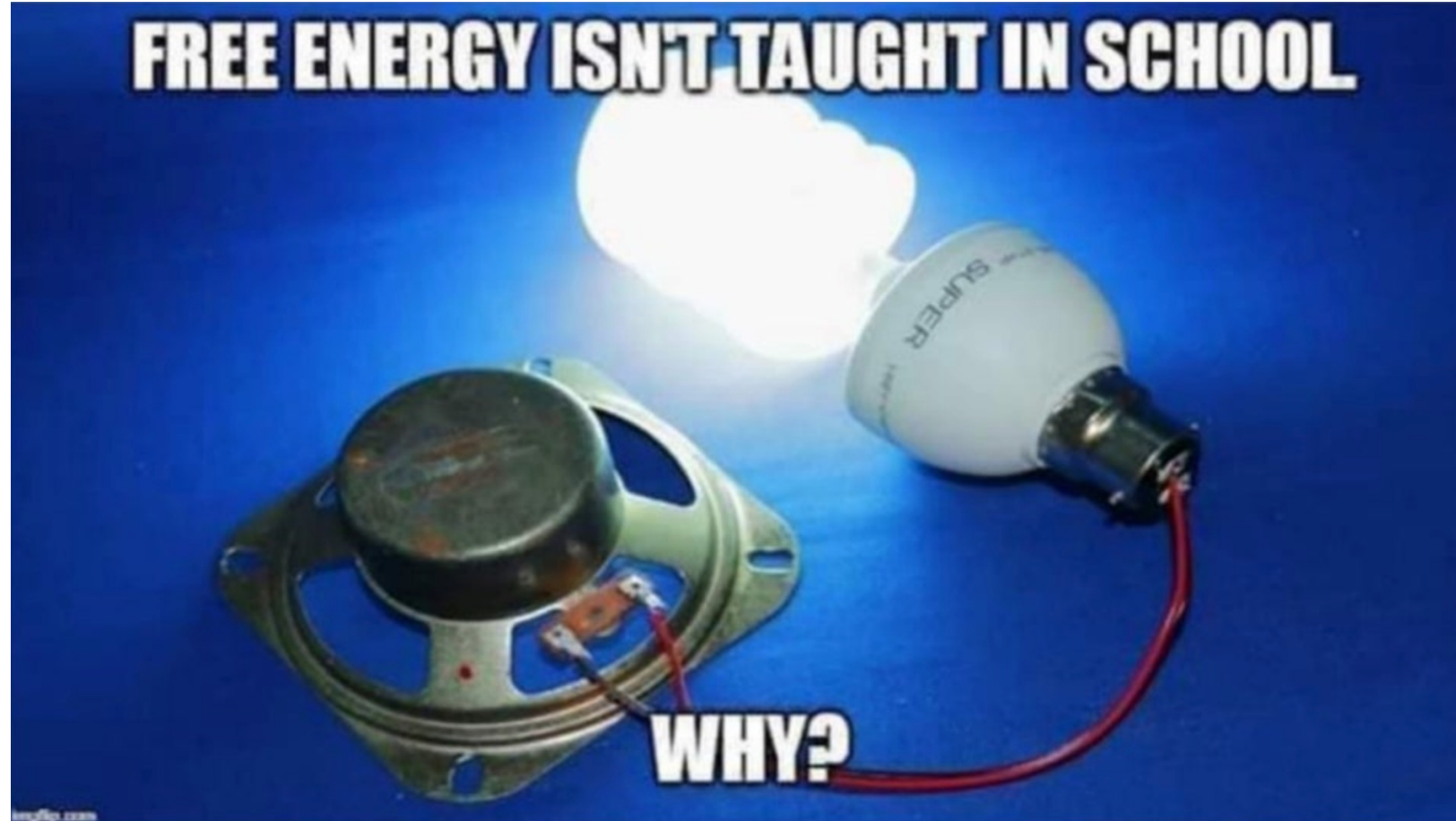


Sisteme Încorporate

Cursul 12

Energy Harvesting

Facultatea de Automatică și Calculatoare
Universitatea Politehnica București



- Tehnologia curentă permite apariția unei noi clase de senzori și sisteme de control care folosesc energia recoltată din mediul înconjurător pentru a se alimenta.
- Aceste sisteme au cerințe foarte mici de consum de energie și sunt optimizate pentru un timp de viață foarte mare.

- A existat înainte de inventarea surselor convenționale de energie (baterii sau generatoare electrice)
- Odată cu micșorarea dispozitivelor embedded și reducerea consumului, cercetarea de noi mijloace pentru recoltarea energiei a devenit un domeniu de interes.
- Surse de energie
 - RF
 - Energie Solară
 - Termoelectric
 - Vibrații
 - Omul



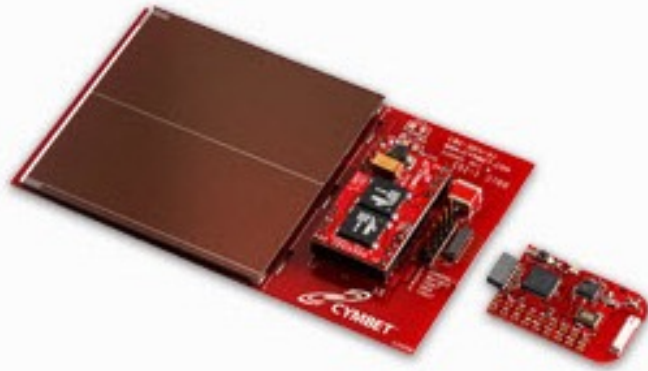
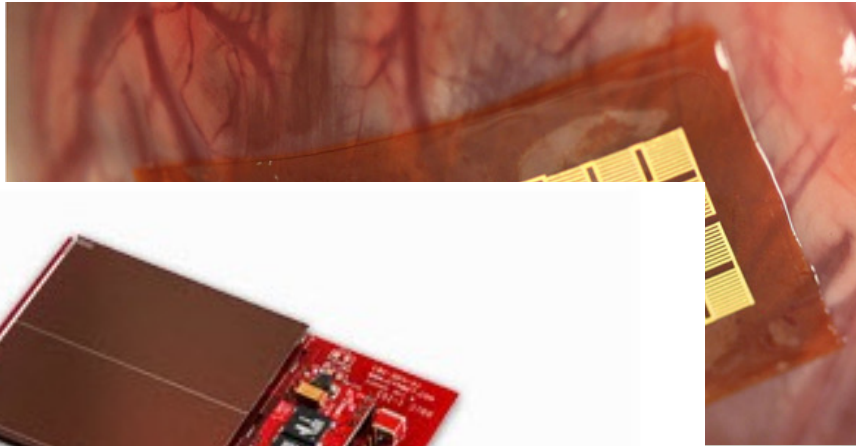
Surse de Energie

- Surse de radiație ambientale
 - Passive RFID
- Recoltarea de energie biomecanică
 - Mișcarea umană (genunchi, călcâi etc.)
- Energie piezoelectrică
 - Surse de vibrații
- Energie piroelectrică
- Energie termoelectrică
- Energie electromagnetică
 - Inducția magnetică într-o bobină (diferite tipuri de dinamuri)
- Energie electrostatică (capacitivă)
 - Modificarea activă a dimensiunilor unor condensatoare
- Recoltarea energiei metabolice a copacilor
 - <http://voltagepower.com/index.php>
- Recoltarea de energie din zaharurile din sange

