de doctorat

Prof. dr. ing. Alexandru-Mihail MOREGA

București, 2024

CUPRINS

ABREVIERI.....	4
ABSTRACT.....	5
1. INTRODUCERE	6
2. COMPRESORUL CU ȘURUB CA SURSĂ DE RECUPERARE A ENERGIEI	6
2.1. Vibrațiile compresorului cu șurub.....	7
2.2. Măsurarea vibrațiilor și analiza datelor achiziționate.....	7
2.3. Scanare termografică.....	8
3. PIEZOELECTRICITATEA.....	9
3.1. Efectul piezoelectric	9
3.2. Scurt istoric și principiul de recoltare a energiei piezoelectrice	9
3.3. Dispozitive piezoelectrice de recuperare a energiei.....	9
3.4. Relațiile constitutive ale materialelor piezoelectrice	10
4. SISTEMUL DE RECUPERARE A ENERGIEI PIEZOELECTRIC PROPUȘ	10
4.1. Transductor piezoelectric Midé PPA-4011	10
4.1.1. Proprietățile piezoelectrice de material.....	11
4.1.2. Proprietățile de material ale transductorului piezoelectric fizic ales	12
4.1.3. Modelul matematic particularizat pentru transductorul piezoelectric fizic	12
4.1.4. Circuit echivalent pentru transductorul piezoelectric cvadromorf.....	13
4.2. Modelul <i>digital twin</i> al transductorului piezoelectric	14
4.2.1. Studiul Eigenfrequency (analiza modală)	14
4.2.2. Studiul Frequency Domain	15
4.2.3. Studiul Time Dependent	15
4.3. Teste experimentale de laborator	16
4.3.1. Configurația de testare în laborator	16
4.3.2. Răspunsul în frecvență cu funcția swept-sine.....	16
4.3.3. Răspunsul în timp pe analizorul de spectru	17
4.4. Creșterea puterii electrice cu o masă inerțială de formă optimă.....	17
4.4.1. Transductor piezoelectric fără masă suplimentară.....	17
4.4.2. Microgrindă piezoelectrică în consolă cu masă inerțială concentrată	17
4.4.3. Microgrindă în consolă cu elemente de blocare a curburii capătului liber	18
4.4.4. Rezultate experimentale.....	18
4.5. Influența temperaturii asupra transductorului piezoelectric	18
4.5.1. Constante piezoelectrice dependente de temperatură	19

4.5.2. Variațiile constantelor piezoelectrice cu temperatura.....	19
4.5.3. Caz cu capăt liber (fără masă inerțială).....	20
4.5.4. Caz cu capăt liber blocat (cu masă inerțială)	20
4.5.5. Rezultatele simulărilor	21
4.6. Optimizarea formei transductorului piezoelectric cu secțiune triunghiulară	22
4.6.1. Reducerea materialului menținând aceeași masă inerțială.....	22
4.6.2. Reducerea materialului menținând aceeași tensiune mecanică	24
4.7. Sarcina rezistivă optimă pentru maximizarea puterii piezoelectrice de ieșire ...	25
5. TERMOELECTRICITATE	26
5.1. Efecte termoelectrice	26
5.2. Scurt istoric și principiile termoelectrice de recuperare a energiei.....	26
5.3. Generatoare termoelectrice	26
5.4. Relațiile constitutive ale materialelor termoelectrice.....	27
5.5. Simulări cu element finit cu un singur termocuplu n-p.....	27
6. SISTEMUL DE RECUPERARE A ENERGIEI TERMOELECTRICE PROPUS	29
6.1. Generator termoelectric TEGpro TE-MOD-10W4V-40	29
6.2. Modelul <i>digital twin</i> al modulului termoelectric fizic.....	29
6.2.1. Geometrie și condiții la limită	29
6.3. Simulări cu condiții la limită de temperatură la partea rece și la partea caldă .	30
6.3.1. Studiu Stationary.....	30
6.3.2. Studiu structural în domeniul frecvenței.....	30
6.4. Simulări cu <i>heat flux</i>, și îmbunătățirea eficienței cu un radiator	31
6.4.1. Studiu staționar	32
6.4.2. Studiu Time Dependent	32
6.4.3. Studiu structural în domeniul frecvenței.....	32
7. TESTE EXPERIMENTALE CU SISTEMELE DE RECOLTARE A ENERGIEI ÎNTR-UN MEDIU INDUSTRIAL RELEVANT	33
7.1. Sistem piezoelectric de recoltare a vibrațiilor unui compresor cu șurub	34
7.2. Sistem termoelectric de recoltare a căldurii unui compresor rotativ cu șurub..	35
8. CONCLUZII, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI CERCETĂRI VIITOARE.....	37
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ	39

ABREVIERI

AC – Alternating Current;	N/A – Not Applicable;
BDF – Backward Differentiation Formula;	ND – Non-Dimensional;
Bi ₂ Te ₃ – Bismuth telluride;	NUSTPB – National University of Science and Technology Politehnica Bucharest;
BNC – Bayonet Neill–Concelman;	PARDISO – Parallel Direct Sparse Solver;
CAD – Computer-Aided Design;	PC – Personal Computer;
CPU – Central Processing Unit;	PCB – Printed Circuit Board;
DAQ – Data Acquisition;	PDE – Partial Differential Equations;
DC – Direct Current;	PEH – Piezoelectric Energy Harvester;
DIN – Deutsche Institut für Normung;	PLC – Programmable Logic Controller;
DOF – Degree of Freedom;	PZT – Lead Zirconate Titanate;
EH – Energy Harvester;	PZT-5H – Lead Zirconate Titanate (soft);
EHS – Energy Harvesting System;	RAM – Random Access Memory;
EMF – Electromotive Force;	RF – Radiofrequency;
FEA – Finite Element Analysis;	RFID – Radiofrequency Identification;
FEM – Finite Element Method;	RLC – Resistor - Inductor - Capacitor;
FFT – Fast Fourier Transform;	RMS – Root Mean Square;
FOM – Figure of Merit;	SHM – Structural Health Monitoring;
FP – Floating Potential;	SSD – Solid State Drive;
FRF – Frequency Response Function;	TE – Thermoelectric;
GND – Ground;	TEC – Thermoelectric Cooler;
GSM – Global System for Mobile Communications;	TEG – Thermoelectric Generator;
ICP – Integrated Circuit Piezoelectric;	TEM – Thermoelectric Module;
INCDT COMOTI – Romanian Research and Development Institute for Gas Turbines COMOTI;	TERM – Terminal;
IR – Infrared;	TIM – Thermal Interface Material;
LED – Light Emitting Diode;	TRL – Technology Readiness Level;
MEMS – Micro-Electro-Mechanical System;	VSD – Variable Speed Drive;
MUMPS – Multifrontal Massively Parallel Solver;	Wi-Fi – Wireless Fidelity;
	WPC – Wireless Powered Communication;
	WSN – Wireless Sensors Network.

ABSTRACT

Recoltarea energiei reprezintă un domeniu foarte larg care cuprinde tehnologii [1] de conversie a energiei ambientale în energie electrică, atât la scară mare, cât și la scară mică [2], fiind încă un domeniu puțin explorat, dar care suscită un interes de cercetare tot mai mare la nivel mondial. Recuperarea dintr-o singură sursă este intermitentă și are limitări din cauza întreruperilor care apar atunci când nu există suficientă energie ambientală disponibilă [3]. Pentru a depăși această problemă, este necesară recoltarea energiei din mai multe surse [4], [5], [6], utilizând simultan mai multe surse de energie ambientală.

Teza se concentrează pe dezvoltarea unui sistem de recoltare a energiei multisursă la scară mică (piezoelectric și termoelectric). Scopul este de a recupera energia din vibrațiile și efectele termice ale echipamentelor industriale (mașini paletate rotative, cum ar fi compresoare, turbomotoare etc.), pentru a evalua și stoca în viitor suficientă energie electrică pentru a alimenta senzorii fără fir care monitorizează funcționarea acestor mașini sau care asigură monitorizarea sănătății structurale (SHM) sau detectarea defectelor.

Teza își propune să valideze pe un stand de testare, în condiții industriale relevante, funcționalitatea transductoarelor piezoelectrice și a generatoarelor termoelectrice. Astfel, în cadrul acestei teze, a fost atins un nivel de maturitate tehnologică între TRL 5 și TRL 6, prin demonstrarea subsistemelor piezoelectric și termoelectric în mediu relevant industrial.

Cercetările anterioare [7], [8], [9], [10] au arătat că tensiunea de ieșire de la un singur dispozitiv nu este suficientă pentru a alimenta un circuit demonstrativ de recoltare a energiei pentru nodurile de senzori fără fir (WSN). Ieșirile piezoelectrice în curent alternativ trebuie redresate cu punți de diode pentru a evita anularea răspunsului electric a două dispozitive în cazul în care acestea vibrează în antifază. Se preconizează ca ieșirea electrică redresată să încarce un condensator sau o baterie reîncărcabilă, iar apoi să treacă printr-un circuit specializat de recuperare piezoelectrică cu senzori încorporați.

Generatoarele termoelectrice, prevăzute cu radiatoare pentru a obține un randament mai ridicat al conversiei energiei termice în energie electrică, au fost prevăzute pentru a exploata gradientul termic datorat încălzirii echipamentului în timpul funcționării [11], [12].

În cadrul prezentei teze de doctorat, au fost efectuate simulări numerice și teste experimentale cu dispozitive fizice piezoelectrice și termoelectrice, atât în laborator, cât și pe un stand de testare a compresoarelor. Merită menționat faptul că cele două principii de microrecoltare a energiei sunt considerate, la bază, incompatibile. Pe de o parte, materialele piezoelectrice necesită vibrații și se recomandă să funcționeze în apropierea temperaturii camerei din cauza faptului că prezintă o scădere a răspunsului electric atât la temperaturi mai ridicate, cât și la temperaturi mai scăzute, ceea ce poate duce la depolarizarea materialului. Pe de altă parte, materialele termoelectrice necesită temperaturi ridicate la partea caldă pentru a produce energie, dar nu rezistă la forțele axiale laterale. Cu toate acestea, pe skid-ul unui compresor, a fost posibilă instalarea atât a dispozitivelor piezoelectrice, cât și a celor termoelectrice în locuri optime, în urma unor analize vibraționale și termice. Sistemul multisursă de recoltare a energiei propus, original prin abordarea proprie a autorului și prin combinația de generatoare, aduce și câteva elemente de noutate care nu au mai fost abordate în literatura de specialitate existentă și care pot fi consultate în lucrările prezentate și publicate de autor în etapa de doctorat (2019-2024).

1. INTRODUCERE

Recoltarea energiei reprezintă procesul de captare și conversie a energiei din mediul ambiant în energie electrică utilizabilă. Recoltarea energiei se referă la conversia energiei în energie electrică, atât la scară mare, cât și la scară mică. Teza de față se referă la ultima formă, cunoscută ca micro recoltare de energie [13], cu niveluri tipice de energie recoltată de ordinul nanowați până la miliwați. Recoltarea energiei este una dintre direcțiile de cercetare care înregistrează un interes crescut la nivel mondial, fiind încurajată pentru îmbunătățirea eficienței consumului de energie electrică. În general, un sistem EH complet este format din trei părți (Figura 1): transductorul, circuitele de alimentare și stocare, și mediul de stocare înaintea sarcinii electrice. Această teză se concentrează pe primul aspect, având ca scop evaluarea și maximizarea energiei recuperate din vibrațiile și căldura mașinilor industriale.

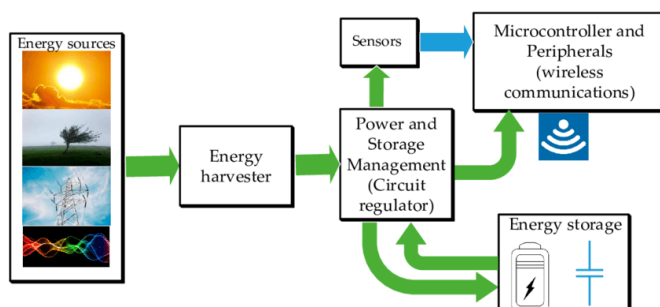


Figura 1. Componentele unui sistem de recoltare a energiei [14]

Teza se concentrează pe dezvoltarea unui sistem de recuperare a energiei multisursă (piezoelectric și termoelectric) la scară mică. Cele trei transductoare piezoelectrice Midé PPA-4011 achiziționate și utilizate în cadrul tezei sunt prezentate în Figura 2. De asemenea, au fost achiziționate trei generatoare termoelectrice TE-MOD-10W4V-40, constând în perechi termoelectrice de telurură de bismut.

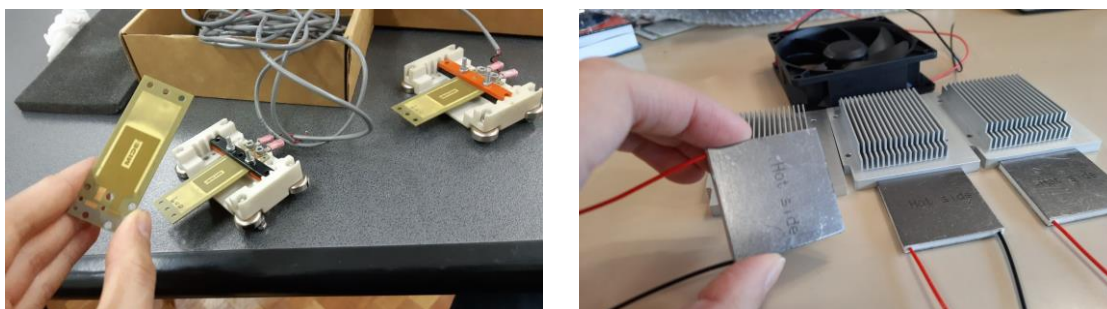


Figura 2. Transductoare piezo Midé PPA-4011 și termoelectrice TEGpro TE-MOD-10W4V-40

2. COMPRESORUL CU ȘURUB CA SURSĂ DE RECUPERARE A ENERGIEI

Compressoarele cu șurub (Figura 3a) sunt mașini rotative paletate utilizate pentru comprimarea gazelor. Acestea se încadrează în categoria compresoarelor cu deplasare pozitivă, folosind două rotoare (tată și mamă) pentru reducerea progresivă a volumului de gaz dintre cele acestea (Figura 3b). Compressoarele cu șurub dau naștere la pulsații puternice în funcționare, care determină niveluri ridicate de vibrații și zgomot în conductele din amonte și aval.



Figura 3. Compresor cu șurub: design și principiu (stânga) [15]; **b)** rotoare intercalate (dreapta) [16]
 Standul de probe din **Figura 4** este utilizat pentru testarea cu aer a compresoarelor.



Figura 4. Stand de tastare compresoare

2.1. Vibrațiile compresorului cu șurub

Frecvența poate fi calculată cunoscând numărul de lobi ai rotoarelor. CU90G are un rotor tată, conducător, cu 5 lobi și un rotor mamă, condus, cu 6 lobi. Frecvența fundamentală și frecvențele rotoarelor mamă și tată au fost calculate în **Tabelul 1**.

Tabelul 1. Valorile calculate ale celor mai importante frecvențe ale compresorului

Nr.	n_D [rpm]	n [rpm]	f_o [Hz]	f_m [Hz]	f_f [Hz]
1.	1000	2032	169.3	33.9	28.2
2.	1500	3048	254.0	50.8	42.3
3.	2000	4064	338.7	67.7	56.4
4.	2500	5080	423.3	84.7	70.6
5.	3000	6096	508.0	101.6	84.7

2.2. Măsurarea vibrațiilor și analiza datelor achiziționate

Măsurătorile au fost efectuate pe unitatea compresorului, utilizând un analizor industrial de vibrații cu un accelerometru piezoelectric triaxial. Pentru măsurarea vibrațiilor, s-au considerat cinci puncte de pe carcasa compresorului cunoscute pentru amplitudinile mai mari (**Figura 5**) și patru viteze ale compresorului: 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm, 2500 rpm.

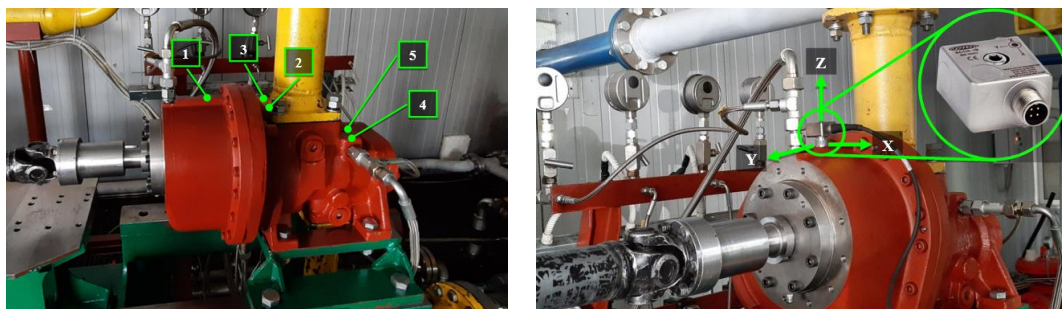


Figura 5. Cele cinci puncte de măsurare în care a fost amplasat accelerometrul

Figura 6 prezintă spectrele de frecvență în punctul 1, la o viteză de antrenare de 2500 rpm, cu o presiune de refulare de 6 bar. Frecvența fundamentală este de 423,5 Hz. Frecvența rotorului tată este de 83,5 Hz, iar frecvența rotorului mamă este de 68,5 Hz. Aceste frecvențe nu variază în funcție de presiune sau de punctul de măsurare, ci doar în funcție de viteză, la 2000 rpm fiind de 67 Hz și, respectiv, 55 Hz.

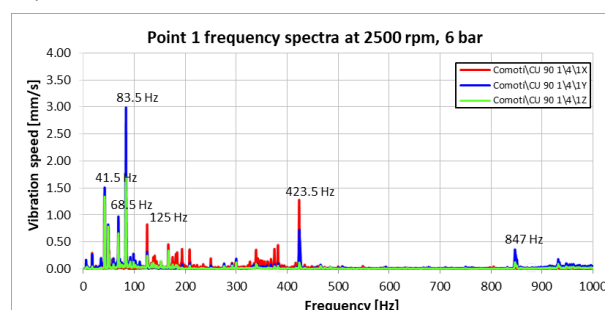


Figura 6. Spectre de vibrații în punctul de măsurare 1 la 2500 rpm și presiune de refulare 6 bar

2.3. Scanare termografică

Scanarea termografică este foarte utilă pentru generatoarele termoelectrice și, de asemenea, joacă un rol crucial pentru transductoarele piezoelectrice, fiind vitală pentru alegerea locului optim de montare pentru PEH. Așa cum se poate observa în **Figura 7**, în punctele 4 și 5 se înregistrează temperaturi mai ridicate, datorită apropierii lor de refulare.