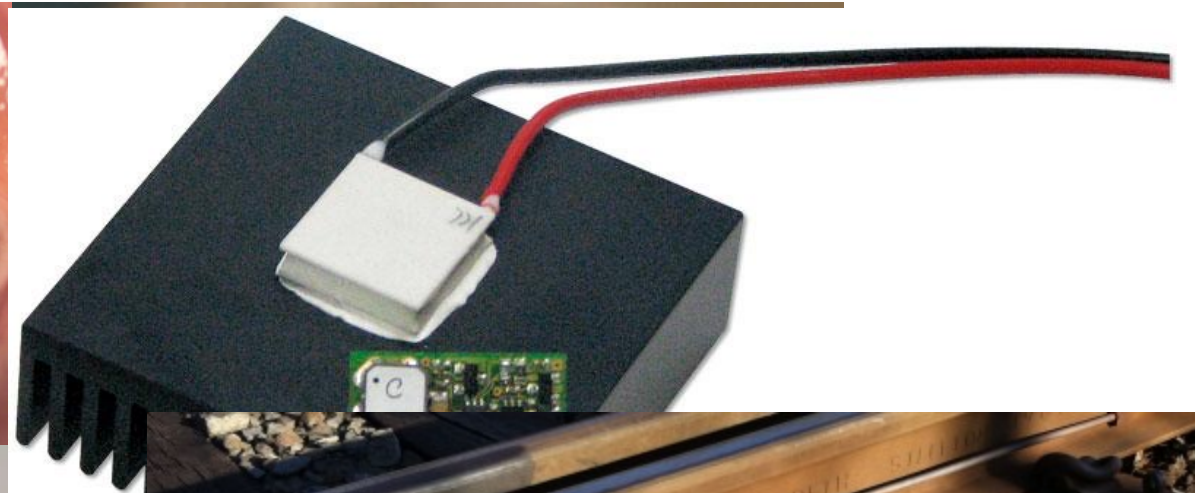
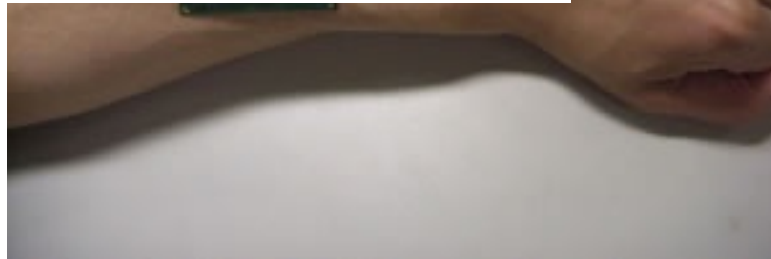
- Deschide noi posibilități în portabilitate și durată de funcționare a aplicațiilor
- Permite alimentarea neîntreruptă a dispozitivelor electronice din locuri greu accesibile
- Teoretic, timpul de viață al unui dispozitiv poate fi prelungit la nesfârșit



Exemple

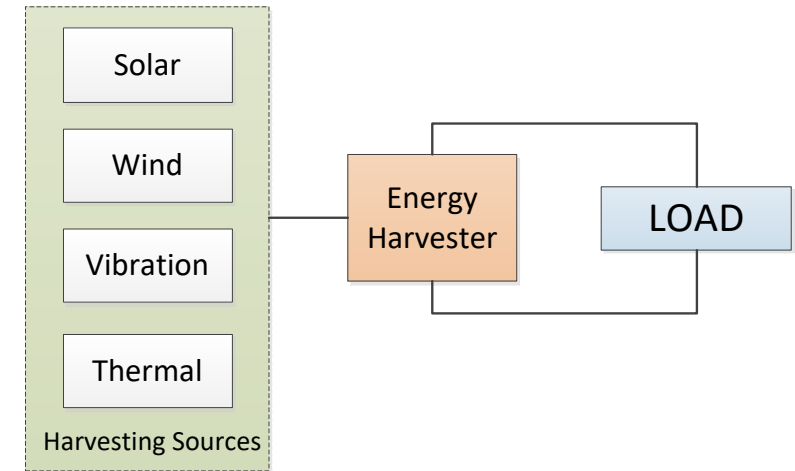


eZ430-RF2500-SEH
Solar Energy Harvester



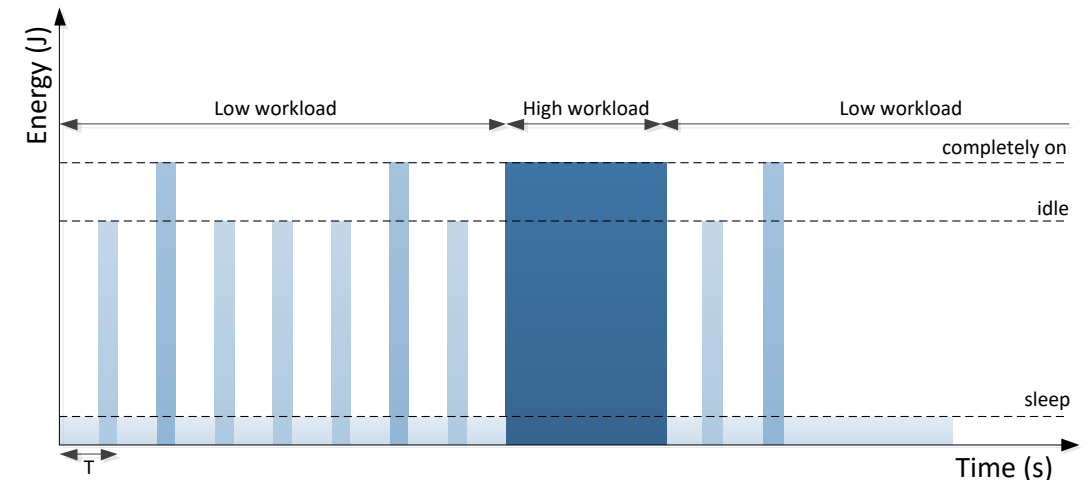
Energy Harvesting

- Proces prin care energia din mediul înconjurător este captată și stocată
- Tehnologie care deschide noi posibilități în portabilitate și durata de funcționare a aplicațiilor
- Permite alimentarea neîntreruptă a dispozitivelor electronice din locuri greu accesibile
- Teoretic, timpul de viață al unui dispozitiv poate fi prelungit pe o durată foarte lungă



Considerente de design

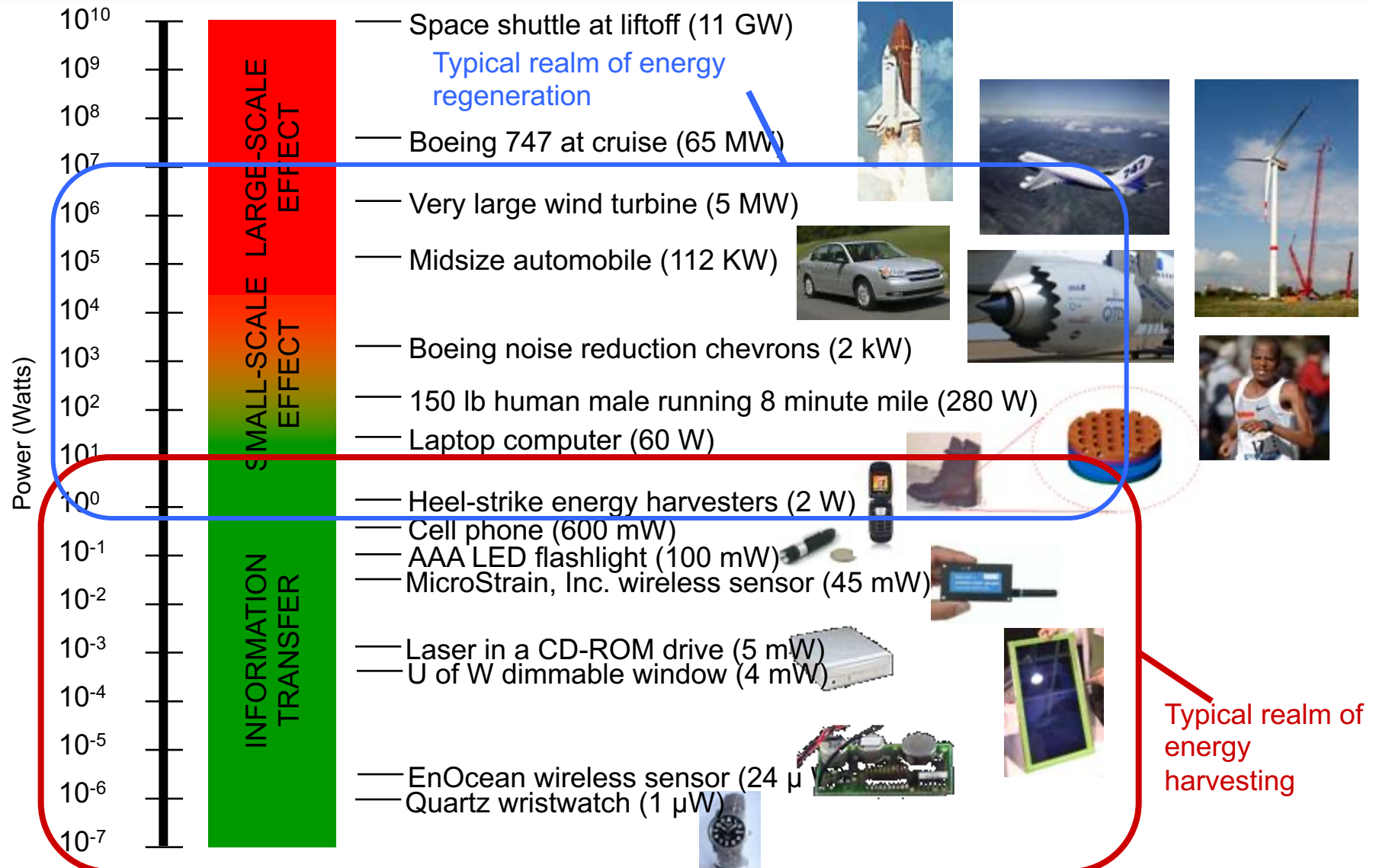
- ▶ Energy Neutrality. Cum poate fi variat consumul de energie al rețelei a.î. să fie tot timpul mai mic decât rata cu care e produsă energia?
- ▶ Performance Balancing: Cum poate fi maximizată performanța unui sistem într-un buget energetic dat?



- Reducerea greutateii
- Reducerea costurilor de instalare și întreținere
- Introducerea rapidă a funcționalităților noi
- Reconfigurarea rapidă

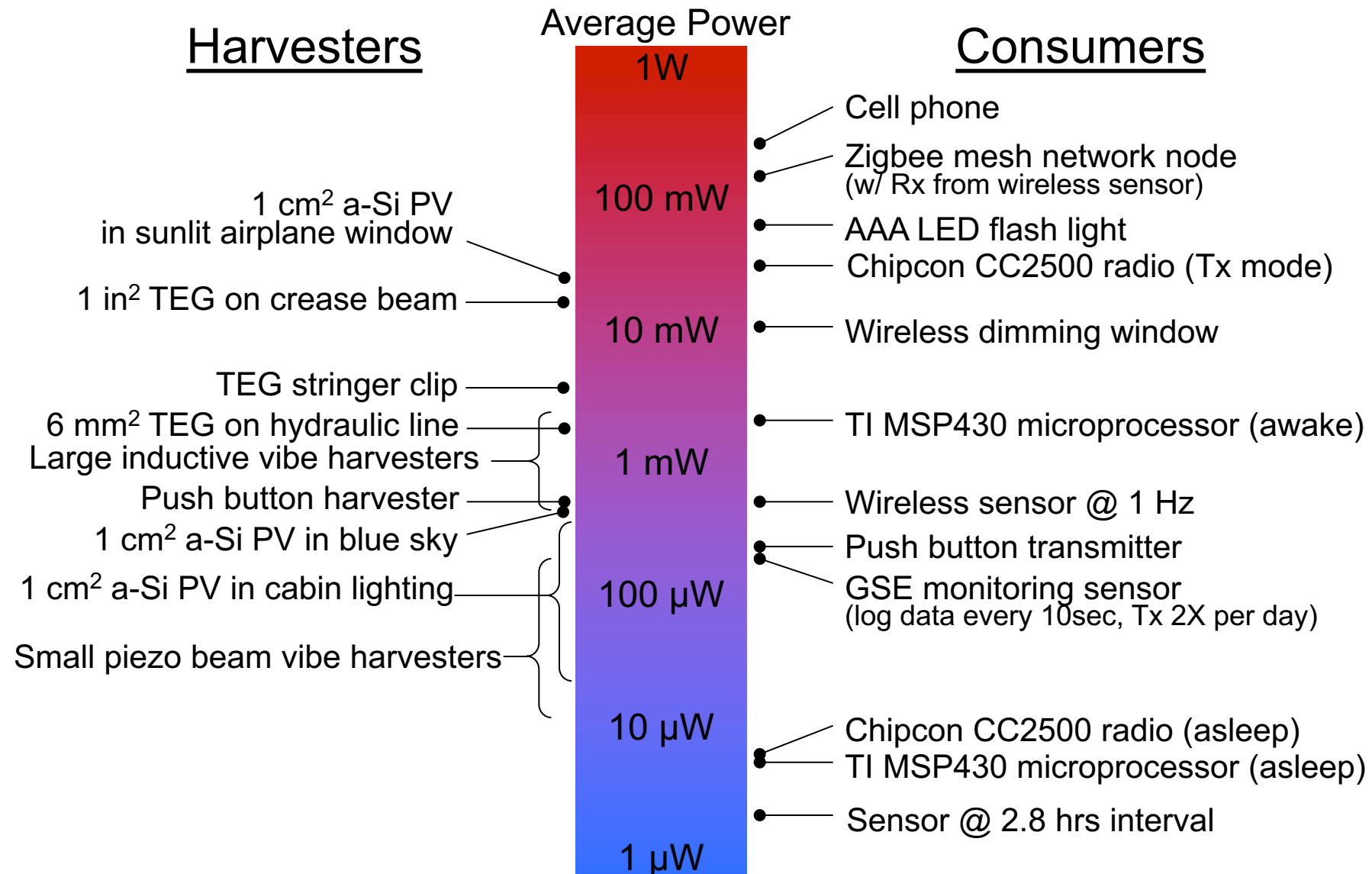
- Se pune accent pe
 - Aplicații care au cerințe limitate de lățime de bandă
 - Eliminarea cablurilor: distanțe mari de acoperit, articulații flexibile, zone dificil de accesat, medii ostile