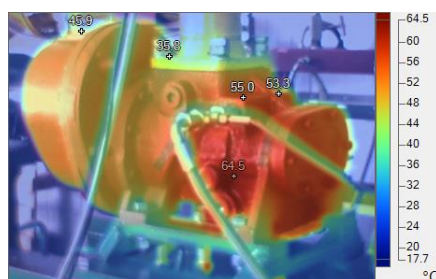


Figura 7. Imagine termografică a unității compresorului

Întrucât skid-ul este supus standardelor de autorizare pentru componentele sale, există doar câteva locuri care fac posibilă montarea în șuruburi pentru TEG-uri. Locul ales a fost capacul multiplicatorului (**Figura 8** stânga), stropit cu ulei fierbinte dinspre interior datorită rotirii melcilor tată și mamă.



Figura 8. Locul de montare în șuruburi a modulelor TEG și scanarea termică a multiplicatorului

3. PIEZOELECTRICITATEA

3.1. Efectul piezoelectric

Piezoelectricitatea este proprietatea anumitor cristale anizotrope de a genera sarcină electrică la aplicarea unei tensiuni mecanice. Materialele piezoelectrice sunt capabile să transforme energia mecanică în energie electrică și invers. Există două fenomene observate:

- ✚ **Efectul piezoelectric direct.** Când un material piezoelectric este supus la tensiuni mecanice, acesta generează o sarcină electrică, proporțională cu tensiunea mecanică aplicată, cu un anumit histererezis. Efectul piezoelectric direct este utilizat pentru *senzori* și *generatoare*.
- ✚ **Efect piezoelectric invers.** Atunci când unui material piezoelectric i se aplică un câmp electric, acesta produce deformare și deci deplasare, proporțional cu magnitudinea câmpului. Efectul piezoelectric invers este utilizat la *actuatoare*, mai insensibile termic.

3.2. Scurt istoric și principiul de recoltare a energiei piezoelectrice

Piezoelectricitatea ca domeniu de cercetare pentru fizica cristalelor a început cu frații Curie, Jacques și Pierre Curie, care au descoperit o caracteristică neobișnuită a unor minerale cristaline (cuarț, topaz, zahăr de trestie, turmalină, sare Rochelle) de a genera sarcini electrice de polarități opuse la aplicarea unor forțe de alungire și compresiune, proporțional cu aceste forțe. Denumirea fenomenului a fost atribuită de Hermann Hankel, fiind cunoscut până în prezent ca *efect piezoelectric*. Termenul *piezoelectricitate* este derivat din cuvântul grecesc pentru presiune, *piezo*, care înseamnă electricitate din presiune [17]. Temperatura maximă recomandată în operare a unui transductor piezoelectric este *jumătate din punctul său Curie*.

3.3. Dispozitive piezoelectrice de recuperare a energiei

Transductoarele piezoelectrice utilizează *efectul piezoelectric direct*, care poate fi utilizat prin conectarea electrozilor la un circuit electric (sarcină). Atunci când sunt supuse solicitărilor mecanice, transductoarele piezoelectrice produc sarcină electrică, sub forma unui răspuns în tensiune alternativă la vibrații. Un bimorf piezoelectric este o structură cu două

straturi piezoelectrice (Figura 9). La vibrații, unul dintre straturi se comprimă, iar celălalt se alungește [18]. Astfel, este indusă solicitare în material datorită tensiunii mecanice aplicate.

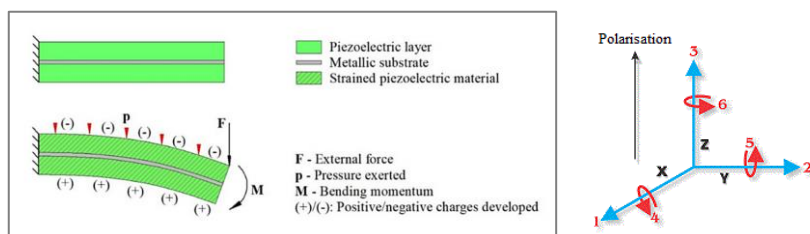


Figura 9. Schema transductorului bimorf piezoelectric (stânga) și axele de polarizare [19] (dreapta)

3.4. Relațiile constitutive ale materialelor piezoelectrice

În cazul materialelor piezoelectrice, solicitările mecanice și câmpul electric sunt cuplate prin relațiile constitutive piezoelectrice [20], [21]. Se pot cupla și tensiunile mecanice cu câmpul electric. Forma utilizată, *strain-charge*, este exprimată prin relațiile (3.1):

$$\begin{cases} S = s^E T + d^T E \\ \mathbf{D} = dT + \epsilon_0 \epsilon_r^T E \end{cases} \quad (3.1)$$

unde: S [ND] – solicitare mecanică; s^E [1/Pa] – complianța, măsurată în câmp electric constant; T [N/m²] – tensiune mecanică; d [C/N] – constanta de sarcină; \mathbf{E} [V/m] – intensitatea câmpului electric; \mathbf{D} [C/m²] – deplasare electrică (inducție); ϵ^T [F/m] – permitivitatea electrică, la tensiune mecanică constantă; ϵ_0 [F/m] – permitivitatea absolută a vidului; ϵ_r^T [F/m] – permitivitatea relativă.

4. SISTEMUL DE RECUPERARE A ENERGIEI PIEZOELECTRIC PROPUS

4.1. Transductor piezoelectric Midé PPA-4011

Partea piezoelectrică a sistemului de recoltare a energiei include trei transductoare piezoceramice Midé PPA-4011 [22] în construcție tip microgrindă încastrată (Figura 10), alese corespunzător pentru gamele de frecvențe și puteri de ieșire ale mașinilor industriale vizate.

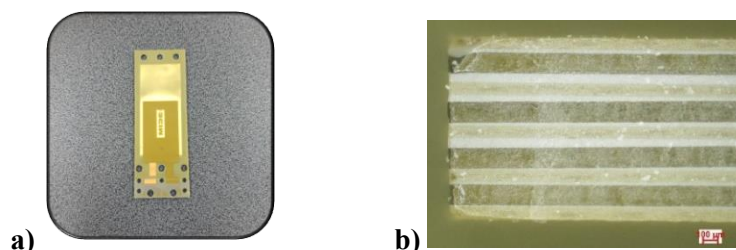


Figura 10. a) Transductoare Midé PPA-4011 și b) vedere laterală a capătului liber la microscop

Transductorul este o plăcuță compozită piezoelectrică, ce cuprinde 17 straturi din care patru straturi active de PZT-5H. Transductorul piezoelectric funcționează în modul d_{31} (acțiune mecanică pe axa verticală 3, și sarcină generată în lungul axei orizontale 1). Dimensiunile totale ale plăcuței sunt 71,0 mm x 25,4 mm x 1,32 mm (Figura 11), iar masa totală este de 7,6 grame.

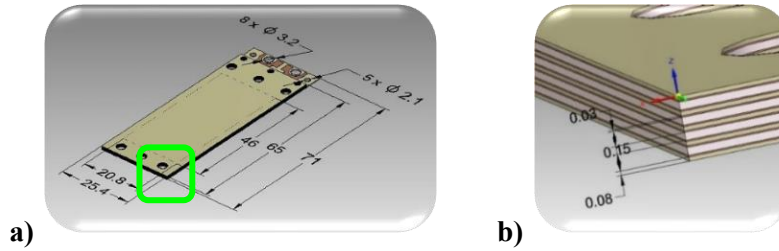


Figura 11. Model CAD al plăcuței piezoelectrice: **a)** vedere izometrică și **b)** mărire colț capăt liber

O structură tip microgrindă în consolă se comportă la frecvența fundamentală ca un sistem masă-arc-amortizor. Frecvența mecanică poate fi schimbată prin modificarea uneia sau mai multor variabile în (4.1), pentru o grindă cu secțiune dreptunghiulară, încastrată la un capăt.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3YI}{L^3 m}} \quad (4.1)$$

unde: f_n [Hz] – frecvența naturală; k [N/m] – constanta de rigiditate; m [kg] – masa; Y [N/m²] – modulul lui Young (echivalent); I [kg·m²] – momentul de inerție al secțiunii transversale; L [m] – lungimea.

Frecvența de rezonanță poate fi modificată și prin utilizarea unui circuit rezonant RLC conectat la dispozitivul piezoelectric. Într-o analogie forță-tensiune, mărimile electrice ce corespund unui sistem masă-arc-amortizor sunt specificate în Tabelul 2.

Tabelul 2. Mărimi mecanice-electrice analogice în corespondență forță-tensiune

Electrice	Mecanic
Inductanța (L)	Masa (m)
Capacitanța (C)	Complianța ($1/k$) – Inversa constantei de rigiditate a arcului (k)
Rezistența (R)	Amortizor (c)

4.1.1. Proprietățile piezoelectrice de material

Pentru a exprima termenii relevanți într-un mod convenabil, tensorii de ordinul doi (de exemplu tensiunea și solicitarea mecanică) sunt definiți prin matrice 6x1 cu termeni unici. Aceasta permite exprimarea tensorilor de ordinul al treilea și al patrulea ca matrice 6x3 și 6x6.

- Constantele piezoelectrice de sarcină. Constantele piezoelectrice de sarcină notate d_{ij} reprezintă polarizarea generată pe unitatea de tensiune mecanică, T . Transductorul dat funcționează în modul d_{31} – polarizare indusă în direcția 3 pe unitatea de tensiune mecanică exercitată în direcția 1.
- Constantele piezoelectrice de tensiune. Constantele piezoelectrice de tensiune g_{ij} reprezintă câmpul electric generat de materialele piezoelectrice pe unitatea de tensiune mecanică aplicată. Pentru efectul piezoelectric direct, primul indice i indică direcția câmpului electric generat, iar al doilea indice j exprimă direcția solicitării mecanice.
- Factorul electromecanic de cuplare. Factorul electromecanic de cuplare k (literă mică) este un indicator al eficienței de conversie.

- Constanta dielectrică relativă. Constanta dielectrică relativă K (majusculă) este raportul dintre permitivitatea piezoceramică și permitivitatea absolută a vidului ϵ_0 . Constanta dielectrică relativă arată cantitatea de sarcină pe care materialul piezoceramic o poate stoca, relativ la permitivitatea absolută.
- Constanta de permitivitate. Permitivitatea sau constanta dielectrică ϵ a unui material piezoceramic reprezintă deplasarea dielectrică pe unitatea de câmp electric.
- Modulul lui Young. Modulul de elasticitate, Y [N/m^2] descrie rigiditatea materialului piezoceramic, fiind raportul dintre tensiunea aplicată și solicitarea mecanică [23].
- Complianța elastică. Complianța elastică este solicitarea mecanică produsă într-un material piezoelectric pe unitatea de tensiune mecanică aplicată.

4.1.2. Proprietățile de material ale transductorului piezoelectric fizic ales

Proprietățile piezoelectrice de material ale PZT-5H utilizat de transductorul Midé PPA-4011 sunt prezentate în cadrul tezei. În toate simulările efectuate, proprietățile implicite de material au fost înlocuite, unde cunoscute, cu proprietățile materialului din fișa tehnică [22].

4.1.3. Modelul matematic particularizat pentru transductorul piezoelectric fizic

Pentru prima frecvență de rezonanță, o structură de tip grindă încastrată la un capăt care vibrează poate fi privită ca un sistem masă-arc-amortizor, având același comportament. Pentru structurile tip grindă în consolă, expresia frecvenței fundamentale este următoarea [24]:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{eff}}} \quad (4.2)$$

unde: f_n [Hz] – frecvența naturală; k [N/m] – constanta de rigiditate; m_{eff} [kg] – masa efectivă.

Bazându-ne pe modulele de elasticitate ale materialelor [22] și pe grosimile straturilor, rigiditatea secțiunii transversale K se calculează în (4.3) pentru cele 17 straturi ale structurii.

$$K = b \cdot \left[\sum_{i=1}^{17} Y^{(i)} h^{(i)} \left(z_0^2 - z_0 (H^{(i)} + H^{(i-1)}) + \frac{H^{(i)2} + H^{(i-1)2} + H^{(i)} H^{(i-1)}}{3} \right) \right] = 0.223 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^3}{\text{s}^2} \quad (4.3)$$

unde: b [m] – Lățimea grinzii; $Y^{(i)}$ [N/m^2] – modulul lui Young pentru stratul (i); $h^{(i)}$ [m] – grosimea stratului (i); z_0 [m] – coordonata axei neutre; $H^{(i)} = \sum_{j=1}^i h^{(j)}$.

Coordonata z_0 a axei neutre se calculează astfel:

$$z_0 = \frac{h_{total}}{2} = \frac{5 \cdot h_e + 8 \cdot h_s + 4 \cdot h_p}{2} = 0.62 \text{ mm} \quad (4.4)$$

unde: $h_e = 0,08$ mm – Grosime FR4; $h_s = 0,03$ mm – Grosime cupru; $h_p = 0,15$ mm – Grosime piezo.

Bazându-ne pe relația din [24], prima frecvență de rezonanță se calculează astfel:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \cdot 1.875^2 \sqrt{\frac{K}{\rho_{equiv} \cdot A \cdot L_{eff}^4}} = 241.68 \text{ Hz} \quad (4.5)$$

unde: ρ_{equiv} – densitatea echivalentă; A – suprafața plăcuței; L_{eff} [m] – lungimea efectivă.

Densitatea echivalentă ρ_{equiv} din ecuația (4.5) a fost calculată ca fiind 4469 kg/m^3 . Plăcuța piezoelectrică este fixată în poziția din spate a suportului (Figura 12), care permite lungimea efectivă maximă supusă vibrațiilor, avantajoasă atât datorită obținerii unei amplitudini mai mari la vârf, cât și solicitărilor mai mici, care pot prelungi durata de viață.

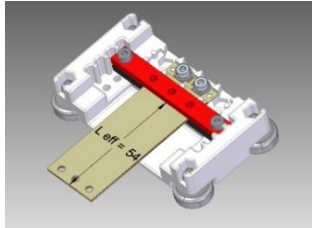


Figura 12. Model CAD care evidențiază lungimea efectivă $L_{eff} = 54$ mm [9]

4.1.4. Circuit echivalent pentru transductorul piezoelectric cvadromorf

Știind că în analogia mecano-electrică, componentele au următoarele echivalențe, circuitul electromecanic echivalent al unui transductor piezoelectric poate fi reprezentat prin analogia de tip rezonant: inductanța, $L \Leftrightarrow$ masa, m ; capacitanța, $C \Leftrightarrow$ complianța, sau inversul constantei arcului, $1/k$; rezistența, $R \Leftrightarrow$ amortizarea, c . Figura 13 prezintă circuitul electromecanic al unui transductor piezoelectric transpus în domeniul electric.

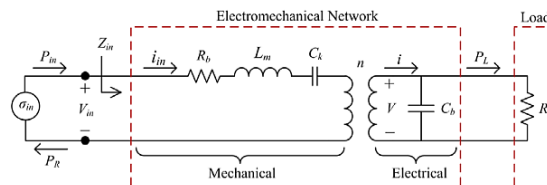


Figura 13. Circuit electromecanic al unui transductor piezoelectric tradus în domeniul electric [25]

Circuitul electric echivalent al transductorului piezoelectric cvadromorf fizic prezentat și utilizat în prezenta teză este schematizat, conform testelor experimentale, în Figura 14. Numerotarea nodurilor este utilizată în mod corespunzător în simulările numerice la declararea circuitului electric.

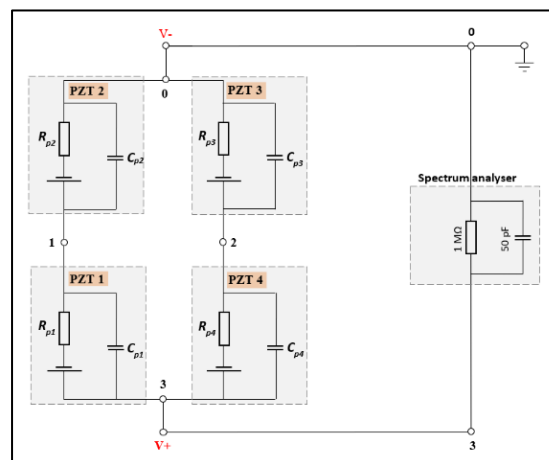


Figura 14. Circuit electric experimental echivalent

4.2. Modelul *digital twin* al transductorului piezoelectric

Au fost dezvoltate și analizate modelele cu element finit tridimensionale în COMSOL Multiphysics (Figura 15), pentru a prevedea comportamentul transductorului piezoelectric. O abordare multifizică este esențială pentru a analiza atât aspectele mecanice, cum ar fi frecvențele de rezonanță, deplasările și tensiunile von Mises, cât și efectul piezoelectric în ceea ce privește răspunsul electric. Două fizici interconectate sunt cuplate pentru o evaluare multifizică atât a parametrilor mecanici, cât a celor electrici, și anume *Solid Mechanics* și *Electrostatics*. Cele două fizici sunt interconectate prin *Multiphysics – Piezoelectric effect*. Comportamentul electromecanic este evaluat prin cuplarea următoarelor interfețe de fizică: *Solid Mechanics; Electrostatics; Electrical circuit*.

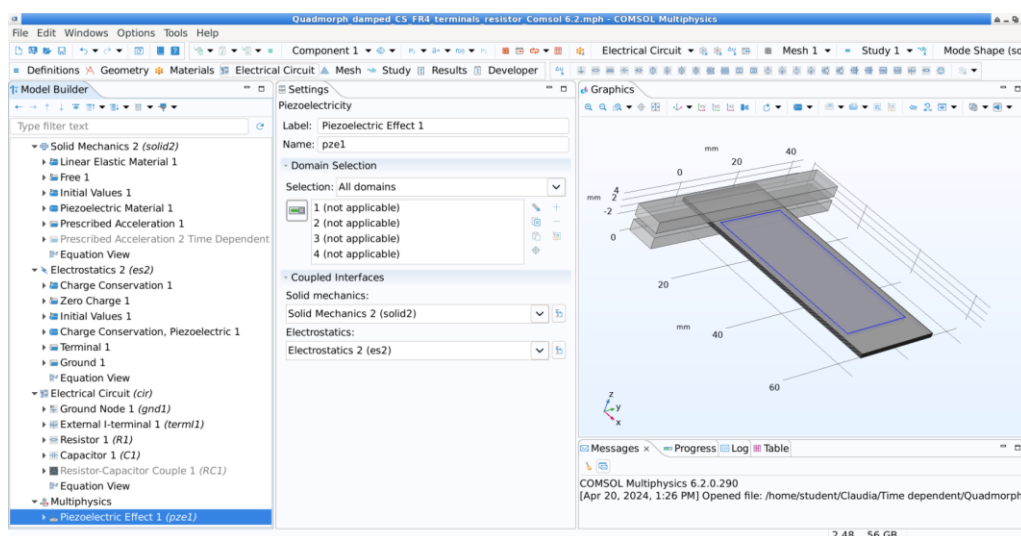
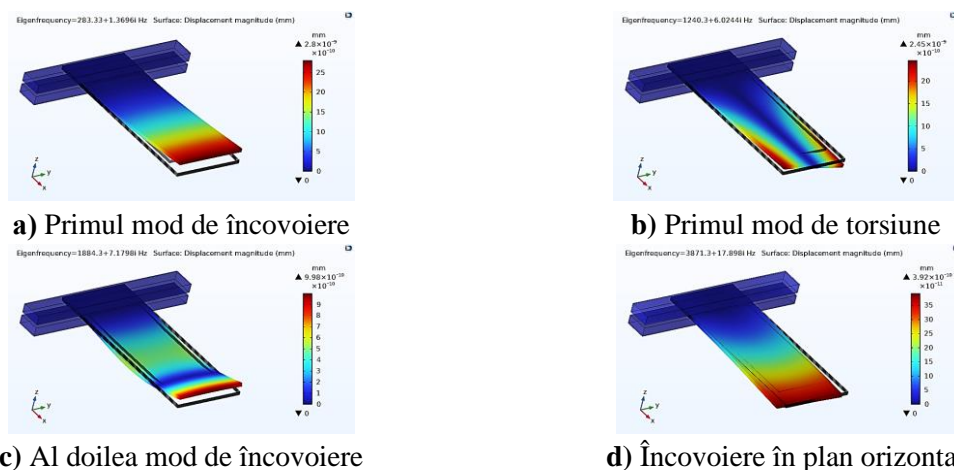


Figura 15. Cuplare multifizică completă a efectului piezoelectric

4.2.1. Studiul *Eigenfrequency* (analiza modală)

Frecvențele proprii, sau *frecvențele naturale*, sunt frecvențe discrete la care un sistem este predispus să vibreze. Un *mod propriu* este forma în care se deformează o structură, care corespunde vibrației la o anumită frecvență proprie. Studiul frecvențelor proprii poate furniza doar informații despre forma modală. În Figura 16, primele 10 frecvențe proprii au fost extrase din studiul de analiză modală efectuat.



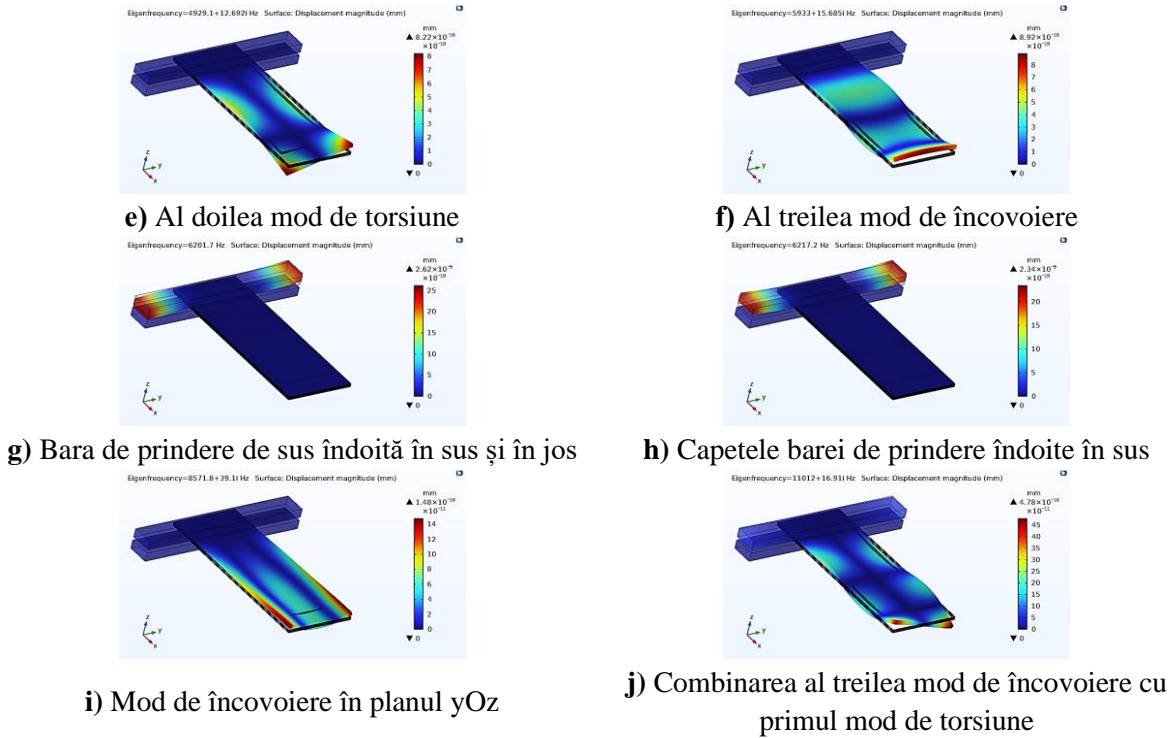


Figura 16. Primele 10 moduri de vibrație ale geamănului digital al Midé PPA-4011

4.2.2. Studiul Frequency Domain

În mecanica solidelor, studiul domeniului de frecvență este utilizat pentru a calcula răspunsul în frecvență al unei structuri mecanice în ceea ce privește distribuțiile de sarcină și frecvențele. Răspunsul în tensiune obținut pentru [range(173,10,273) range(273,1,283) range(283,0.1,285) range(285,1,295) range(295,10,395)] este prezentat în [Figura 17](#).

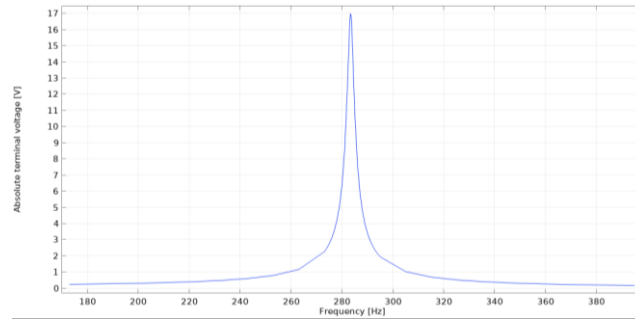


Figura 17. Funcția de răspuns în frecvență

4.2.3. Studiul Time Dependent

Studiul dependenței de timp este utilizat atunci când variabilele câmpului se modifică în timp. De exemplu, în mecanica solidelor, se utilizează pentru a calcula deformarea și mișcarea variabilă în timp a solidelor supuse la sarcini tranzitorii în domeniul timp [26]. Structura cvadromorfă dă un răspuns în tensiune alternativă, așa cum se poate vedea în capturile din simularea numerică din [Figura 18](#), într-un interval de timp (0, $T_p \cdot 0,05$, $T_p \cdot 140$). Timpul perioadei, T_p , a fost calculat ca $1/f_n$, unde f_n este prima frecvență proprie.

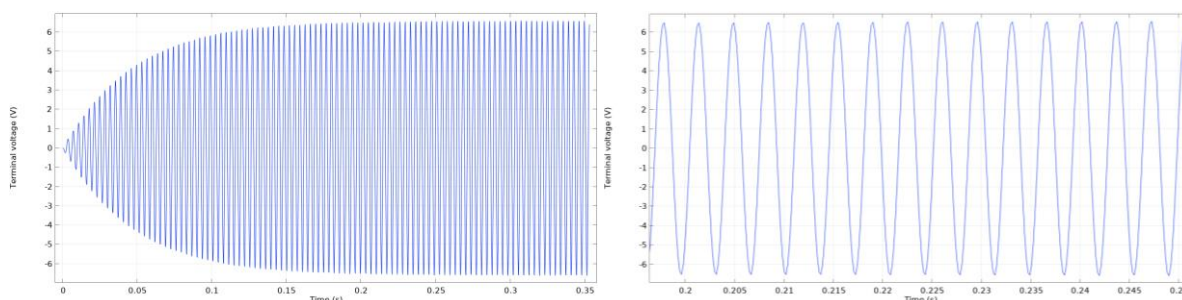


Figura 18. Răspunsul sinusoidal al transductorului piezoelectric (stânga) și magnificare (dreapta)

4.3. Teste experimentale de laborator

4.3.1. Configurația de testare în laborator

Poziția de prindere ideală a fost stabilită în cadrul simulării ca fiind poziția de prindere din spate. Configurația experimentală din **Figura 19** constă din:

- ✚ **Analizor de spectru** dinamic (Stanford SR785) cu FFT și generator de funcții pentru acționarea mesei de vibrații, cu afișarea răspunsurilor în frecvență și tensiune și DAQ.
- ✚ **Amplificator de putere** (TIRA BAA 120) cu putere de ieșire sinusoidală 120 VA RMS, utilizat pentru amplificarea semnalului de comandă de la analizor la masa de vibrații.
- ✚ **Masă de vibrații electrodinamică** (TIRA S 513), comandată de analizorul de spectru prin intermediul amplificatorului de putere, conectată la canalul de ieșire al analizorului.
- ✚ **Transductor piezoelectric** (Midé PPA-4011) fixat pe suportul de prindere (kit de prindere Midé PPA-9001). PEH este conectat la canalul de intrare 2 al analizorului.
- ✚ **Accelerometru** (Brüel&Kjær 4507-B-006), conectat la canalul de intrare 1 al analizorului. Pentru acest canal a fost activată sursa de alimentare de tip ICP.

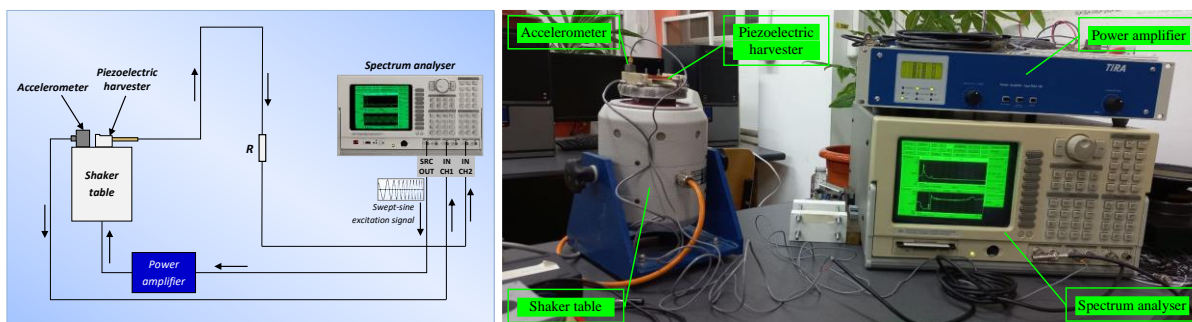


Figura 19. Schema bloc și configurația de testare în laborator

4.3.2. Răspunsul în frecvență cu funcția swept-sine

Swept-sine (sinus baleiat) este o tehnică utilizată pentru caracterizarea răspunsului în frecvență al unui dispozitiv testat [27]. Mesei de vibrații i s-a aplicat un semnal de excitație sinusoidal de tip *stepping swept-sine* (logaritm), accelerație prescrisă cu amplitudine constantă, variind frecvența în trepte, într-un interval de frecvență.

4.3.3. Răspunsul în timp pe analizorul de spectru

Răspunsul în timp afișat pe ecranul analizorului de spectru din [Figura 20](#) prezintă tensiunea alternativă sinusoidală specifică unui dispozitiv piezoelectric supus mișcării armonice impuse și vibrațiilor forțate.



Figura 20. Teste experimentale afișând răspunsul sinusoidal în timp

4.4. Creșterea puterii electrice cu o masă inerțială de formă optimă

4.4.1. Transductor piezoelectric fără masă suplimentară

Configurația primului set de teste a fost cu capăt liber. Răspunsul în tensiune maxim fără masă inerțială este $V_0 = 334,5 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$, la frecvența de rezonanță 214,03 Hz ([Figura 21](#)).

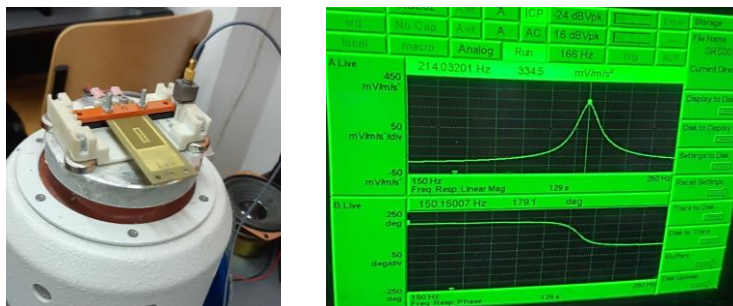


Figura 21. Teste fără masă suplimentară la vârf și afișarea răspunsului în tensiune pe analizor

4.4.2. Microgrindă piezoelectrică în consolă cu masă inerțială concentrată

Configurația cu masă concentrată a dat o tensiune maximă de $776,1 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$, cu masă de 4 g, înregistrat în [Figura 22](#), însoțită de scăderea frecvenței de rezonanță la $\sim 108,38 \text{ Hz}$. Creșterea procentuală comparativ cu configurația cu capătul liber este de **132%**.

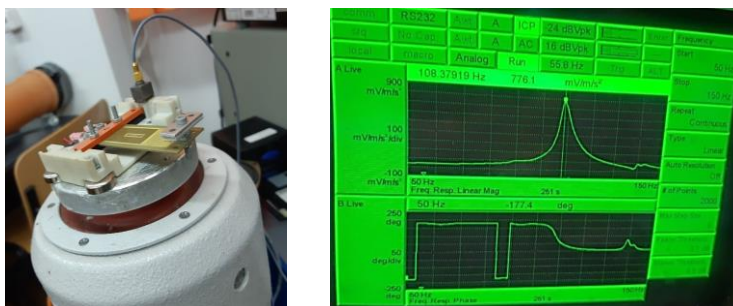


Figura 22. Grindă piezoelectrică cu masă concentrată și afișarea răspunsului în tensiune

4.4.3. Microgrindă în consolă cu elemente de blocare a curburii capătului liber

Cel mai interesant caz, cu masă care blochează curbura în plan vertical transversal, a înregistrat o tensiune maximă de $836,7 \text{ mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$, la rezonanța de $\sim 110,58 \text{ Hz}$ (Figura 23). Blocarea curburii capătului liber în plan transversal crește răspunsul în tensiune, față de cazul fără masă, cu $\sim 150\%$. Frecvența crește ușor cu elementele de blocare a curburii capătului liber, cu masa de aceeași valoare, datorită grosimii adăugate la secțiunea transversală a grinzii.

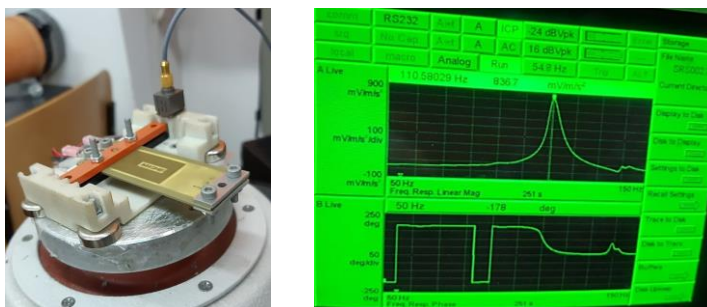


Figura 23. Transductor piezoelectric cu blocarea curburii capătului liber

4.4.4. Rezultate experimentale

Datele achiziționate de la analizor sunt reprezentate grafic în Figura 24. Tensiunea de vârf înregistrată fără masă este de $3,28 \text{ V/g}$, la frecvența de rezonanță de $214,03 \text{ Hz}$. La atașarea masei concentrate, tensiunea de ieșire crește la $7,611 \text{ V/g}$, la frecvența de rezonanță de $\sim 108,38 \text{ Hz}$. Blocarea curburii capătului liber induce tensiuni von Mises mai mari în materialul piezoelectric al plăcuței, împiedicând colțurile să se îndoieie în sus și în jos în plan vertical. Se înregistrează o creștere a tensiunii, împreună cu o ușoară creștere a frecvenței de rezonanță, găsită la $110,58 \text{ Hz}$. Vârful de tensiune la rezonanță este de $8,205 \text{ V/g}$.

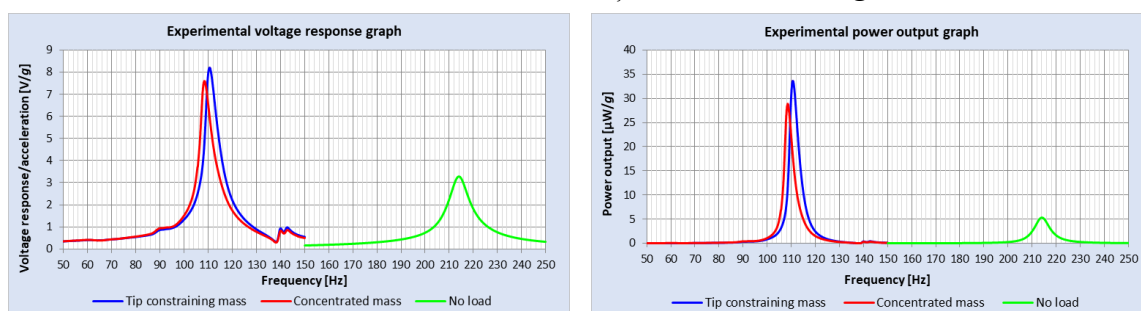


Figura 24. Graficele răspunsurilor în tensiune și putere cu datele achiziționate

4.5. Influența temperaturii asupra transductorului piezoelectric

Temperatura poate altera răspunsul piezoelectric și performanțele transductoarelor. În ciuda performanțelor superioare pentru recuperarea de energie ale PZT-5H, o piezoceramică moale din titanat de zirconat de plumb, acest material este foarte sensibil cu temperatura. Influența temperaturii a fost puțin studiată în literatură pentru zona de recoltare de energie față de senzori și actuatoare, datorită faptului că necesită un control mai puțin precis. Intervalul evaluat în simulări a fost de la $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ la $100 \text{ }^\circ\text{C}$, cuprinzând intervalul măsurat pe compresor.

4.5.1. Constante piezoelectrice dependente de temperatură

La temperatura Curie, structura cristalină piezoelectrică tinde să își reducă asimetria și alinierea dipolilor. Acest lucru va determina ulterior ca materialul să își piardă proprietățile piezoelectrice. Principalele proprietăți ale materialului susceptibile de a fi afectate de temperatură sunt: constanta sarcină/stres, d_{31} ; constanta tensiune/stres, g_{31} ; factorul de calitate mecanic, Q_m ; constanta dielectrică relativă, K . Alte proprietăți pot fi de asemenea afectate, cum ar fi coeficientul de dilatare termică, α , rezistivitatea electrică, ρ , și constanta de timp RC, π ,

4.5.2. Variațiile constantelor piezoelectrice cu temperatura

Cele patru constante piezoelectrice discutate anterior, care depind de temperatură și influențează semnificativ răspunsul transductorului, sunt prezentate împreună cu valorile lor specificate la temperatura camerei ($T_r \approx 23 \text{ }^\circ\text{C}$) [22]. Având datele furnizate de producător [28], s-au calculat abaterile procentuale ale constantelor piezoelectrice în funcție de temperatură la diferite temperaturi. Graficele din stânga din Figura 25 prezintă abaterile procentuale, iar în dreapta reprezintă evoluția fiecărei valori constante cu temperatura.