Power Generation and Consumption



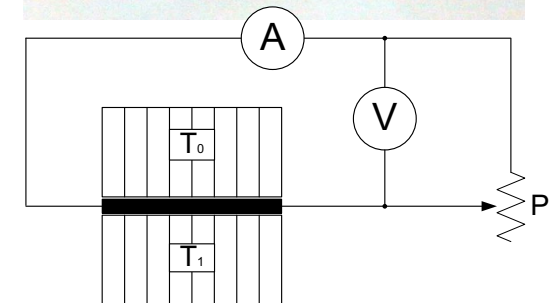
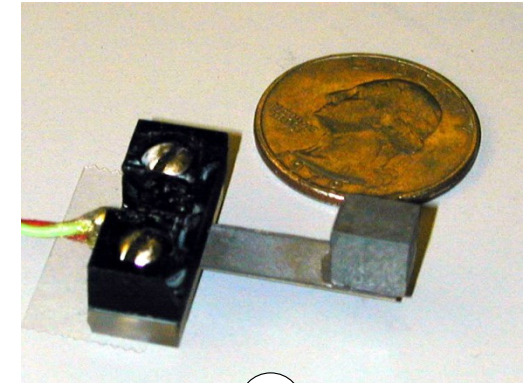
Typical realm of energy harvesting

Energy Harvesting Power Generation & Utilization



Surse de energie regenerabilă

- **Conversia piezoelectrică**
 - Grindă elastică de material piezoelectric cu o greutate atașată la capătul mobil.
 - Energie maximă -> frecvența de rezonanță
 - $f = 120\text{Hz}$; $V = 4 - 6\text{V}$; $P = 800\mu\text{W}$
- **Conversia termoelectrică**
 - Folosește efectul Seebeck
 - $V = \alpha\Delta T$
 - Se pretează la medii cu diferențe mari de temperatură ($>30^\circ\text{C}$)
- **Conversia fotovoltaică**
 - Folosește celule de siliciu pentru a transforma energia luminoasă în energie electrică
 - Randament - 10-13%



Energia solară este o soluție?

- Randament de conversie lumină-electricitate foarte scăzut ($< 20\%$ pentru celule obișnuite cu siliciu cristalin)
- De fapt, randament $\sim 10\%$ pentru celule cu siliciu amorf ($100\text{mW}/\text{cm}^2$ la iluminare maximă sau $100\text{uW}/\text{cm}^2$ în interior)



Conversia Fotovoltaică

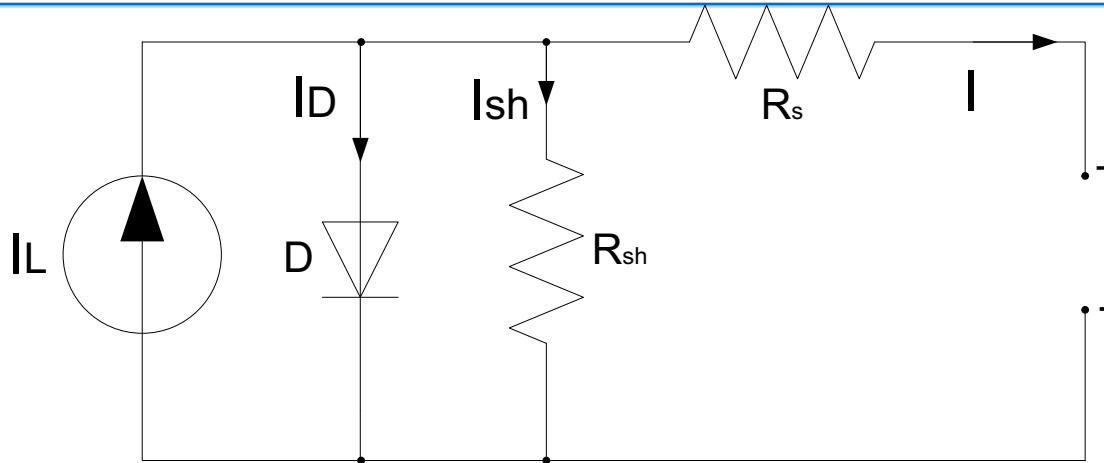
$$I = I_L - I_D - I_{SH}$$

I = output current

I_L = photogenerated current

I_D = diode current

I_{SH} = shunt current



$$V_j = V + IR_S$$

V = voltage across the output terminals

I = output current

R_S = series resistance

$$I_{dark}(V) = J_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

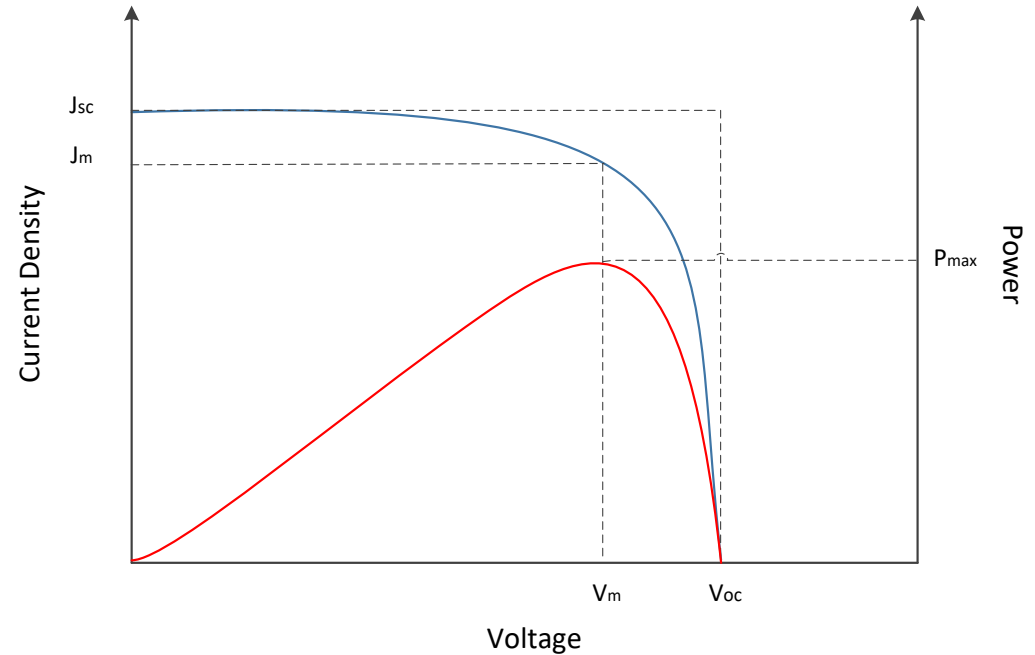
$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(e^{\frac{I_{sc}}{J_0}} + 1 \right)$$

$$I_D = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{qV_j}{nkT} \right] - 1 \right\}$$

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_{SH}}$$

Parametrii ce descriu funcționarea unei celule:

- Eficiența
- Densitatea curentului de scurtcircuit
- Tensiunea de mers în gol
- Factorul de umplere