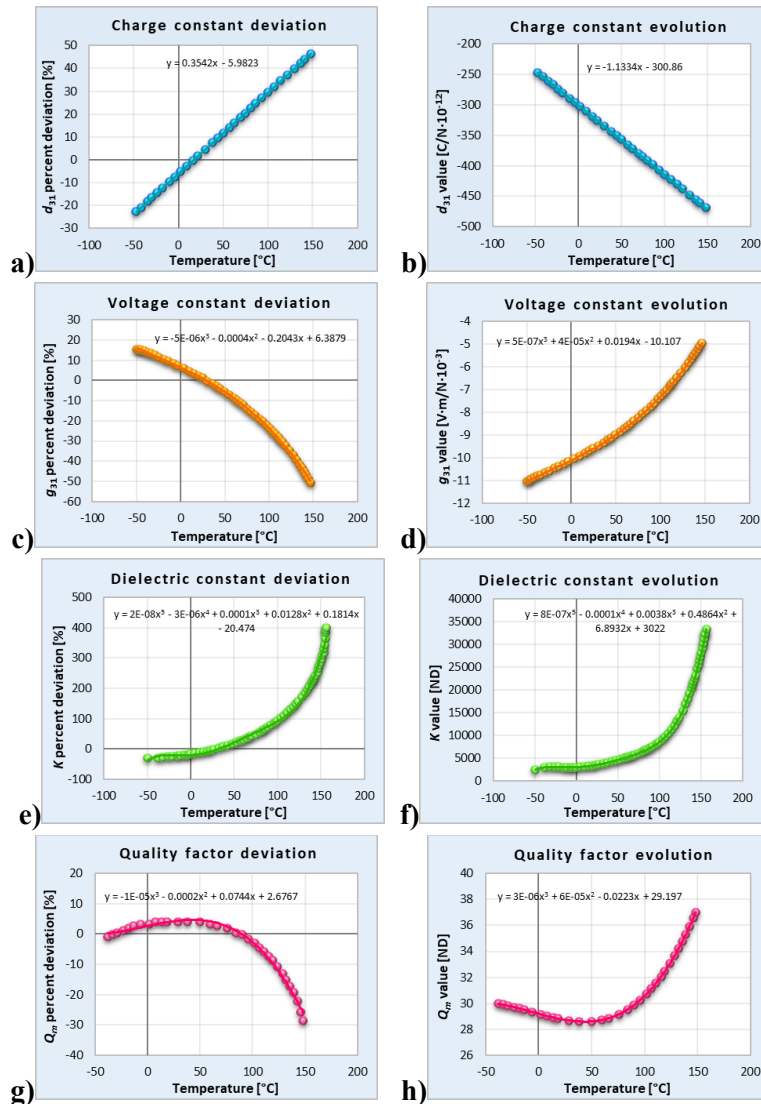


Figura 25. Abaterile procentuale ale constantelor piezoelectrice (stânga) și valorile calculate (dreapta)

4.5.3. Caz cu capăt liber (fără masă inerțială)

A fost efectuat în prealabil un studiu al frecvențelor proprii (Figura 26), pentru a stabili valoarea frecvenței naturale și pentru a defini domeniul de frecvență pentru găsirea vârfului de rezonanță. A fost introdusă amortizarea mecanică, declarându-se un factor de pierdere izotrop, calculat în funcție de fiecare factor de calitate mecanică. Amortizarea mecanică domină în materialele piezoceramice moi, făcând amortizarea electrică neglijabilă.

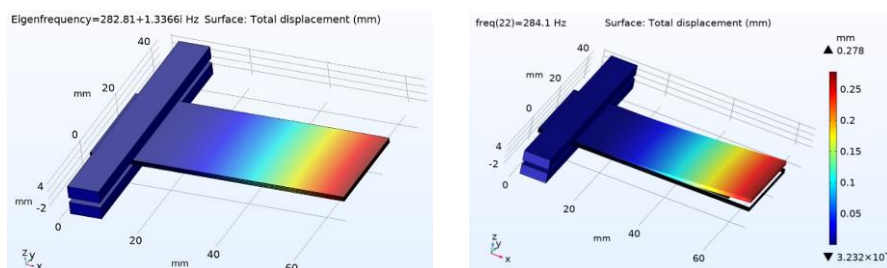


Figura 26. Prima frecvență proprie (stânga); deplasarea totală la rezonanță (dreapta), la $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

Figura 27 prezintă distribuția potențialului electric și evaluarea tensiunii von Mises induse în plăcuța piezoelectrică. Detaliul arată cum au fost declarate terminalele (V) și ground (GND) pe fețele straturilor piezoelectrice [22].

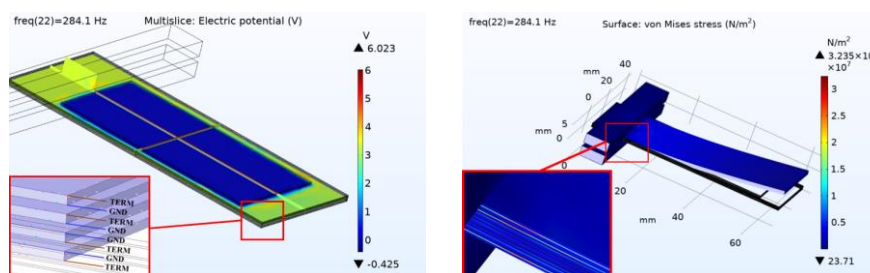


Figura 27. Potențial electric (stânga) și tensiunile von Mises (dreapta), la rezonanță la $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

Amplitudinea răspunsului în frecvență observată în timpul testelor de laborator pe canalul superior al analizorului de semnal în Figura 28 este mai atenuată decât în simulări. Masa de vibrații este antrenată cu un semnal sinusoidal, asigurându-se un regim armonic permanent.

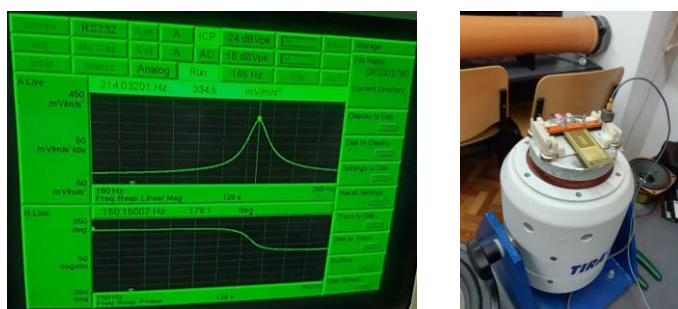


Figura 28. Răspuns în tensiune pe analizor (stânga) și PEH cu capăt liber pe masa de vibrații (dreapta)

4.5.4. Caz cu capăt liber blocat (cu masă inerțială)

Cercetarea de față a considerat, de asemenea, observarea comportamentului transductorului piezoelectric cu masă inerțială sub formă de bare de blocare a curburii. Figura 29 prezintă evaluarea tensiunii von Mises, luând în considerare amortizarea prin factor de pierdere, și distribuția potențialului electric în plăcuță, în apropierea rezonanței $f_r (< \pm 0,1\text{ Hz})$.

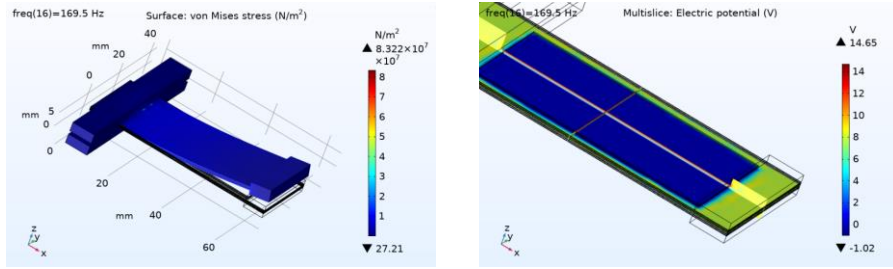


Figura 29. Capăt blocat – tensiuni von Mises (stânga) și potențial electric (dreapta) la $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

4.5.5. Rezultatele simulărilor

Sensibilitatea în tensiune la rezonanță în raport cu temperatura de lucru, frecvența de rezonanță, deplasarea totală și tensiunile mecanice sunt reprezentate grafic în Figura 30. Chiar dacă *deplasarea crește cu temperatura, răspunsul în tensiune scade*. Rezultatele obținute în simulările numerice reprezintă un indicator foarte bun al condițiilor optime de temperatură de funcționare pentru un transductor piezoelectric pe bază de PZT-5H. Se arată că răspunsul său piezoelectric este *foarte neliniar și afectat în mare măsură de temperatura de funcționare*.

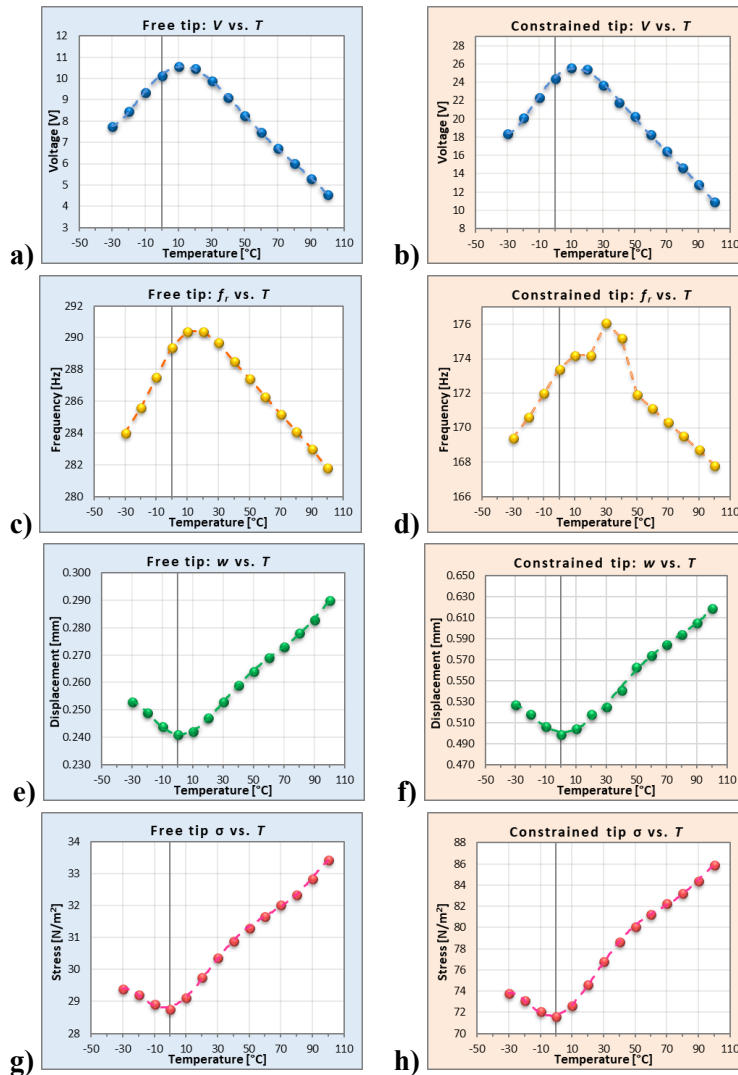


Figura 30. Răspuns în tensiune: a) capăt liber, b) capăt blocat; Frecvența rezonanță: c) liber, d) blocat; Deplasare totală: e) liber, f) blocat; Tensiuni mecanice: g) liber, h) blocat

4.6. Optimizarea formei transductorului piezoelectric cu secțiune triunghiulară

S-a studiat ideea de secțiune longitudinală triunghiulară a transductorului, fiind un element de cercetare original [29], [30]. Un studiu cuprinzător al literaturii de specialitate [29] arată că studiile efectuate reprezintă o abordare originală și nu au mai fost adresate până acum.

Plăcuța piezoelectrică a fost simulată pornind de la dreptunghiular la triunghiular, via trei secțiuni trapezoidale intermediare. Un al doilea studiu, care nu a mai fost abordat până acum în literatură, a evaluat răspunsul piezoelectric pe unitatea de volum de material piezoelectric, dovedind astfel o eficacitate incontestabilă a materialului din încastrare, cu o masă inerțială de 4 g. Un al treilea studiu, un alt element de noutate, evaluează tensiunile mecanice. S-a acordat atenție menținerii aceiași valori ale tensiunilor mecanice, pentru toate structurile.

Cele cinci structuri pentru analiza de optimizare a formei au pornit de la modelul *digital twin* al transductorului dreptunghiular Midé PPA-4011. Lungimea grinzilor nu a fost modificată, fiind aceeași ca pentru cea dreptunghiulară. Secțiunea încastrată a straturilor piezoelectrice a rămas neschimbată. **Figura 31** prezintă formele simulate: **a)** dreptunghiular; **b)** trapezoidal (vârf lat); **c)** trapezoidal (vârf mediu); **d)** trapezoidal (vârf îngust); **e)** triunghiular.

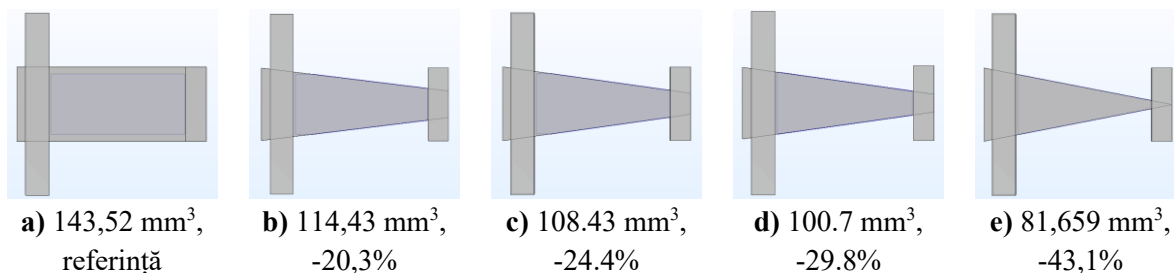


Figura 31. Cele cinci structuri și reducerile procentuale ale materialului: **a)** dreptunghiular (referință); **b)** trapezoidal, -20,3%; **c)** trapezoidal, -24,4%; **d)** trapezoidal, -29,8%; **e)** triunghiular, -43,1% [29]

Modelul 3D al sistemului piezoelectric de recoltare utilizat în laborator a fost proiectat (**Figura 32**), folosind o masă inerțială de 4,0 g amplasată la capătul liber, precum și suportul de prindere pentru încastrarea plăcuței între două bare la celălalt capăt.

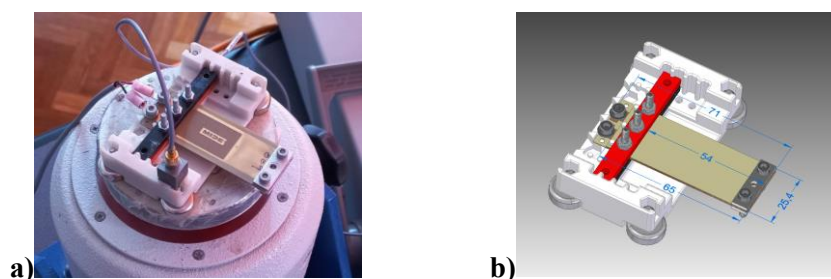


Figura 32. a) Sistem PEH experimental pe masa de vibrații și b) Model CAD 3D proiectat [29]

Când se adaugă un circuit electric în modelul de simulare, constând dintr-un cuplu rezistență-condensator de $1 \text{ M}\Omega \parallel 50 \text{ pF}$ [31], [32], tensiunile von Mises scad de la 80,06 MPa la mers în gol, la 78,5 MPa în sarcină, valoare utilizată în studiul la aceeași tensiune mecanică.

4.6.1. Reducerea materialului menținând aceeași masă inerțială

În primul rând, cele cinci structuri au fost analizate menținând valoarea masei inerțiale de 4 g ca în experimentele de laborator. Masa inerțială cu elemente de blocare a curburii au fost

setate astfel încât să corespundă cu configurația experimentală [31]. Masa inerțială a fost calculată pe baza densității prestabilite pentru oțelul structural în programul de simulare, $\rho = 7866 \text{ kg/m}^3$. Lungimea și lățimea celor două bare respectă dimensiunile fizice, $L \cong 25,4 \text{ mm}$ și $W \cong 7 \text{ mm}$. Potențialul electric triunghiular este cu $\sim 13\%$ mai mic, cu reducerea cu peste 43% a materialului piezoelectric (Figura 33), dovedind eficiența materialului din încastrare.

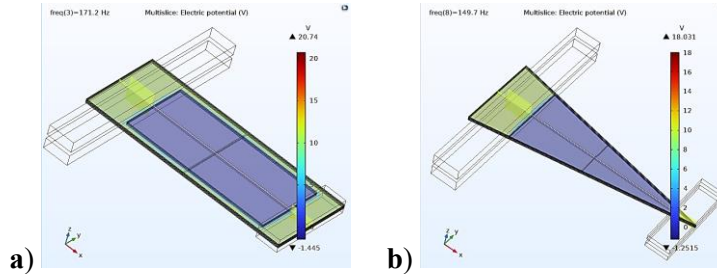


Figura 33. Potențialul electric pentru: a) structura dreptunghiulară, b) structura triunghiulară

Cazul triunghiular înregistrează o scădere a tensiunilor mecanice până la aproape o treime din valoarea calculată pentru plăcuța dreptunghiulară (Figura 34). În cazul triunghiular cu aceeași masă inerțială, deplasarea este ușor mai mică datorită unei complianțe mai mari.

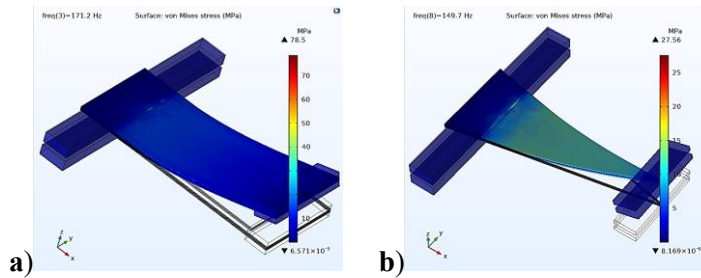


Figura 34. Tensiunile mecanice la rezonanță pentru structurile: a) dreptunghiulară și b) triunghiulară

Figura 35 reprezintă grafic tendințele similare ale tensiunii și puterii active, și deplasarea totală. Valorile axei orizontale sunt inversate, pentru observarea mai ușoară a scăderii tensiunii cu $\sim 65\%$ spre cazul triunghiular. Tensiunea pe unitatea de volum crește cu $\sim 53\%$, pentru cazul triunghiular, iar puterea pe unitate de volum crește cu 30,4% (Figura 36).

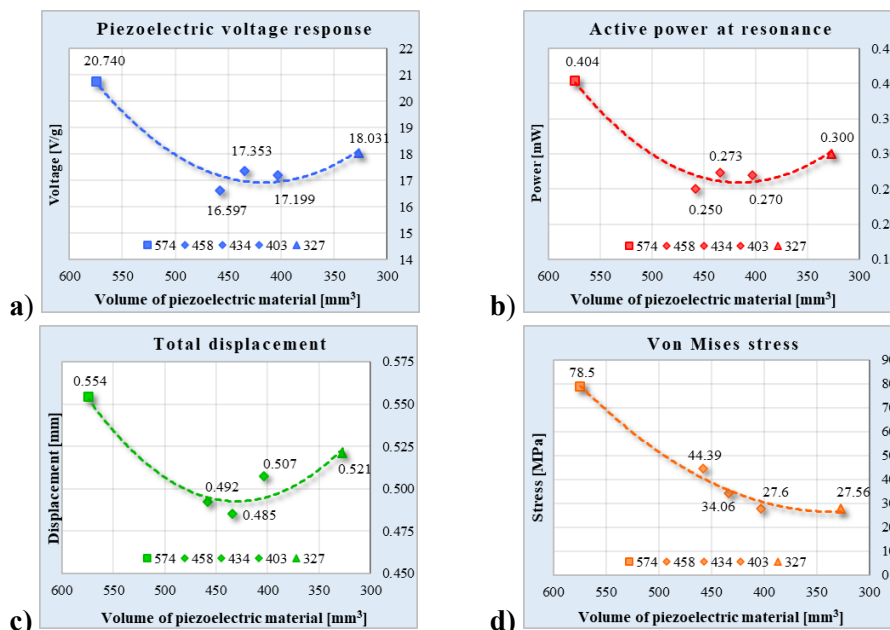


Figura 35. a) tensiunea, b) puterea activă, c) deplasarea totală, d) tensiunile mecanice von Mises

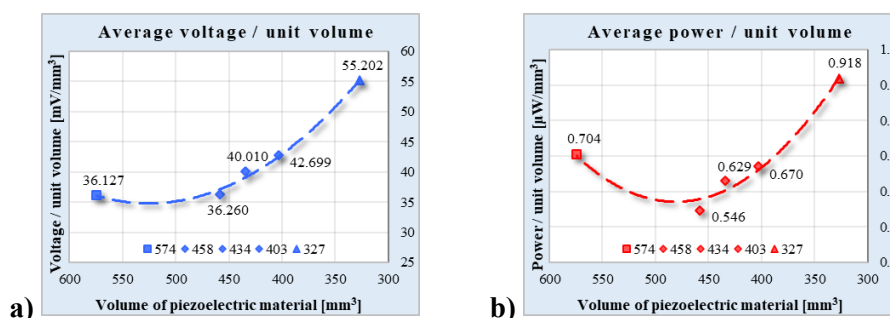


Figura 36. a) Tensiunea medie, b) Puterea medie [cu aceeași masă inerțială, pe unitatea de volum]

4.6.2. Reducerea materialului menținând aceeași tensiune mecanică

Observând cum scade tensiunea mecanică, s-a efectuat un al doilea set de simulări menținând aceeași valoare. Tensiunile mecanice nu depind liniar de masa inerțială, ci și de geometria plăcuței, fiind necesare mai multe rulări. Figura 37 arată o tensiune de peste 2,5 ori mai mare și o putere de aproape 6,4 ori mai mare cu forma triunghiulară, deplasarea de ~3 ori mai mare la aceleași tensiuni mecanice, și masa inerțială suportată de ~3,3 ori mai mare decât în cazul dreptunghiular. Creșterea tensiunii pe unitatea de volum cu ~342% și a puterii pe unitatea de volum cu 1022% sunt remarcabile pentru structura triunghiulară (Figura 38).

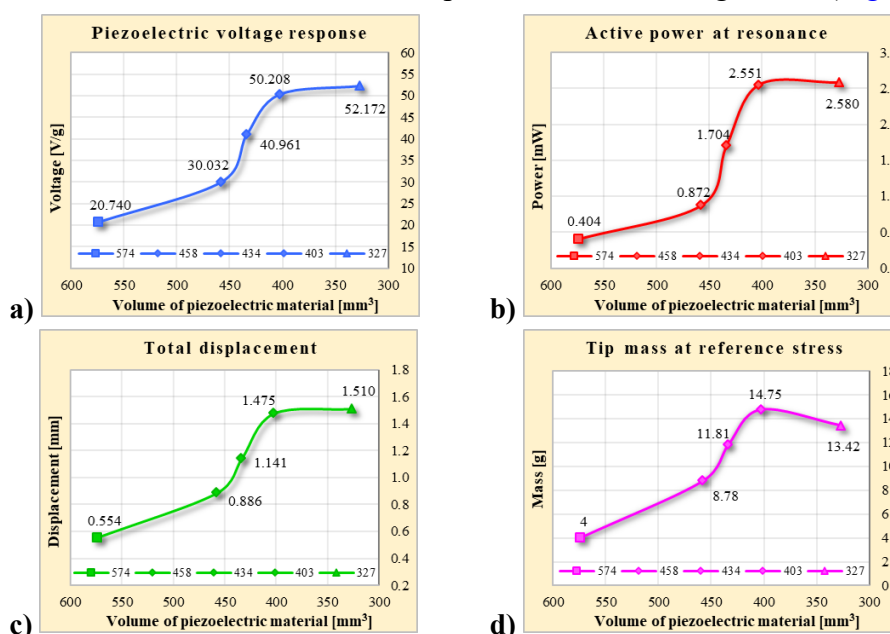


Figura 37. a) tensiunea, b) puterea, c) deplasarea totală, d) masa inerțială pentru 78,5 MPa

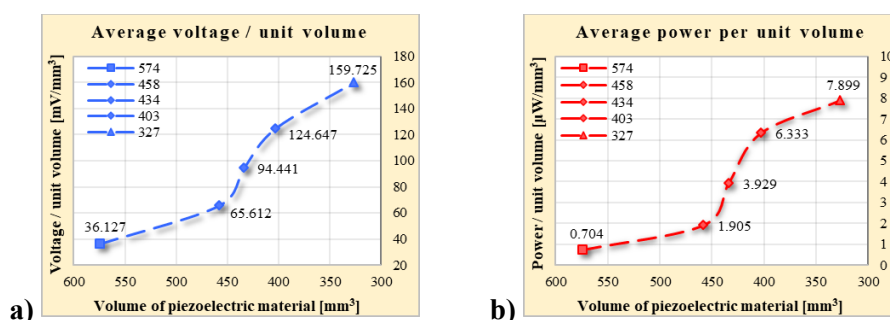


Figura 38. a) Tensiunea medie și b) Puterea medie [pe unitate de volum la aceeași tensiune]

4.7. Sarcina rezistivă optimă pentru maximizarea puterii piezoelectrice de ieșire

Sarcina optimă a fost evaluată pentru trei cazuri: plăcuță dreptunghiulară, plăcuță triunghiulară cu aceeași masă de 4 g și plăcuță triunghiulară sub aceleași tensiuni mecanice de 78,5 MPa. Figura 39 arată că rezistența pentru puterea maximă este cu aproape două ordine de mărime mai mică decât rezistența analizorului de spectru de 1 MΩ.

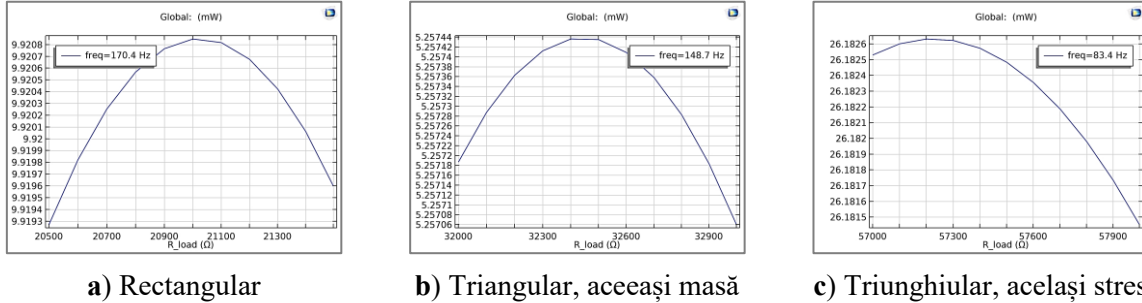


Figura 39. Curbele dependenței de sarcină pentru cele trei structuri evaluate

Tabelul 3 rezumă rezultatele. Puterile de ieșire maxime pentru rezistența optimă (P_{MAX_opt}) cresc covârșitor comparativ cu simulările cu impedanța 1 MΩ || 50 pF (P_{RMS_max}), și anume o creștere cu: ~1145% pentru structura dreptunghiulară, ~724% pentru structura triunghiulară cu aceeași masă și ~389% pentru structura triunghiulară sub aceeași tensiune.

Tabelul 3. Rezultatele simulării pentru sarcina rezistivă optimă pentru puterea maximă de ieșire

Nr.	Secțiune plăcuță (Vol_{piezo_layer})	Vol_{piezo_total} [mm ³]	m_i [g]	ρ_i [kg/m ³]	f_r [Hz]	f_{P_max} [Hz]	P_{a_max} [mW]	R_{load_opt} [kΩ]	P_{MAX_opt} [mW]	$V_{P_max_abs}$ [V]	k_{eff} [ND]
1	Dreptunghiular, (143.52 mm ³)	574.08	4	7866	171.2	170.4	0.797	21.0	9.921	20.413	0.27053
2	Triunghiular, aceeași masă (81,659 mm ³)	326.64	4	7866	149.7	148.7	0.638	32.4	5.257	35.715	0.26731
3	Triunghiular, aceleași stres (81,659 mm ³)	326.64	13.42	26400	84	83.4	5.358	57.2	26.183	54.777	0.26958

Răspunsul piezoelectric a fost optimizat în cadrul unui studiu *frequency domain* în funcție de sarcină, prin adăugarea unui *sweep* auxiliar al rezistenței, R_{load} . Creșterea maximă a puterii s-a obținut cu rezistența de 21 kΩ, la frecvența de 170,3 Hz (Tabelul 4).

Tabelul 4. Rezultatele simulării

Frequency domain	Resistor R_{load}	Capacitor	f_r [Hz]	f_{P_max} [Hz]	$abs(cir.RC1_rcr_v)$ [V]	$P_{max}@f_{P_max}$ [mW]
Frequency domain, range(170,0.1,172) Hz	1 MΩ	50 pF	171.2	170.4	39.927	0.797
Load dependence, range(170.2,0.1,171.2) Hz, auxiliary sweep, R_{load} , range(10,1,50) kΩ	Optimal: 21 kΩ	50 pF	171.2	170.3	20.466	9.973

5. TERMOELECTRICITATEA

Termoelectricitatea este conversia directă a gradientului de temperatură în electricitate sau, invers, a electricității în căldură prin două fenomene înrudite, și anume efectul Seebeck și efectul Peltier. În mod tradițional, *termoelectricitatea* înglobează trei fenomene, și anume *efectele Seebeck, Peltier și Thomson*. Chiar dacă sunt fenomene inverse (similar cu efectul piezoelectric direct vs. efectul piezoelectric invers), separarea efectelor Seebeck și Peltier este o consecință a descoperirilor lor independente de către doi fizicieni diferiți.

5.1. Efecte termoelectrice

Efectul termoelectric se referă la conversia în energie electrică a unui gradient termic (efectul Seebeck) și invers, producerea de energie termică (încălzire sau răcire) din energie electrică (efectul Peltier). Un al treilea fenomen termoelectric, denumit efect Thomson, le leagă împreună pe celelalte două. Fenomenele observate sunt:

- ✚ **Efectul Seebeck.** Presupune generarea unei tensiuni produse de un flux de căldură, la interfața a două conductoare electrice de natură diferită, cu coeficienți Seebeck diferiți.
- ✚ **Efect Peltier.** Se referă la încălzirea sau răcirea sistemului atunci când un curent de sarcină I_c prcurge interfața.
- ✚ **Efectul Thomson.** Efectul Thomson este cantitatea de căldură transportată de o sarcină în mișcare (electron) pe creștere cu o unitate de temperatură într-un material.

5.2. Scurt istoric și principiile termoelectrice de recuperare a energiei

Începutul observațiilor termoelectrice datează de la sfârșitul secolului al 18^{-lea}. În anul 1794, fizicianul italian Allessandro Volta a făcut o observație notabilă și foarte interesantă, și anume că o tijă metalică cu o diferență de temperatură între capetele sale a provocat un spasm în mușchii unei broaște. Având cunoștințele de astăzi, acest lucru se explică prin faptul că diferența de temperatură din tija metalică a dat naștere unui curent electric, excitând mușchiul. La acel moment, a rămas neexplicat până în 1822, când Thomas Seebeck a redescoperit același efect observând că acul unei busole deviază în vecinătatea a două joncțiuni metalice la temperaturi diferite [33]. Conversia directă în electricitate a gradientului de temperatură la joncțiunea a două conductoare diferite este cunoscută ca efect Seebeck. În ansamblu, **Efectul Seebeck, Efectul Peltier și Efectul Thomson** descriu principiile termoelectricității de astăzi.

5.3. Generatoare termoelectrice

Generatoarele termoelectrice sunt considerate o soluție fezabilă pentru aplicațiile de recuperare a energiei din căldura reziduală a proceselor industriale. Dispozitivele termoelectrice pot valorifica această căldură reziduală prin conversia diferențelor (sau gradientelor) de temperatură în energie electrică. Pentru creșterea eficienței de conversie, materialele

termoelectrice trebuie să aibă în același timp conductivitate electrică mare și conductivitate termică mică. Principiul de funcționare al TEG (Figura 40) se bazează pe efectul Seebeck. Termocuplurile unui TEG sunt înseriate electric, prin punți de cupru, și termic în paralel.

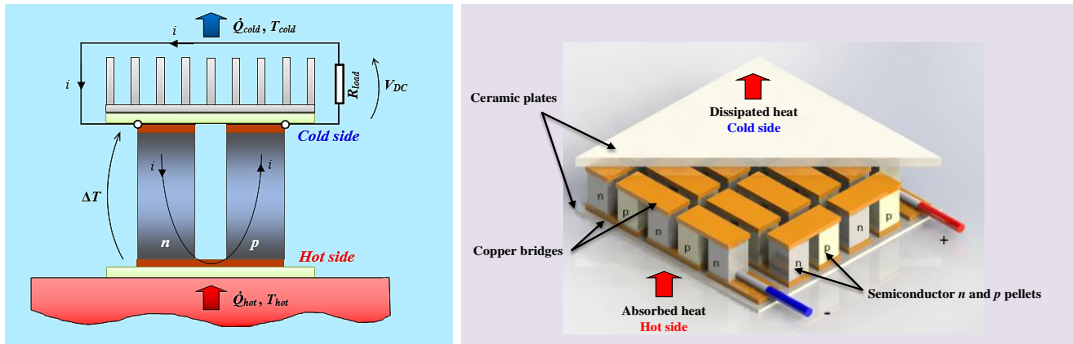


Figura 40. Principiul de funcționare a unui TEG (stânga) și modelul CAD al TEM [34] (dreapta)

5.4. Relațiile constitutive ale materialelor termoelectrice

Într-un dispozitiv termoelectric, principalele fenomene care au loc sunt efectele termoelectrice, respectiv Seebeck, Peltier și Thomson, însoțite de încălzirea Joule. Efectul Seebeck este cel util pentru conversia energiei din gradient de temperatură în energie electrică.

Eficiența de conversie termoelectrică a unui TEG se calculează ca raport între puterea electrică de ieșire și puterea termică absorbită la joncțiunea fierbinte a generatorului termoelectric, scrisă ca (5.1). Eficiența TEG-urilor depinde de diferența de temperatură ($\Delta T = T_h - T_c$) de-a lungul modulului și nu poate depăși randamentul Carnot.

$$\eta_{\text{TEG}} = \frac{P}{\dot{Q}_h} \Rightarrow \eta_{\text{TEG}} = \frac{R_L I^2}{\dot{Q}_h} \quad (5.1)$$

unde: $\eta_{\text{TEG}}[\%]$ – randamentul generatorului termoelectric; $P[\text{kWh}]$ – puterea electrică; $\dot{Q}_h[\text{J}]$ – debitul de căldură (puterea termică); $R_L[\Omega]$ – rezistența de sarcină externă; $I[\text{A}]$ – curentul electric.

Eficiența unui dispozitiv termoelectric este legată de *figura de merit* a materialului (zT), dependentă de proprietățile sale de transport, conform relației (5.2).

$$zT = \frac{\varepsilon^2 \cdot \sigma \cdot T}{k} \Rightarrow z = \frac{\varepsilon^2 \cdot \sigma}{k} \quad (5.2)$$

unde: zT [ND] – figura de merit termoelectrică; ε [V/K] – coeficientul Seebeck; σ [1/Ωm] – conductivitatea electrică; k [W/mK] – conductivitate termică; T [K] – temperatura.

5.5. Simulări cu element finit cu un singur termocuplu n-p

Un model CAD (Figura 41 stânga) a fost proiectat conform unui model de referință [35], [36] pentru a arăta dimensiunile termocuplului simulat. Condițiile la limită sunt ilustrate în Figura 41 dreapta. Suprafața plană a părții calde variază de la 70 °C la 120 °C într-un studiu staționar parametric. Temperatura suprafeței plane a părții reci este de 30 °C. În modulele TEG, perechile termoelectrice de tip p și n sunt conectate electric în serie și termic în paralel. Capătul piciorușului de tip n este definit ca Floating Potential, iar celălalt capăt, de la piciorușul de tip

p, este definit ca Ground. A fost rulat un studiu staționar, cu un *sweep* parametric al părții calde de (70, 1, 120) degC, iar partea rece a fost stabilită la 30 degC.

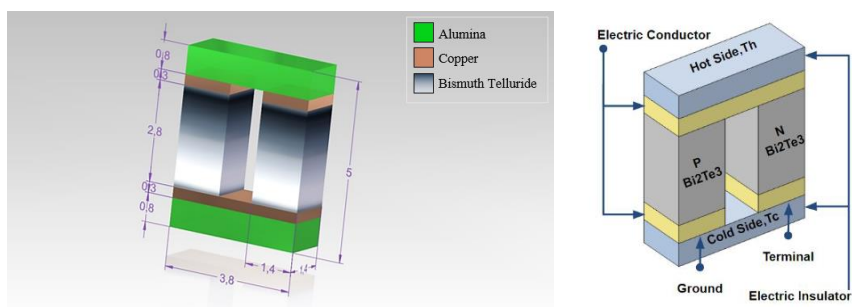


Figura 41. Model CAD cu dimensiunile geometriei TEG (stânga) și condițiile la limită (dreapta)

Piciorușul semiconductor de tip n este selectat în Figura 42, pentru care coeficientul Seebeck este setat cu semn negativ, spre deosebire de piciorușul de tip p.