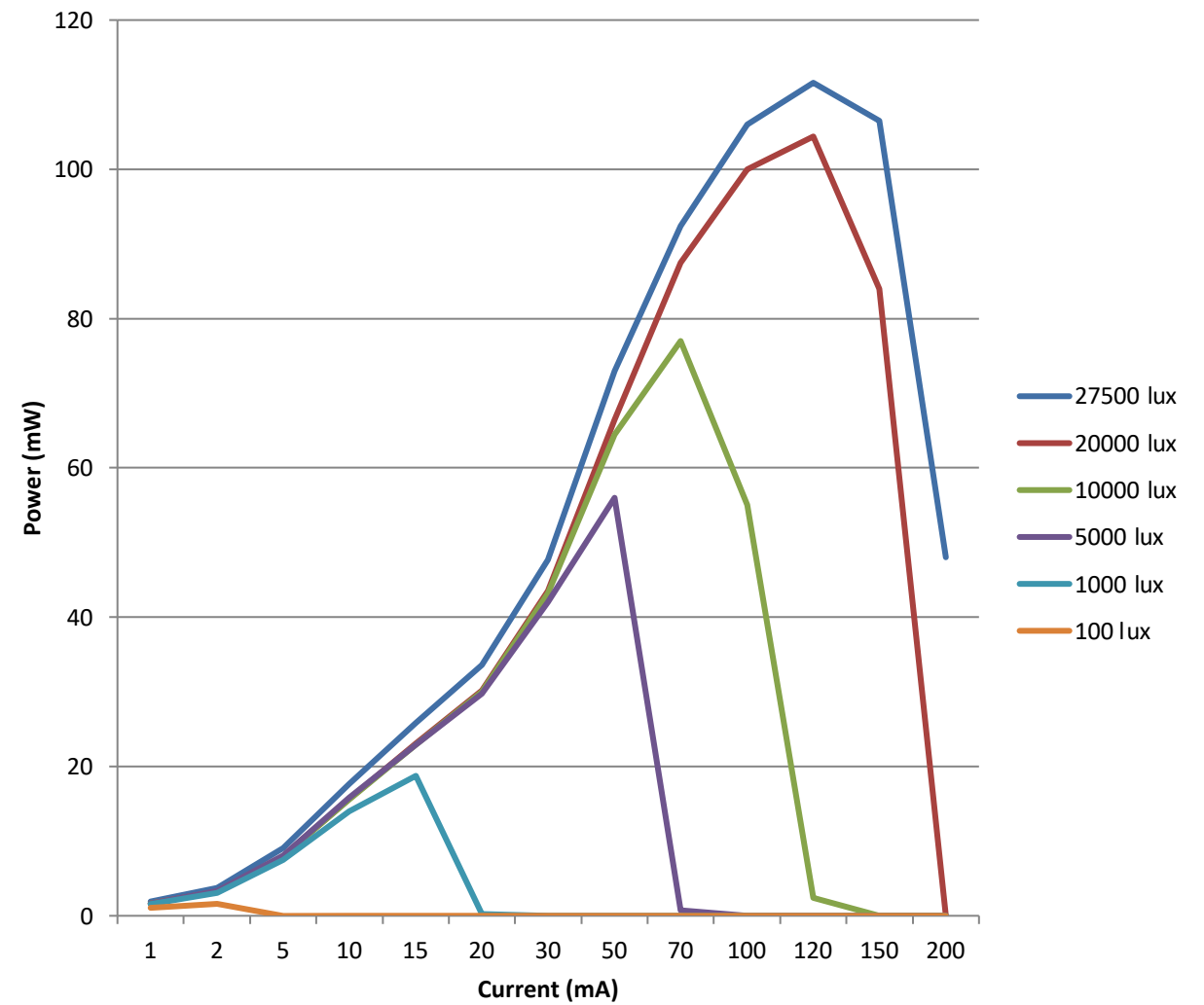
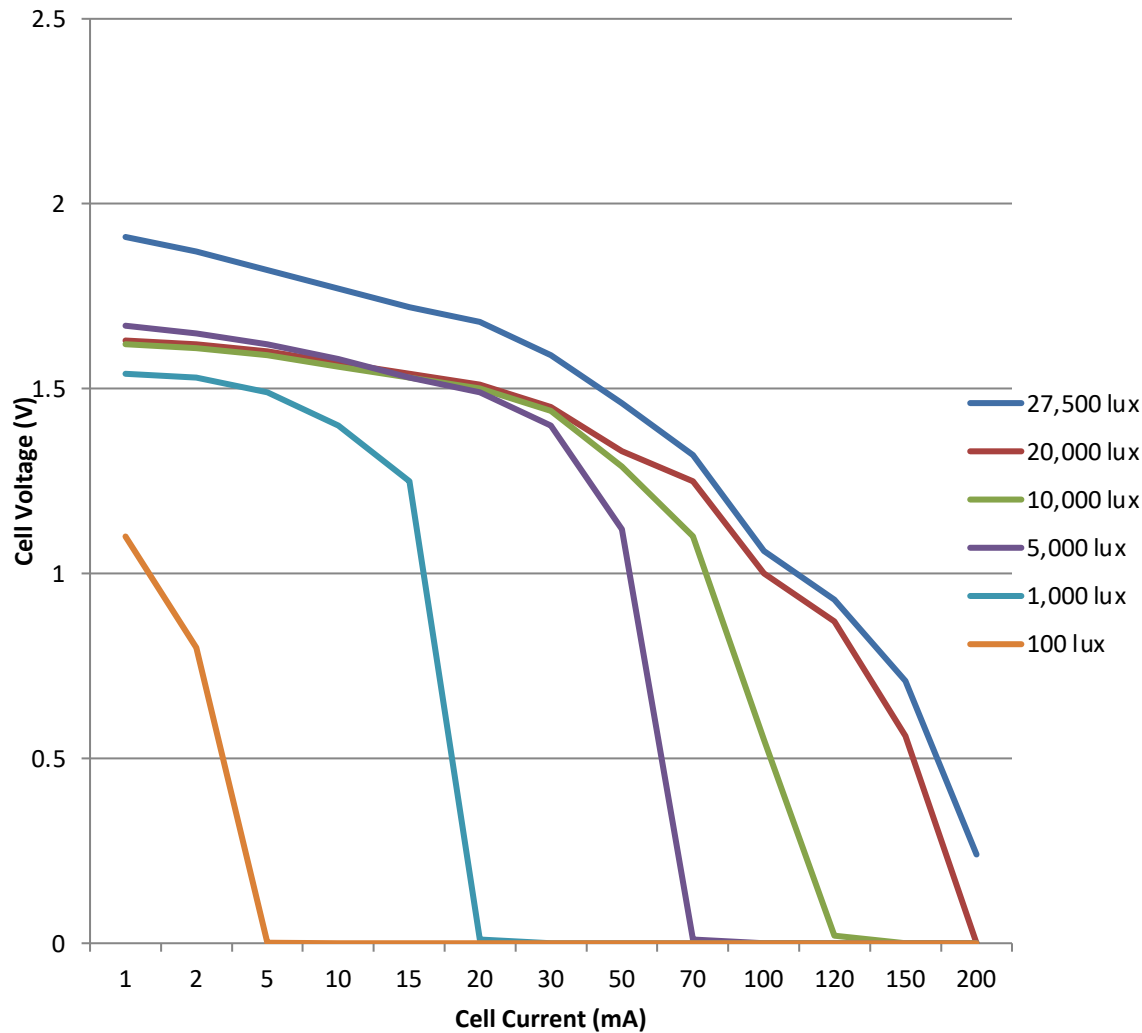


$$FF = \frac{P_m}{P_{max}} = \frac{J_m V_m}{J_{sc} V_{oc}}$$

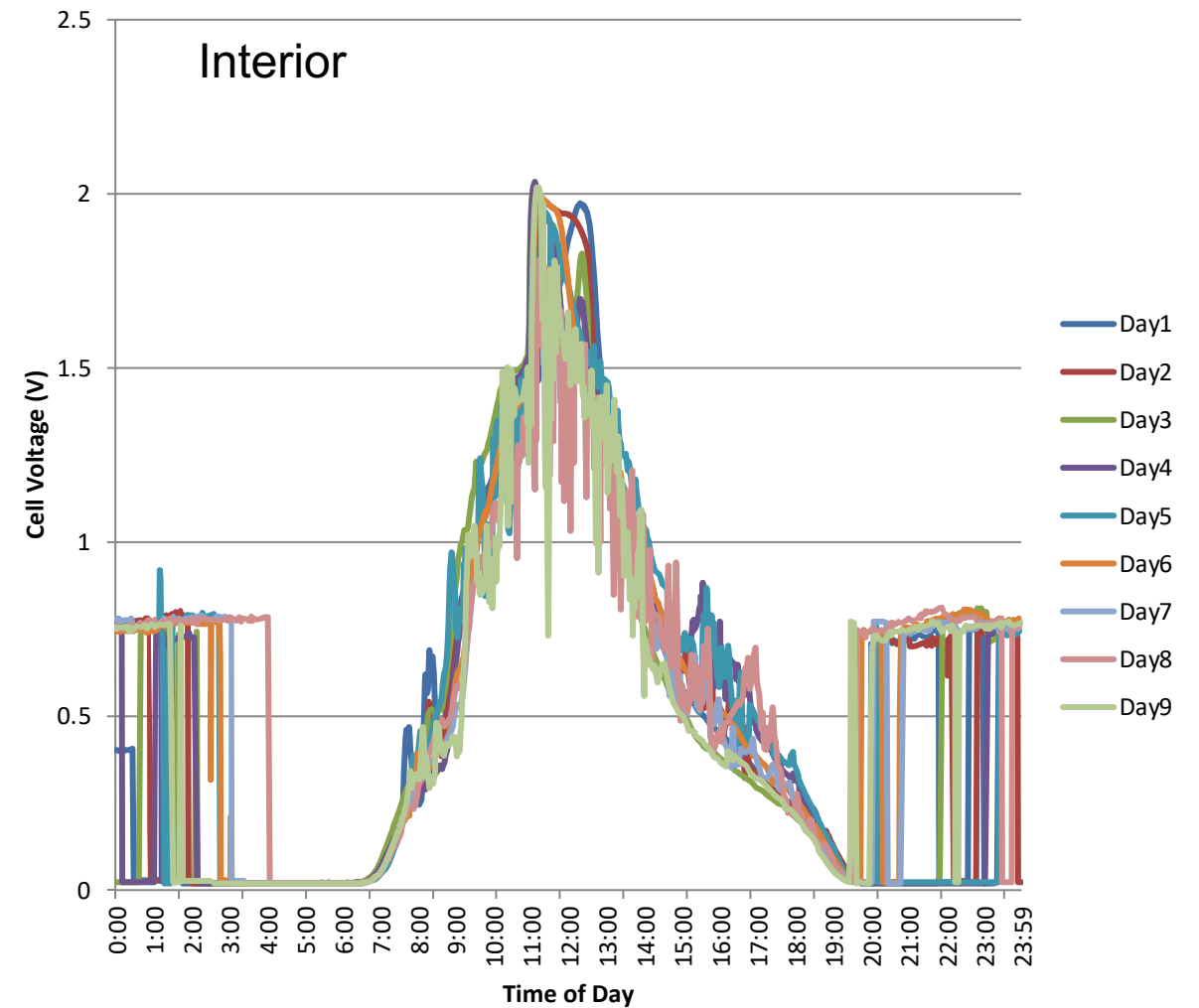
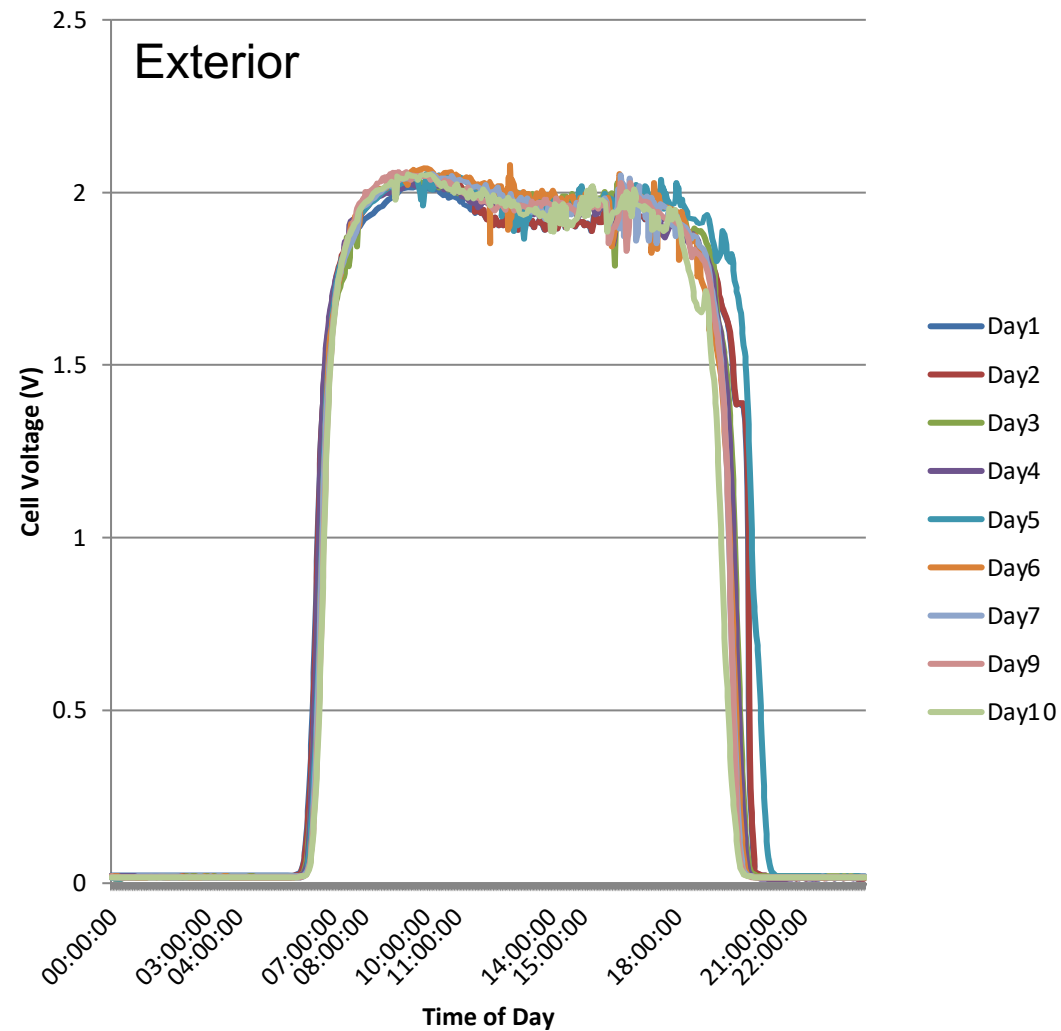
$$\eta = \frac{P_m}{P_l} = \frac{J_m V_m}{P_l}$$