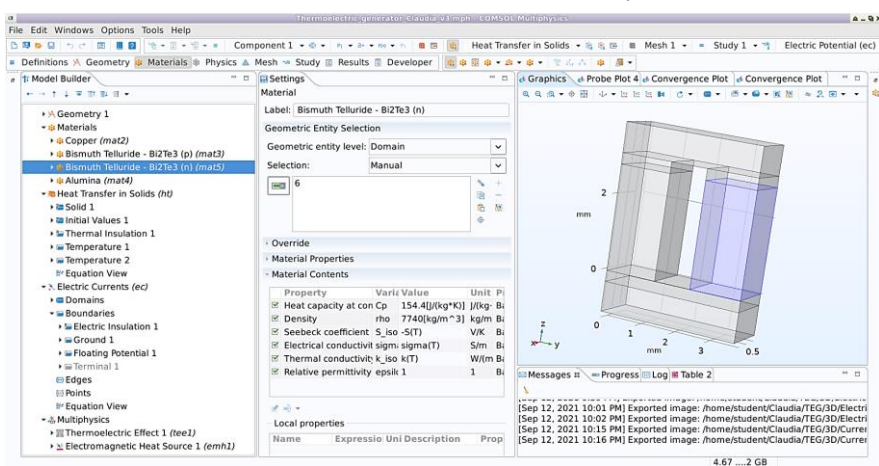


Figura 42. Interfața de simulare a programului FEM și geometria TEG (elemente Bi_2Te_3 selectate)

Simulările FEM au folosit o abordare multifizică, pentru o evaluare completă atât a problemei transferului de căldură, cât și a problemei câmpului electric. Acest lucru a fost realizat prin interconectarea a două fizici prin *Thermoelectric Effect* Multiphysics, și anume:

- ✚ *Heat Transfer in Solids*.
- ✚ *Electric Currents*.
- ✚ *Thermoelectric Effect* Multiphysics interface.
- ✚ *Electromagnetic Heating* Multiphysics interface.

Distribuția temperaturii este prezentată în Figura 43, împreună cu direcția fluxului total de căldură, evidențiată de săgețile roșii. Potențialul electric are un maxim de 19,62 mV pentru o diferență de temperatură de 90 °C între $T_h = 120$ °C și $T_c = 30$ °C.

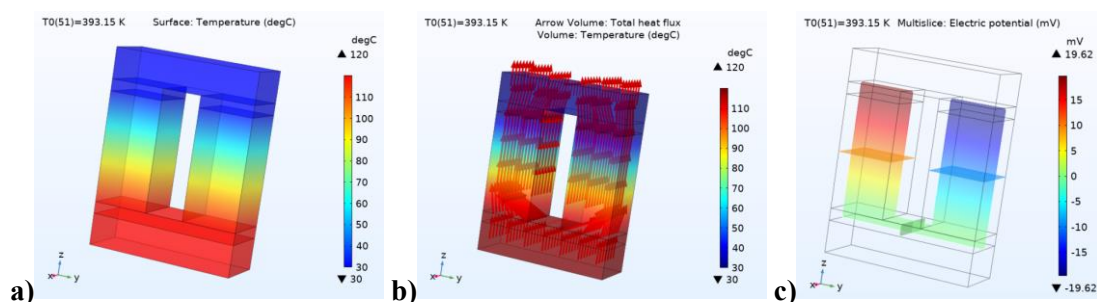
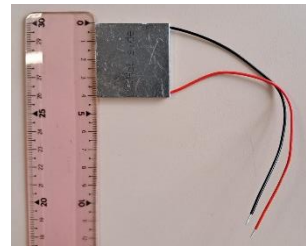


Figura 43. a) Temperatura; b) Flux termic total; c) Potențial electric, pentru partea caldă 120°C

6. SISTEMUL DE RECUPERARE A ENERGIEI TERMOELECTRICE PROPUȘ

6.1. Generator termoelectric TEGpro TE-MOD-10W4V-40

Partea termoelectrică a sistemului de recoltare a energiei propus în această teză constă în module termoelectrice pe bază de Bi_2Te_3 . Dimensiunile totale ale modulelor TEGpro TE-MOD-10W4V-40 sunt de 40 mm x 40 mm x 5 mm (L x W x H). Acestea pot furniza o putere de ieșire de până la 6 W / 10 W și o tensiune de ieșire de 4 VDC [37].



6.2. Modelul *digital twin* al modulului termoelectric fizic

6.2.1. Geometrie și condiții la limită

Modelul numeric consideră specificațiile și dimensiunile generale ale modulelor termoelectrice reale [37]. Pentru geometria modelului numeric, s-au utilizat un număr de 72 de termocupluri. Geometria modelului numeric din Figura 44 a fost proiectată pe baza unui *parametrized application builder* [38], destinat modulelor Petier de răcire. Dimensiunile de gabarit ale modulului sunt conform fișei tehnice [37], (L x W x H) 40 × 40 × 5 [mm].

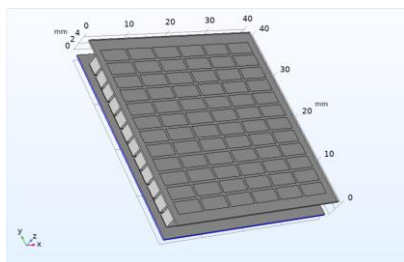


Figura 44. Geometria modelului termoelectric

Simulările FEM utilizează o abordare Multiphysics complet cuplată [39], a fost declarată telurură de bismut (Bi_2Te_3) pe piciorușele termoelectrice de tip n și p, cupru pentru electrozi, iar plăcile părților caldă și rece au fost considerate din aluminiă (ceramică).

Modelul *digital twin* al generatorului termoelectric utilizează o cuplare completă a următoarelor interfețe de fizică, pentru care sunt prezentate condițiile limită și inițiale:

- ✚ **Heat Transfer in Solids.** Temperatura 1 (T1) de 30 °C a fost declarată la partea rece, și temperatura 2 (T2) de 80 °C a fost stabilită inițial pentru partea caldă (Figura 45a).
- ✚ **Electric Currents.** Condițiile limită Ground (GND) și Floating Potential (FP) sunt aplicate pe suprafața în contact cu placa caldă, ca în Figura 45b.

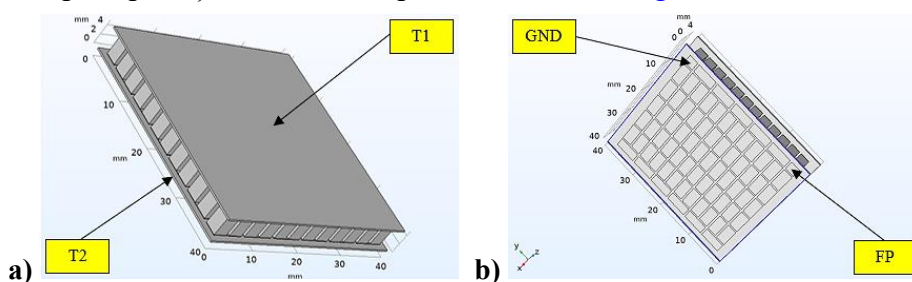


Figura 45. a) Condiții limită aplicate în a) Transferul de căldură în solide și b) Curenți electrici

- ✚ **Thermoelectric Effect** Multiphysics interface cuplează interfețele fizice Heat Transfer in Solids cu Electric Currents pentru modelarea completă a efectelor termoelectrice Peltier-Seebeck-Thomson [40].
- ✚ **Electrical Circuit** se utilizează atunci când trebuie adăugate componentele unui circuit extern în simulare. O rezistență de sarcină de 2,4 kΩ a fost declarată în paralel.
- ✚ **Solid Mechanics**, pentru considerarea vibrațiilor triaxiale ale CU90G [41], [42].

6.3. Simulări cu condiții la limită de temperatură la partea rece și la partea caldă

6.3.1. Studiu Stationary

Studiul staționar își propune evaluarea parametrilor termici și electrice. A fost considerat un sweep parametric pentru T_{hot} , în intervalul(40,5,80) °C. Gradientul de temperatură prin TEG, de la 30 °C la 80 °C, și ieșirea în volți curent continuu (VDC) pentru $Thot = 80$ °C sunt prezentate în Figura 46.

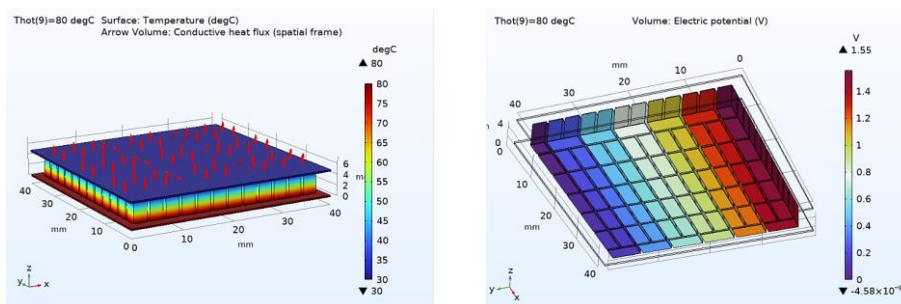


Figura 46. Gradientul de temperatură prin TEG (stânga) și potențialul electric (dreapta), $Thot = 80$ °C

Figura 47 prezintă caracteristicile de tensiune, curent și putere în funcție de temperatura părții calde, reprezentate grafic în programul de simulare. Tensiunea prin dispozitiv este reprezentată pe axa primară din stânga, în timp ce axa secundară din partea dreaptă conține valorile curentului [mA] și ale puterii [mW]. Dispozitivul este reprezentat de rezistența de sarcină de 2,4 kΩ considerată. Liniaritatea dependenței curent-tensiune validează faptul că rezultatele obținute sunt corecte, confirmată și de tendința curent-putere

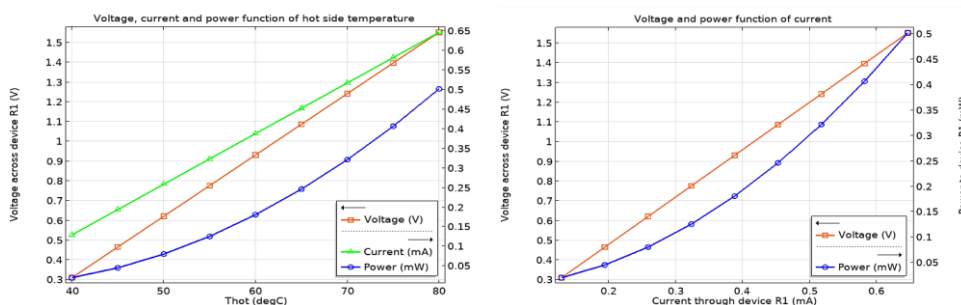


Figura 47. Tensiunea, curentul și puterea către dispozitiv, în funcție de T_{hot} [12]

6.3.2. Studiu structural în domeniul frecvenței

S-a evaluat, printr-un studiu frequency domain, dacă modulul termoelectric poate rezista la vibrațiile sinusoidale ale compresorului [12]. Valoarea maximă a tensiunii de 0,759

kPa la 83,5 Hz care a rezultat în **Figura 48** este neglijabilă în comparație cu tensiunea de deformare a telurului de bismut, care suportă valori de compresiune de până la 62 MPa [43].

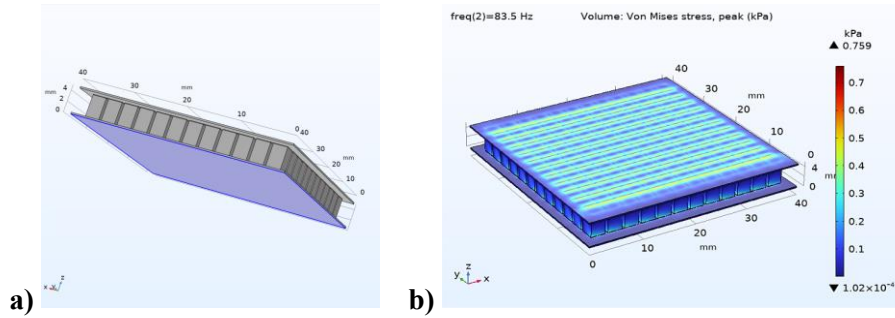


Figura 48. a) Domeniu de aplicare a vitezei prescrise, b) Evaluarea tensiunilor von Mises

6.4. Simulări cu *heat flux*, și îmbunătățirea eficienței cu un radiator

Simulările utilizează o cuplare completă a Heat Transfer in Solids cu Electric Currents, via Thermoelectric Effect Multiphysics [44], pentru o modelare completă a efectelor Peltier-Seebeck-Thomson. Electromagnetic Heating este, de asemenea, cuplat pentru a ține seama de încălzirea rezistivă (efectul Joule)[11].

Comportamentul termoelectric este evaluat prin interconectarea a trei fizici:

- ✚ **Heat Transfer in Solids:** s-a declarat o temperatură inițială a părții calde, T_{hot} , de 100 degC, și un flux de căldură convectiv (convecție naturală cu aer la 1 atm, cu temperatura externă de 20 degC) în locul T_{cold} utilizat în setul anterior de simulări. Pentru modelul cu radiator din **Figura 49**, se adaugă o condiție de contact termic pe partea rece a TEG.
- ✚ **Electric Currents:** Ground și Floating Potential de tip Circuit sunt declarate pe fețele piciorușelor terminale (vezi [11]).
- ✚ **Electrical circuit:** Conexiunile nodurilor sunt declarate: 0 – ground, și 1 – External I-terminal, aplicând floating potential (ec/fp1) de la Electric Currents, relativ la ground. O rezistență de sarcină de 2,4 k Ω este declarată în paralel cu modulul termoelectric.

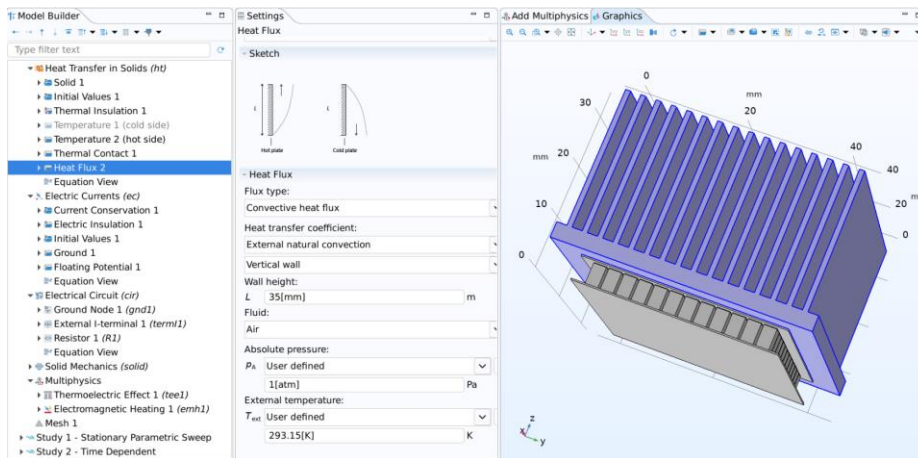


Figura 49. Model de simulare cu radiator care prezintă condițiile limită Heat Flux și setările

6.4.1. Studiu staționar

A fost efectuat un studiu staționar cu parametric sweep al temperaturii părții calde, $Thot$, interval(30,5,100) degC. Puterea calculată [45] consideră tensiunea și curentul prin rezistor (RI), scrise ca: $0,5 * \text{realdot}(\text{cir.R1_v}, \text{cir.R1_i})$. Graficele din Figura 50a și Figura 50b prezintă diferențele importante dintre TEG fără radiator și cu radiator. O îmbunătățire cu un ordin de mărime, în condiții de convecție naturală, este obținută atunci când se utilizează radiatorul. Tensiunea este de 1,2 V cu radiator față de 0,19 V fără, curentul ajunge la $\sim 0,3$ mA față de 0,08 mA, iar puterea ajunge la aproape 0,3 mW față de 0,008 mW.

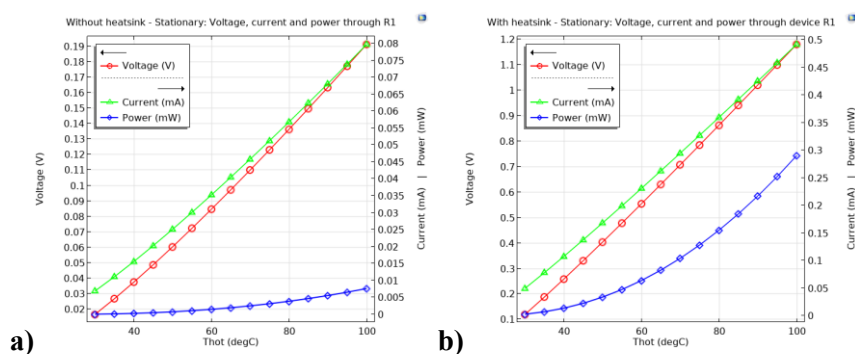


Figura 50. Studiu staționar - tensiune, curent și putere: a) fără heatsink, b) cu heatsink

6.4.2. Studiu Time Dependent

Merită să vedem cum se comportă răspunsul termoelectric în timp și cât de repede se stabilizează termic. Un studiu Time Dependent, range(0,1,60) min a fost, de asemenea, rulat pentru a vedea stabilizarea termică între părțile caldă și rece, cu $Thot = 100$ degC. Graficele din Figura 51 oferă informații suplimentare cu privire la efectul radiatorului asupra parametrilor electrici, aceștia scăzând mai lin și menținând valori cu aproape un ordin de mărime mai mari decât fără radiator. Studiul staționar furnizează valorile după stabilizarea termică.

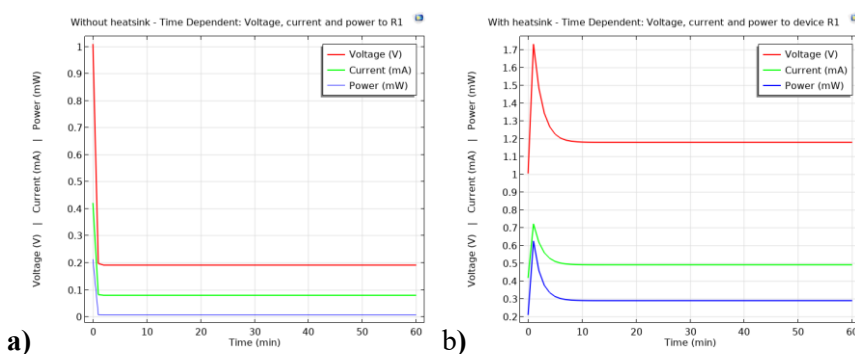


Figura 51. Studiu dependent de timp – tensiune, curent și putere: a) fără radiator, b) cu radiator

6.4.3. Studiu structural în domeniul frecvenței

În cazul fără radiator, tensiunile mecanice la declararea fluxului de căldură sunt ușor mai mari decât la declararea anumitor temperaturi pentru partea caldă și pentru partea rece, respectiv 0,965 kPa față de 0,759 kPa la frecvența de 83,5 Hz (a se vedea Figura 52a). Pentru validitatea concordanței cu condițiile experimentale, evaluarea este mai relevantă pentru

modelul cu radiator. **Figura 52b** arată o creștere a tensiunilor mecanice cu mai mult de un ordin de mărime, la 14,1 kPa. Această valoare este încă neglijabilă în comparație cu tensiunea de deformare a materialului termoelectric, care rezistă la tensiuni de compresiune până la 62 MPa.

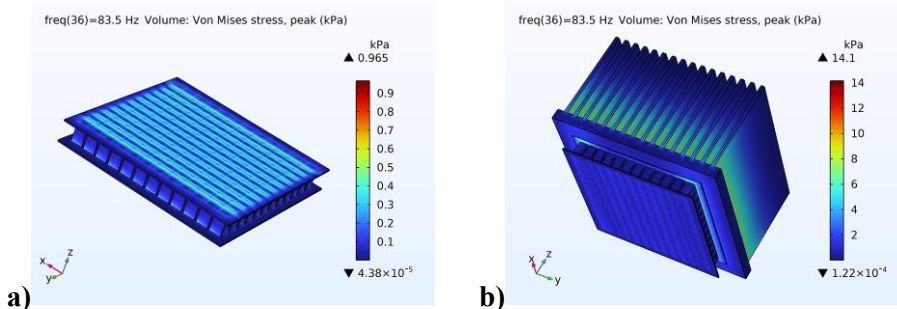


Figura 52. Evaluarea tensiunilor mecanice: **a)** fără radiator, **b)** cu radiator

7. TESTE EXPERIMENTALE CU SISTEMELE DE RECOLTARE A ENERGIEI ÎNTR-UN MEDIU INDUSTRIAL RELEVANT

Această secțiune propune validarea experimentală preliminară în condiții industriale relevante, atât pentru dispozitivele piezoelectrice, cât și pentru cele termoelectrice de recoltare a energiei, abordate în această teză. Configurația experimentală de măsurare pentru ambele sisteme de recoltare a energiei piezoelectrice și termoelectrice este prezentată în **Figura 53**.

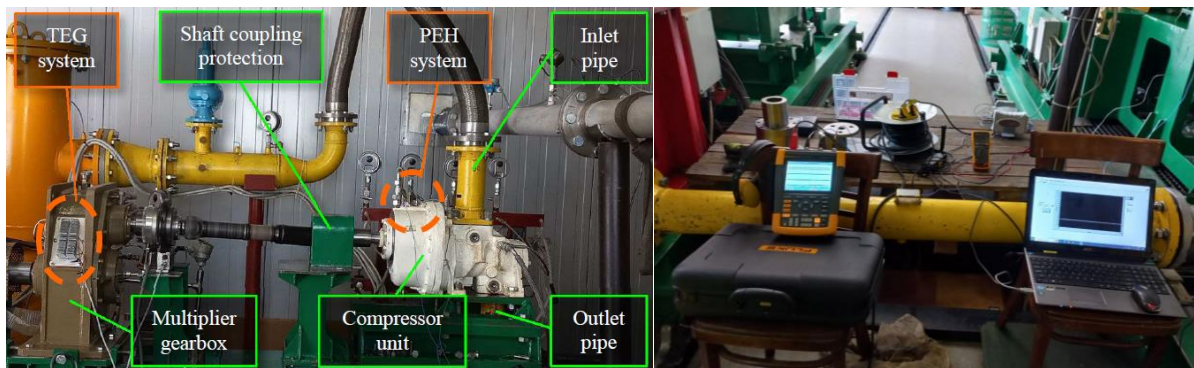


Figura 53. Skid compresor, la sediul INCDT COMOTI (stânga), Configurație experimentală (dreapta)

Imaginea termografică din **Figura 54** a fost realizată în timpul validării experimentale.

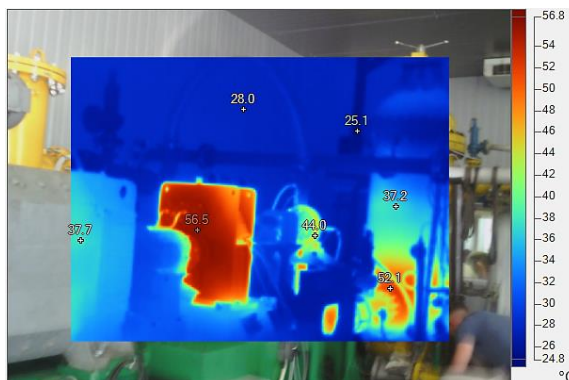


Figura 54. Imagine termografică a ansamblului skid-ului compresorului

7.1. Sistem piezoelectric de recoltare a vibrațiilor unui compresor cu șurub

Această lucrare face un pas înainte către aplicațiile practice în industrie (Figura 55), atingând unui nivel de maturitate tehnologică TRL 6 prin demonstrarea tehnologiei într-un mediu industrial relevant [42]. Testele de validare au fost efectuate în data de **6 iulie 2023**, la prânz, când s-a înregistrat o temperatură maximă de 35 °C în București, România [46].



Figura 55. Vizualizarea și înregistrarea răspunsului piezoelectric pe scopometru

Compresorul, antrenat de un motor de curent continuu la 2500 rpm cu o variație de ± 20 rpm, funcționează în regim cvasistaționar. Componenta de frecvență a rotorului tată, găsită la ~ 83 Hz, a fost extrasă din spectrele de vibrații și a fost aleasă datorită stabilității și amplitudinilor sale mai mari [41], [42]. Frecvența de rezonanță a transductorului piezoelectric a trebuit ajustată în prealabil în laborator (Figura 56), de la ~ 210 Hz la 83 Hz, cu o masă inerțială de 7,3 g [47], pentru a avea un punct de plecare mai apropiat pentru ajustarea pe compresor. Testele de laborator sunt predispușe la limitări în comparație cu testarea pe compresor.

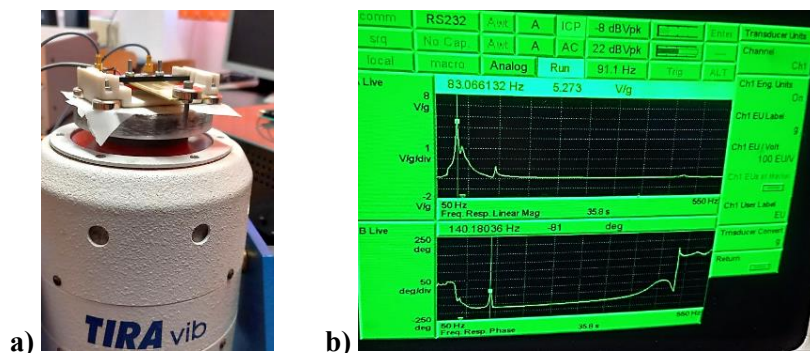


Figura 56. Teste de laborator și răspunsul în tensiune afișat pe analizorul de spectru

Pe compresor s-a fost utilizată o prindere magnetică. Punctul 1 a fost ales ca loc de montare pentru testele cu sistemul de recoltare piezoelectric. A fost necesară o reglare în timp real a frecvenței PEH pentru a se potrivi cât mai bine cu componenta de frecvență a compresorului, pentru a obține răspuns piezoelectric maxim. Elementele masei inerțiale au fost cântărite la 9,0 g (Figura 57 stânga). Imaginea termografică din Figura 57 dreapta marchează un maxim de 65,2 °C pe carcasa compresorului în apropierea locului de montare a PEH. Temperatura plăcuței de 49 °C este ridicată pentru o perioadă mai lungă de funcționare [48].

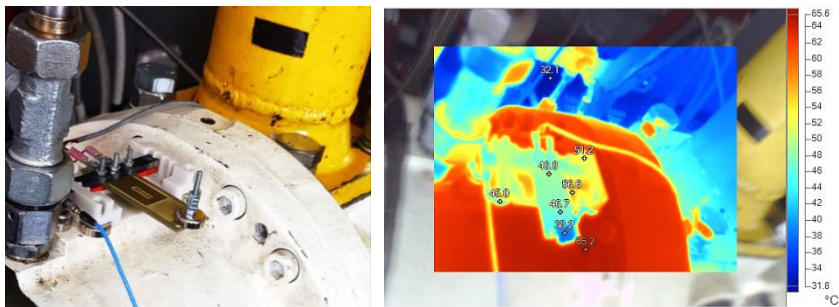


Figura 57. Transductor piezoelectric montat pe compresor (stânga) și imagine termografică (dreapta)

Răspunsul piezoelectric în tensiune a fost înregistrat și este reprezentat pe graficul din Figura 58 stânga. În dreapta este prezentat un zoom-in pe intervalul de tensiune înregistrat în graficul din stânga, oferind o perspectivă asupra răspunsului piezoelectric cvasi-sinusoidale.

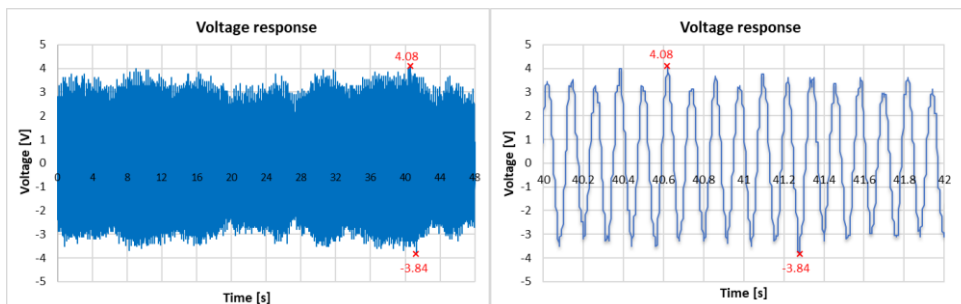


Figura 58. Răspuns piezoelectric în tensiune cvasi-sinusoidală (stânga) și zoom (dreapta)

Parametrii maximi de ieșire mășurați sunt rezumați în Tabelul 5 de mai jos.

Tabelul 5. Parametrii piezoelectrice de ieșire mășurați

Simbol	Cantitatea	Valoare	U.M.
V_{max}	Tensiunea AC maximă	4.08	V
I_{RMS}	Curent RMS maxim	514.9	μA
P_{RMS}	Putere RMS maximă	1.485	mW
f	Frecvența	83 ± 1	Hz

7.2. Sistem termoelectric de recoltare a căldurii unui compresor rotativ cu șurub

Două TEG-uri au fost montate cu șuruburi, cu radiatoare, pe multiplicator (Figura 59). Un capac de înlocuire a fost executat fizic. Testele au fost efectuate la data de 6 iunie 2023.

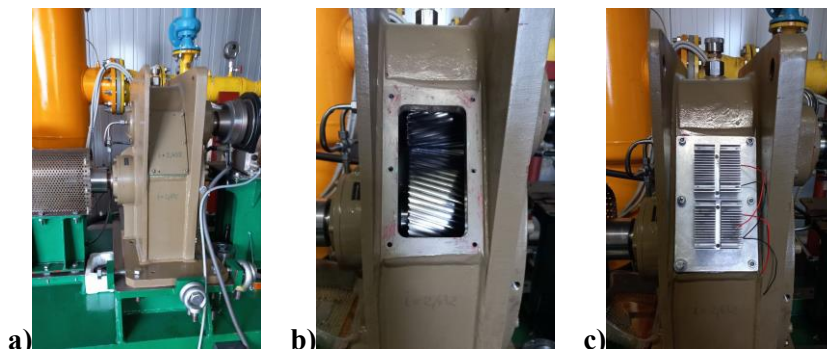


Figura 59. a) Multiplicator cu capac original, b) Angrenaje interioare, c) TEG-uri montate pe duplicat

Aceste etape de pregătire a TEG-urilor sunt ilustrate în imaginile din [Figura 60](#).

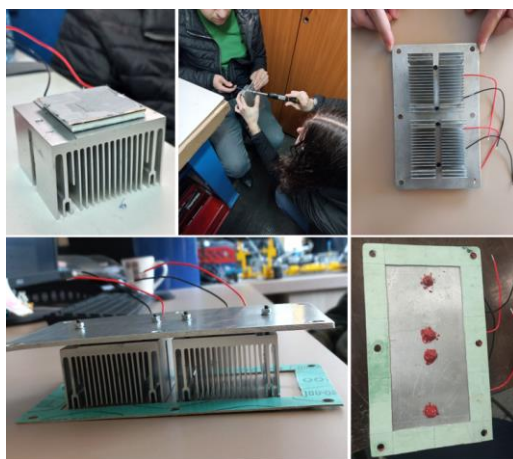


Figura 60. Etapele de lucru pentru pregătirea sistemului de recoltare termoelectrică pentru instalare

Au fost realizate imagini termografice pentru a evalua condițiile de funcționare a celor două module termoelectrice. Modulul inferior a fost etichetat TEG1, iar modulul superior a fost etichetat TEG2. Diferențele dintre ieșirile electrice sunt explicate prin [Figura 61](#), care evidențiază clar o temperatură mai ridicată în jumătatea superioară a multiplicatorului.

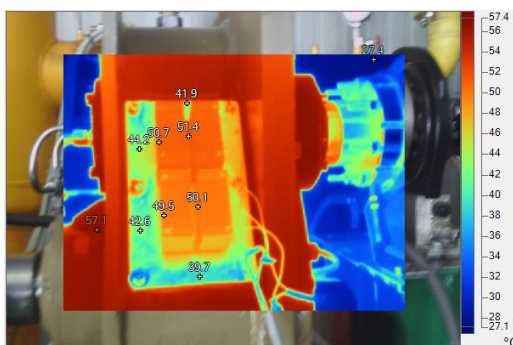


Figura 61. Scanarea termografică a celor două TEG-uri de pe capacul multiplicatorului

Imaginea termografică a TEG1 din [Figura 62](#) stânga, realizată transversal de jos, arată o diferență de temperatură de $\sim 2,1$ °C pe modulul TEG1. Un gradient de temperatură mai mare de $\sim 5,6$ °C prin modulul TEG2 este observat în [Figura 62](#) dreapta, realizată transversal de sus.

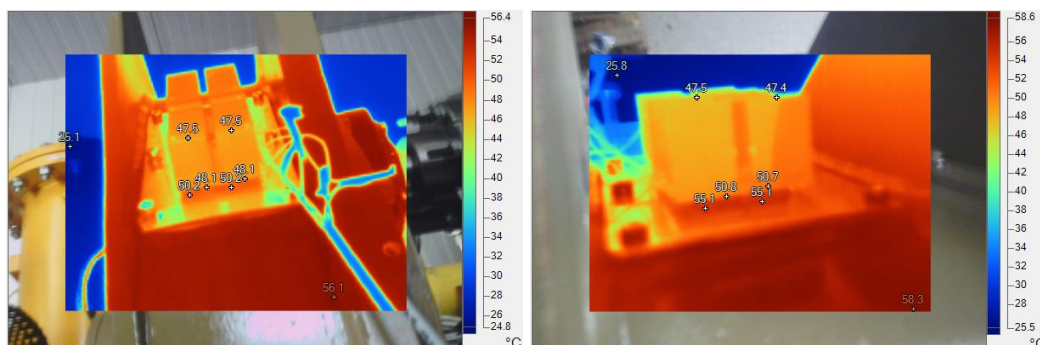


Figura 62. Imaginea termică a TEG1 inferior (stânga) și a TEG2 superior (dreapta)

Graficul din [Figura 63](#) prezintă ieșirile separate de tensiune produse de cele două module termoelectrice. După cum era de așteptat în urma analizei termice, chiar dacă pornesc de la aproximativ aceeași valoare, TEG2 ajunge la o tensiune maximă mai mare decât TEG1 după stabilizarea termică a compresorului.

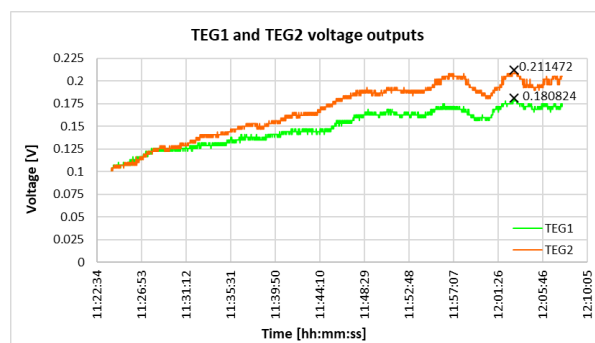


Figura 63. ieșiri separate de tensiune de la cele două generatoare termoelectrice instalate

Cele două module au fost conectate în serie (Figura 64) care prezintă tensiunea de ieșire însumată. Conexiunea în serie a fost realizată după măsurarea separată, când compresorul era deja stabil din punct de vedere termic. Curentul în serie a fost măsurat la 115 mA.

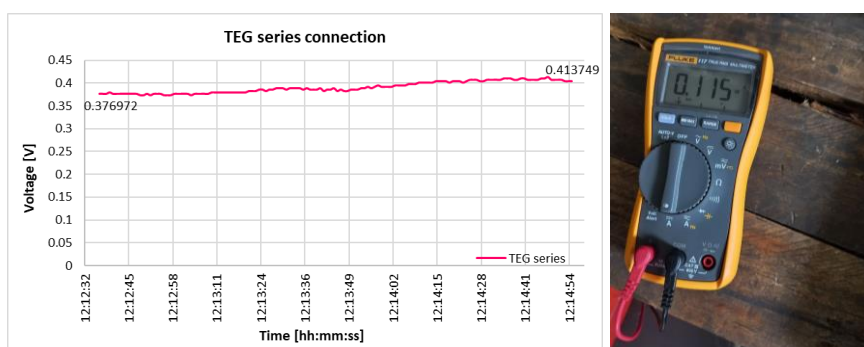


Figura 64. Tensiunea și puterea generatoarelor termoelectrice conectate în serie

Curentul termoelectric este mult mai mare decât curentul piezoelectric, de ordinul sutelor de miliamperi față de microamperi. Generatoarele termoelectrice prezintă o stabilitate mai mare, având și avantajul unei ieșiri în curent continuu pentru alimentarea dispozitivelor cu consum redus. Acest lucru conferă generatoarelor termoelectrice robustețe, stabilitate a ieșirii și potențial de funcționare autonomă. Pe de altă parte, transductoarele de energie piezoelectrice oferă un răspuns de tensiune mai mare, dar acest lucru se întâmplă numai la rezonanță, cu un curent slab. Cu toate acestea, provocările sunt interesante și satisfăcătoare în ceea ce privește cercetarea și găsirea de soluții. Transductoarele piezoelectrice sunt imprevizibile și dificil de controlat, fiind astfel o sursă abundentă pentru noi cercetări, dezvoltări și publicații academice, spre bucuria cercetătorilor din această nișă.