$$\eta = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_l}$$

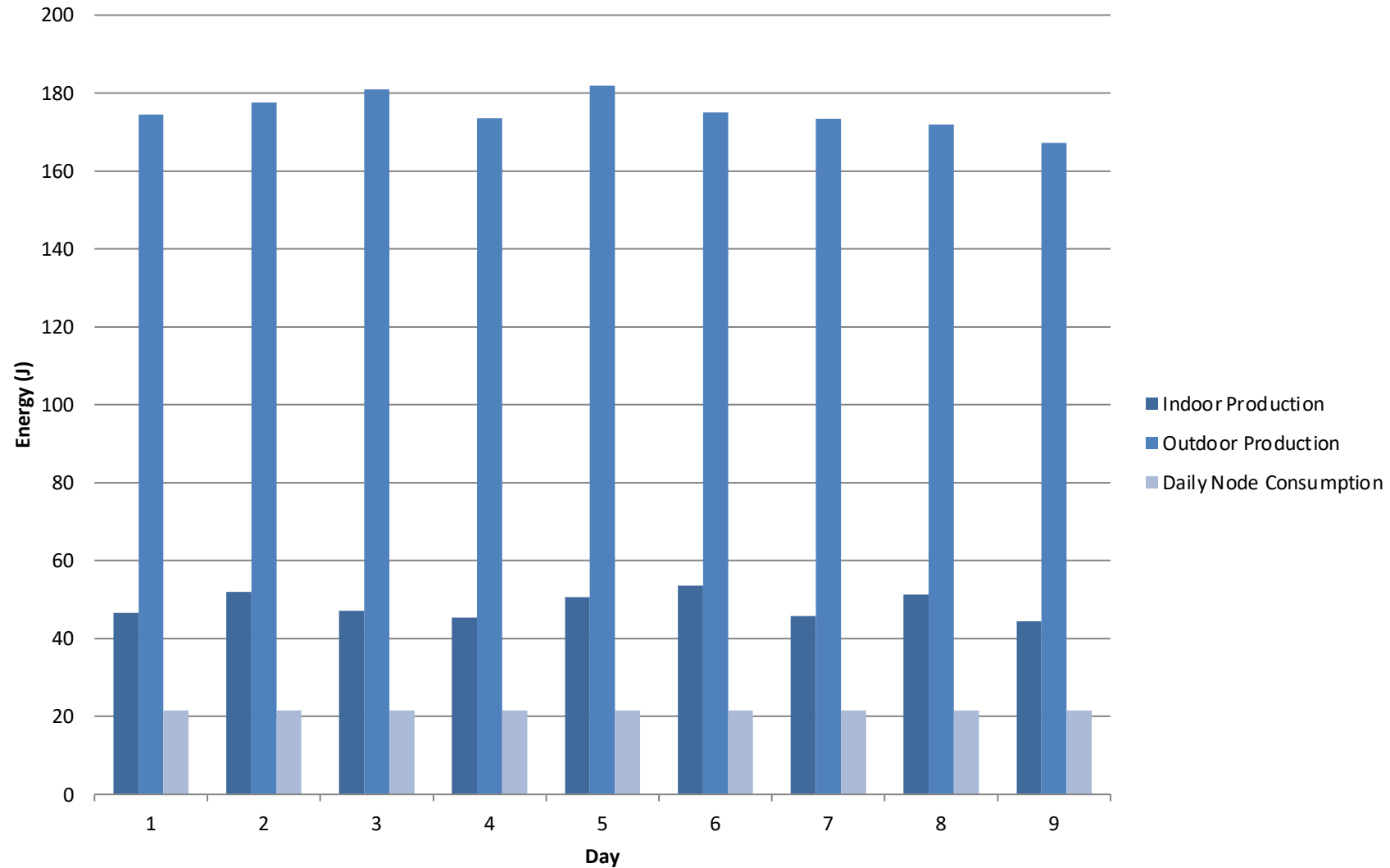
Conversia Fotovoltaică – Eficiență



Conversia Fotovoltaică – Profil Putere Produsă



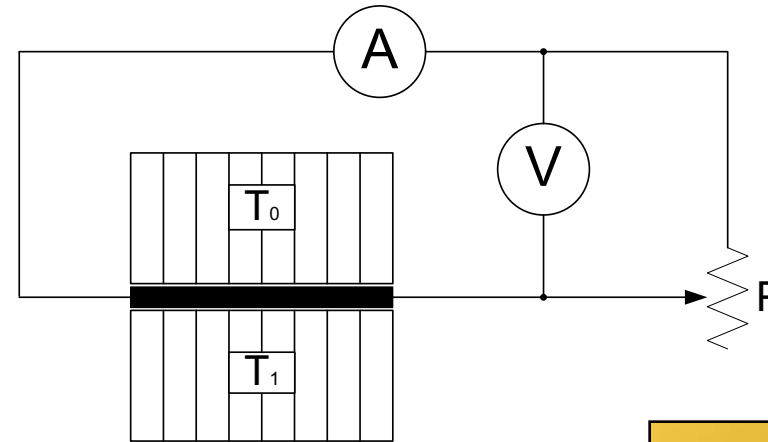
Independența Energetică?



- Obiectele care au un gradient de temperatură pot genera (și) energie electrică
- Efectul Seebeck – generarea de electricitate din diferența de temperatură
 - Ceasul ATMOS
 - Seiko Thermic

Conversia Termoelectrică

- Folosește efectul Seebeck
- Tensiunea generată este direct proporțională cu diferența de temperatură dintre laturile elementului
- Se pretează la medii cu diferențe mari de temperatură ($>30\text{C}$)