8. CONCLUZII, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI CERCETĂRI VIITOARE

Prezenta teză demonstrează sistemele piezoelectrice și termoelectrice de recoltare a energiei, al căror scop este de a valorifica vibrațiile și încălzirea termică a unui compresor industrial cu șurub rotativ care funcționează în mod cvasi-staționar. Teza prezintă toate etapele parcurse pentru realizarea acestor microsisteme de recoltare a energiei prin modelare, calcul, simulare numerică, testare în laborator, până la adevărata provocare de validare în mediu industrial relevant. Răspunsul piezoelectric obținut în urma testelor preliminare pe compresor este promițător pentru lucrări experimentale ulterioare.

Teza a abordat simulări realiste cu modele *digital twin*, validate experimental, pentru aplicații piezoelectrice și termoelectrice de conversie a vibrațiilor și a căldurii reziduale de la un compresor industrial cu șurub. În timp ce modelele simulate 3D se bazează pe dispozitive fizice, condițiile la limită au considerat, mai mult, date reale măsurate pe compresor.

Scopul acestei teze nu a fost de a modela o sursă de vibrații și de căldură ideale, ca majoritatea lucrărilor din literatura de specialitate, pentru a obține valori ridicate pentru parametrii electrici, ci de a evalua ce se poate aștepta practic de la aceste două microgeneratoare de energie în condiții industriale reale, luând în considerare cei mai importanți parametri care pot reduce conversia în energie electrică, pot avea o influență negativă asupra materialelor și dispozitivelor și pot chiar deteriora dispozitivele.

După o cercetare foarte amănunțită a literaturii de specialitate, nu a fost găsită nicio lucrare care să raporteze implementarea cu succes a recoltării energiei din surse multiple cu această combinație de generatoare, pe mașini industriale, având în vedere condițiile de lucru dificile care ar putea afecta răspunsurile piezoelectrice și termoelectrice.

Contribuții originale și elemente inovative

Teza prezintă doar cercetări efectuate de autor, legate de tema propusă. Consider important să menționez că tema a fost aleasă din pasiune și interes trezit în timpul masteratului, datorită unui subiect intrigant – *recuperarea de energie și piezoelectricitatea* – care în prezent par să aducă oportunități, direcții și rezultate de cercetare nesfârșite.

Ca originalitate și noutate a cercetărilor prezentate în această teză, menționez:

- ✚ Analiza dependenței de temperatură a răspunsului transductorului piezoelectric.
- ✚ Optimizarea formei transductorului piezoelectric către secțiunea triunghiulară, cu două analize inovative care nu au mai fost efectuate până acum în literatură, și anume evaluarea răspunsului pe unitate de volum de material activ, precum și aducerea celor cinci structuri la aceeași tensiune mecanică, pentru o comparație mai relevantă.
- ✚ Teste experimentale cu sistemele PEH și TEH într-un mediu relevant din punct de vedere industrial, pe un compresor cu șurub, atingând un TRL 6.
- ✚ Simulări numerice cu date măsurate pe compresor, luând în considerare temperatura reală și vibrațiile triaxiale pentru ambele modele, piezoelectric și termoelectric.
- ✚ Din cunoștințele autorului, nicio lucrare publicată în literatura de specialitate nu a raportat până în prezent implementarea recoltării de energie cu dispozitive piezoelectrice pe un compresor industrial. Prin urmare, această teză reprezintă un prim pas pentru trecerea de la tehnologia validată în laborator la aplicații in-situ.

Pentru mai multe informații despre contribuțiile originale, rog cititorii interesați să consulte articolele publicate, care diseminează tematicile de cercetare prezentate în această teză.

Nu am avut un proiect în desfășurare la institut de la care să preiau materiale sau date, toate materialele prezentate sunt noi și au fost cercetate în timpul stagiului de doctorat. În timpul doctoratului, am lucrat la două propuneri de proiect, dintre care una a fost finanțată ca parte componentă a proiectului "Nucleu" PN 23.12.09, contract 31N/2023. Propunerea de subproiect component, intitulată „*Sistem de recuperare a energiei din vibrații și căldură, prin efect*

piezoelectric și termoelectric, în vederea alimentării senzorilor wireless” a fost elaborată și depusă de autorul acestei teze, drd. ing. Claudia Irina Săvescu (Borzea), fiind responsabil de subproiect. Proiectul se desfășoară în prezent în cadrul unui proiect mai mare, „*Cercetări fundamentale privind sistemele de recuperare a energiei vântului și a căldurii reziduale și geotermale precum și din deșeuri și masă vegetală*”.

Directii și obiective de cercetare viitoare

Activitatea desfășurată deschide noi căi de cercetare și dezvoltare pentru a atinge un nivel mai ridicat de pregătire tehnologică. Un nod de senzori fără fir este prevăzut să fie alimentat de energia recuperată, după testarea cu un circuit demonstrativ. Din moment ce vibrațiile compresorului au loc pe toate cele trei axe, un accelerometru triaxial ar trebui utilizat în cadrul experimentelor viitoare. În acest scop, trebuie utilizat un dispozitiv de măsurare care să suporte intrarea ICP (Integrated Circuit Piezoelectric).

A fost proiectat și dezvoltat un circuit de redresare pentru transductoarele piezoelectrice. Circuitul utilizează diode Schottky cu cădere de tensiune redusă (0,3 V per diodă). O altă diodă este plasată în paralel cu puntea, pentru a nu întrerupe întregul circuit în cazul în care unul dintre transductoarele piezoelectrice funcționează defectuos. Acest circuit va fi utilizat atunci când două sau mai multe transductoare piezoelectrice vor fi conectate electric, pentru a evita anularea răspunsurilor reciproce dacă vibrează în antifază.

Cercetările viitoare se vor concentra pe optimizarea celor două tehnologii pentru utilizarea în medii industriale, împreună cu conectarea circuitelor necesare pentru WSN-uri. De asemenea, se va acorda atenție oricărui factor care ar putea influența răspunsurile sau pune în pericol dispozitivele de recoltare a energiei. Diminuarea riscurilor va fi de mare importanță.

Deoarece o sarcină optimă poate crește puterea piezoelectrică de ieșire cu mai mult de un ordin de mărime, lucrările viitoare vor aborda, de asemenea, diferențele dintre modelul *digital twin*, testarea în condiții ideale de laborator, și condițiile industriale cu componente de circuit necesare pentru alimentarea unui circuit de recoltare a energiei.

Se vor urmări îmbunătățiri ale captării termoelectrice prin introducerea ventilației, atât în lucrările practice, cât și în cadrul simulărilor numerice, luând în considerare convecția forțată externă. De asemenea, studiul în funcție de timp va fi extins cu o scanare auxiliară a temperaturii părții calde. O îmbunătățire extremă care va fi, fără îndoială, primul lucru de luat în considerare pentru dispozitivele piezoelectrice va fi asigurarea unei răcirii și a unei distanțări corespunzătoare de carcasa compresorului.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] L. Dhakar, ‘Overview of Energy Harvesting Technologies’, in *Triboelectric Devices for Power Generation and Self-Powered Sensing Applications*, L. Dhakar, Ed., in Springer Theses. , Singapore: Springer, 2017, pp. 9–37. doi: 10.1007/978-981-10-3815-0_2.
- [2] R. Dauksevicius and D. Briand, ‘Energy Harvesting’, in *Material-Integrated Intelligent Systems - Technology and Applications*, John Wiley & Sons, Ltd, 2018, pp. 479–528. doi: 10.1002/9783527679249.ch21.

- [3] M. Choi, K. M. Farinholt, S. Anton, J.-R. Lee, and G. Park, 'Multi-source energy harvesting for wireless SHM systems', in *Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies 2013*, SPIE, Mar. 2013, pp. 73–82. doi: 10.1117/12.2011883.
- [4] Y. Li, Y. Liu, X. Liu, X. Wang, and Q. Li, 'An energy extraction enhanced interface circuit for piezoelectric and thermoelectric energy harvesting', *IEICE Electronics Express*, vol. 16, no. 6, pp. 20190066–20190066, 2019, doi: 10.1587/elex.16.20190066.
- [5] Z. Hu, J. Qiu, X. Wang, Y. Gao, X. Liu, Q. Chang, Y. Long, and X. He, 'An integrated multi-source energy harvester based on vibration and magnetic field energy', *AIP Advances*, vol. 8, no. 5, p. 056623, Dec. 2017, doi: 10.1063/1.5006614.
- [6] K. Fan, Q. Tan, H. Liu, Y. Zhu, W. Wang, and D. Zhang, 'Hybrid piezoelectric-electromagnetic energy harvester for scavenging energy from low-frequency excitations', *Smart Mater. Struct.*, vol. 27, no. 8, p. 085001, Jul. 2018, doi: 10.1088/1361-665X/aaae92.
- [7] C. Borzea and D. Comeagă, 'Adjusting the Resonant Frequency of a Cantilever Piezoelectric Harvester', *Scientific Journal TURBO*, vol. V, no. 2, pp. 11–18, 2018.
- [8] C. Borzea and D. Comeagă, 'Analysis and Optimization of a Piezoelectric Energy Harvester', *E3S Web Conf.*, vol. 112, p. 04001, 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201911204001.
- [9] C. Borzea, D. Comeagă, A. Stoicescu, and C. Nechifor, 'Piezoelectric Harvester Performance Analysis for Vibrations Harnessing', *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering*, vol. 81, pp. 237–248, Aug. 2019.
- [10] C. I. Borzea and C. D. Comeagă, 'Reliability of Euler-Bernoulli Model for Multilayer Composite Piezoelectric Beams', in *2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Mar. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/ATEE.2019.8724964.
- [11] C. Săvescu, A. Morega, Y. Veli, and V. Petrescu, 'Numerical Modelling of Thermoelectric Energy Harvesting from Industrial Compressor Waste Heat', in *2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Mar. 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/ATEE58038.2023.10108390.
- [12] C. Săvescu, V. Petrescu, D. Comeaga, R. Carlanescu, M. Roman, D. Lale, and A. Mitru, 'Thermal Potential of a Twin-Screw Compressor as Thermoelectric Energy Harvesting Source', *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 14, no. 2, Art. no. 2, Apr. 2024, doi: 10.48084/etasr.6417.
- [13] D. Briand, E. Yeatman, and S. Roundy, 'Micro Energy Harvesting | Wiley', Wiley.com. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Micro+Energy+Harvesting-p-9783527672929>.
- [14] P. Martín Sánchez, F. J. Rodríguez Sánchez, and E. Santiso Gómez, 'An Experimental Strategy for Characterizing Inductive Electromagnetic Energy Harvesters', *Sensors*, vol. 20, no. 3, Art. no. 3, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20030647.
- [15] Mc-Cast Engineering, 'Why is there water in my air compressor?' Accessed: Jan. 31, 2024. [Online]. Available: <https://mc-castengineering.com/reports-blog-en/2019/11/27/why-is-there-water-in-my-air-compressor>.
- [16] CompAir, 'All About Oil Lubricated Air Compressor Technology'. Accessed: Jan. 31, 2024. [Online]. Available: <https://www.compair.com/en-pk/technologies/oil-lubricated-air-compressor>.
- [17] P. Dineva, D. Gross, R. Müller, and T. Rangelov, 'Piezoelectric Materials', in *Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials: Solution of Time-Harmonic Problems via BIEM*, P. Dineva, D. Gross, R. Müller, and T. Rangelov, Eds., in *Solid Mechanics and Its Applications*, Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 7–32. doi: 10.1007/978-3-319-03961-9_2.
- [18] C. R. Bowen, H. A. Kim, P. M. Weaver, and S. Dunn, 'Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications', *Energy Environ. Sci.*, vol. 7, no. 1, pp. 25–44,

Dec. 2013, doi: 10.1039/C3EE42454E.

- [19] APC, ‘Piezoelectric Charge Constants’. Accessed: Feb. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectric-constants.html>.
- [20] J. Ransley, ‘Piezoelectric Materials: Understanding the Standards’, COMSOL. Accessed: Feb. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/blogs/piezoelectric-materials-understanding-standards/>.
- [21] COMSOL, ‘Structural Mechanics Module User’s Guide’. [Online]. Available: <https://doc.comsol.com/6.1/doc/com.comsol.help.sme/StructuralMechanicsModuleUsersGuide.pdf>.
- [22] Midé Technology, ‘PPA PRODUCTS Datasheet & User Manual’. [Online]. Available: <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/3841176/Data-Sheets/ppa-piezo-product-datasheet.pdf>.
- [23] R. Carter and R. Kensley, ‘Introduction to Piezoelectric Transducers’. [Online]. Available: <https://blog.piezo.com/hubfs/Manuals/Introduction-to-Piezoelectric-Transducers-Carter-Kensley.pdf>.
- [24] Virtual Amrita Laboratories, Amrita Vishwa Vidyapeetham University, ‘Free Vibration of a Cantilever Beam (Continuous System) (Theory)’. Accessed: Feb. 16, 2024. [Online]. Available: <https://vlab.amrita.edu/?sub=3&brch=175&sim=1080&cnt=1>.
- [25] M. A. Ahmad, A. M. Elshurafa, K. N. Salama, and H. N. Alshareef, ‘Modeling of MEMS piezoelectric energy harvesters using electromagnetic and power system theories’, *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, no. 8, p. 085001, Jun. 2011, doi: 10.1088/0964-1726/20/8/085001.
- [26] COMSOL, ‘Time Dependent’. Accessed: May 07, 2024. [Online]. Available: https://doc.comsol.com/6.1/doc/com.comsol.help.comsol/comsol_ref_solver.35.016.html.
- [27] National Instruments, ‘Sound and Vibration Measurement Suite - NI’, <https://www.ni.com>. Accessed: May 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.ni.com/docs>.
- [28] Piezo Systems, ‘Material Properties - Thermal Dependency of Material Properties’. Accessed: Jun. 05, 2024. [Online]. Available: <https://support.piezo.com/article/62-material-properties#thermal>.
- [29] C. Săvescu, D. Comeagă, and A. Stoicescu, ‘Optimization of cantilever piezoelectric harvester to triangular shape with material reduction using finite element analysis’, *Heliyon*, vol. 10, no. 13, p. e33209, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e33209.
- [30] C. Borzea, D. Comeagă, Y. Veli, and A. Săvescu, ‘Piezoelectric Cantilever Harvester with Trapezoidal/Triangular Section for Increased Conversion Efficiency’, in *Iberian COMSOL Multiphysics Conference 2022*, Málaga, Spain, Jun. 2022, pp. 54–57.
- [31] C. I. Borzea, C. D. Comeagă, and A. Săvescu, ‘Boosting the Electric Output of a Cantilever Piezoelectric Harvester by Tip Curvature Blocking Elements’, in *8th European Conference on Renewable Energy Systems (ECRES 2020)*, Istanbul, Turkey, Aug. 2020, pp. 344–350. [Online]. Available: https://www.ecres.net/proceedings_book_2020.pdf.
- [32] Stanford Research Systems., ‘Dynamic Signal Analyzer - SR785’. Accessed: Jun. 06, 2023. [Online]. Available: <https://www.thinksrs.com/downloads/pdfs/catalog/SR785c.pdf>.
- [33] F. Membrini, ‘A Brief History of Thermoelectrics | Mithras’. Accessed: Jul. 12, 2024. [Online]. Available: <https://mithras.tech/2019/03/14/a-brief-history-of-thermoelectrics/>.
- [34] J. Dumitru, ‘Contributions to the analysis and development of ambient energy harvesting systems (Orig. RO: Contribuții la analiza și dezvoltarea unor sisteme de recoltare a energiei ambientale)’, Doctorate Thesis, Doctoral School of Electrical Engineering, University Politehnica of Bucharest, Bucharest, Romania, 2014.

- [35] COMSOL, 'Thermoelectric generator', COMSOL. Accessed: Jul. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/model/thermoelectric-generator-54111>.
- [36] M. Jaegle, 'Multiphysics Simulation of Thermoelectric Systems - Modeling of Peltier-Cooling and Thermoelectric Generation', presented at the COMSOL Conference 2008, Hannover, 2008. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/paper/multiphysics-modeling-and-development-of-thermoelectric-generator-for-waste-heat-61281>.
- [37] TEGpro, 'TE-MOD-10W4V-40 Datasheet rev. 1.0', Tegmart.com. [Online]. Available: <https://www.tegmart.com/datasheets/TGPR-10W4V-40S.pdf>.
- [38] COMSOL, 'Thermoelectric Cooler Design App', COMSOL. Accessed: Jul. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/model/thermoelectric-cooler-30611>.
- [39] 'COMSOL Multiphysics® Software - Understand, Predict, and Optimize', COMSOL. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>.
- [40] A. Prasad and R. C. Thiagarajan, 'Multiphysics Modeling and Development of Thermoelectric Generator for Waste Heat Recovery', presented at the COMSOL Conference 2018, Bangalore, India. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/paper/multiphysics-modeling-and-development-of-thermoelectric-generator-for-waste-heat-61281>.
- [41] C. Borzea, V. Petrescu, I. Vlăducă, M. Roman, and G. Badea, 'Potential of Twin-Screw Compressor as Vibration Source for Energy Harvesting Applications', *Electrical Machines, Materials and Drives - Present and Trends*, vol. 17, no. 1, Art. no. 1, 2021, doi: 10.36801/apme.2021.1.12.
- [42] C. Săvescu, V. Petrescu, D. Comeagă, I. Vlăducă, C. Nechifor, and F. Niculescu, 'Vibration Analysis of a Twin-Screw Compressor as a Potential Source for Piezoelectric Energy Harvesting', *Revue Roumaine des Sciences Techniques - Série Électrotechnique et Énergétique*, vol. 68, no. 3, Art. no. 3, Oct. 2023, doi: 10.59277/RRST-EE.2023.3.1.
- [43] G. M. Guttman, Y. Gelbstein, G. M. Guttman, and Y. Gelbstein, 'Mechanical Properties of Thermoelectric Materials for Practical Applications', in *Bringing Thermoelectricity into Reality*, IntechOpen, 2018. doi: 10.5772/intechopen.75476.
- [44] 'Thermoelectric Cooler', COMSOL. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/model/thermoelectric-cooler-30611>.
- [45] 'COMSOL Multiphysics Reference Manual. Version: COMSOL 6.2.' [Online]. Available: https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf.
- [46] AccuWeather, 'Bucharest, Romania Monthly Weather (July 2023)'. Accessed: Jul. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.accuweather.com/en/ro/bucharest/287430/july-weather/287430>
- [47] C. Săvescu, D. Comeagă, A. Morega, and Y. Veli, 'Experimental Tests with Piezoelectric Harvester for Tuning Resonant Frequency to Vibrating Source', *Revue Roumaine des Sciences Techniques - Série Électrotechnique et Énergétique*, vol. 67, no. 4, Art. no. 4, Dec. 2022.
- [48] C. Borzea, A. Morega, D. Comeagă, and Y. Veli, 'Temperature Influence on the Performances of a PZT-5H Piezoelectric Harvester', in *2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, Romania: IEEE, Mar. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/ATEE52255.2021.9425102.