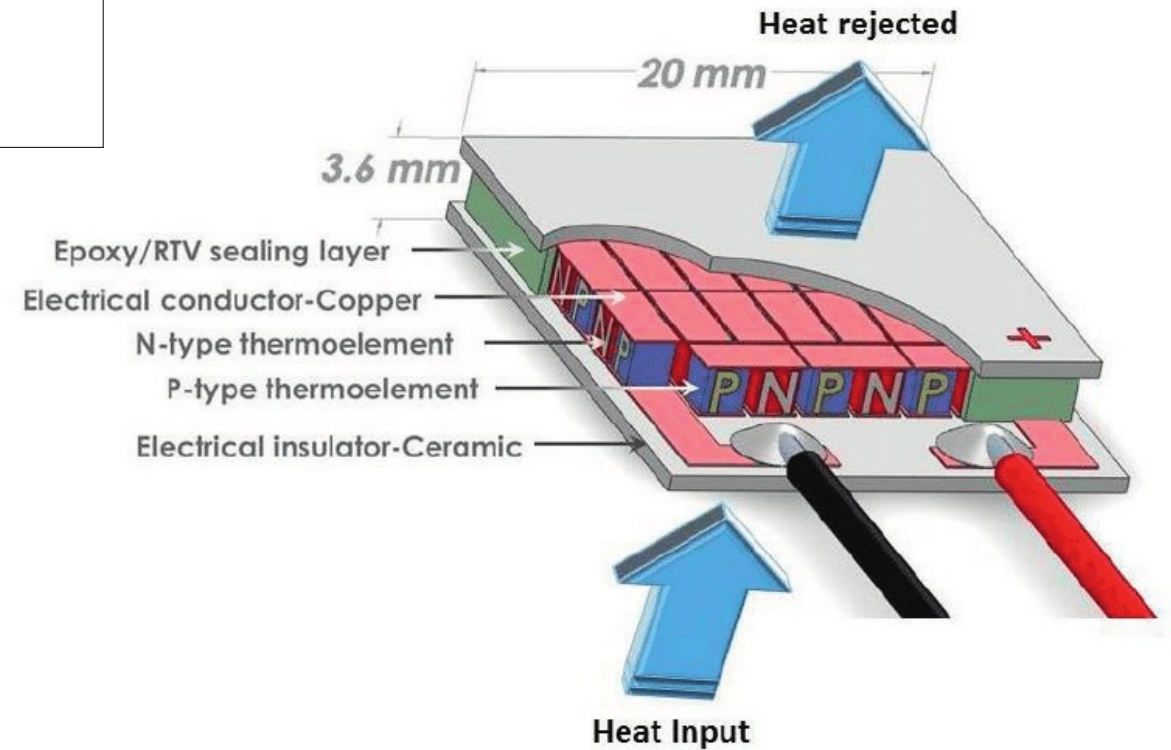
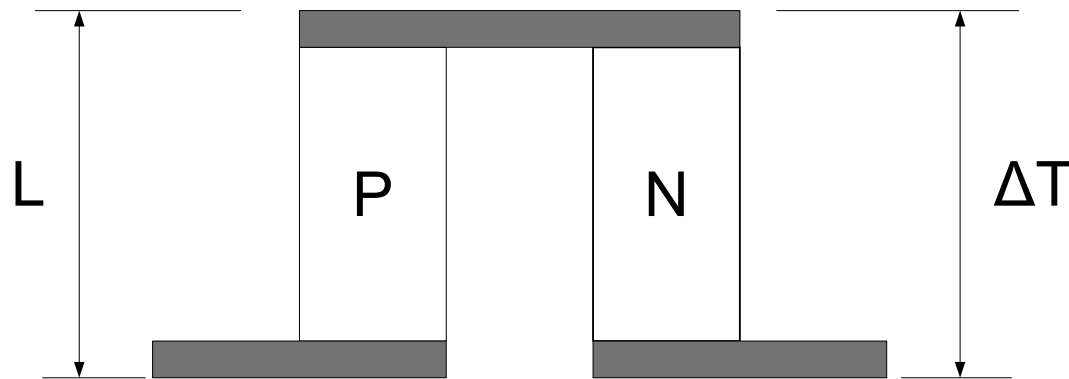
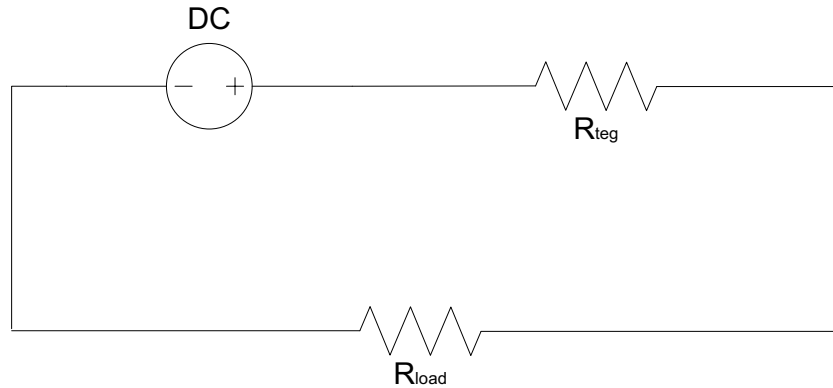


Generatorul Termoelectric

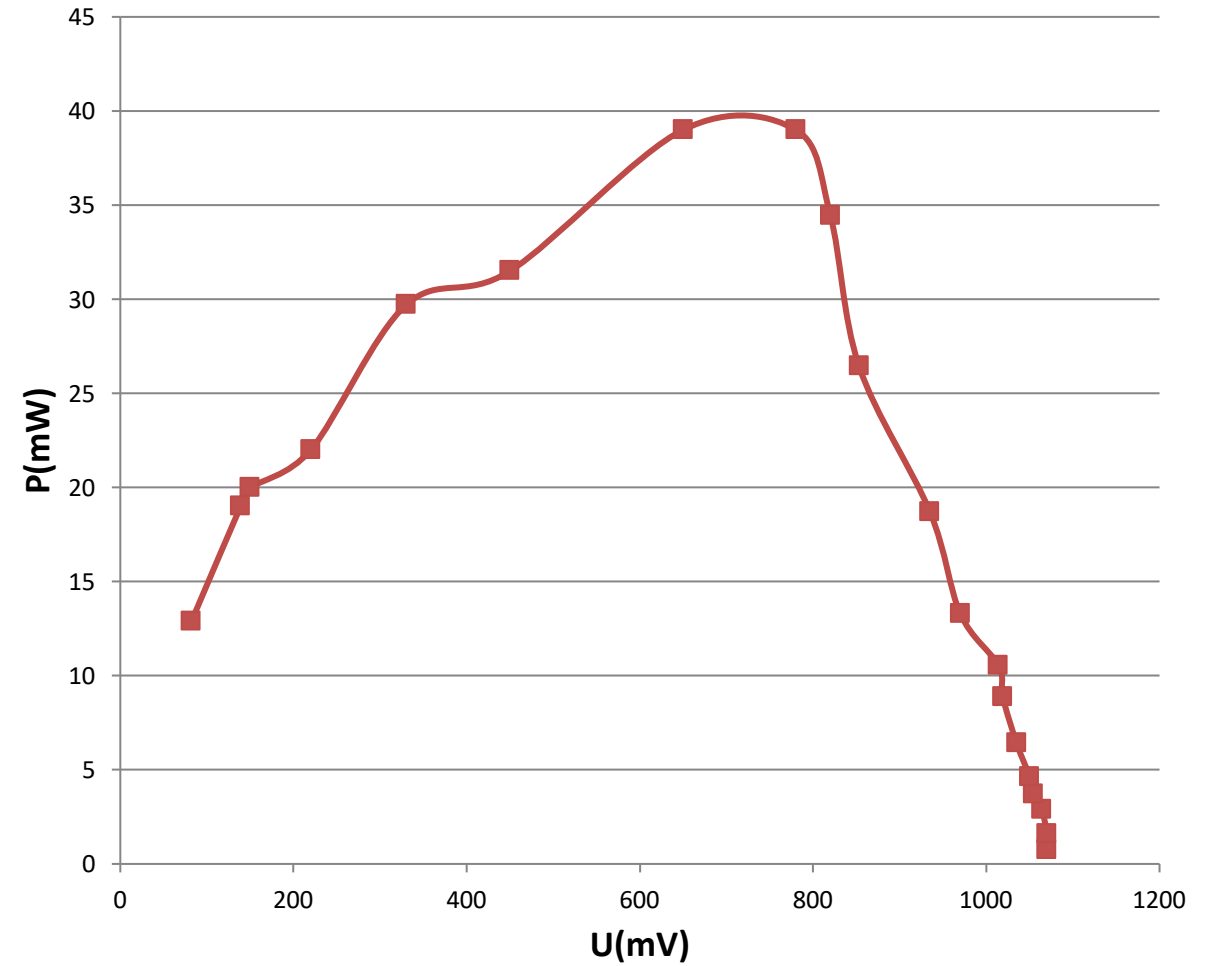
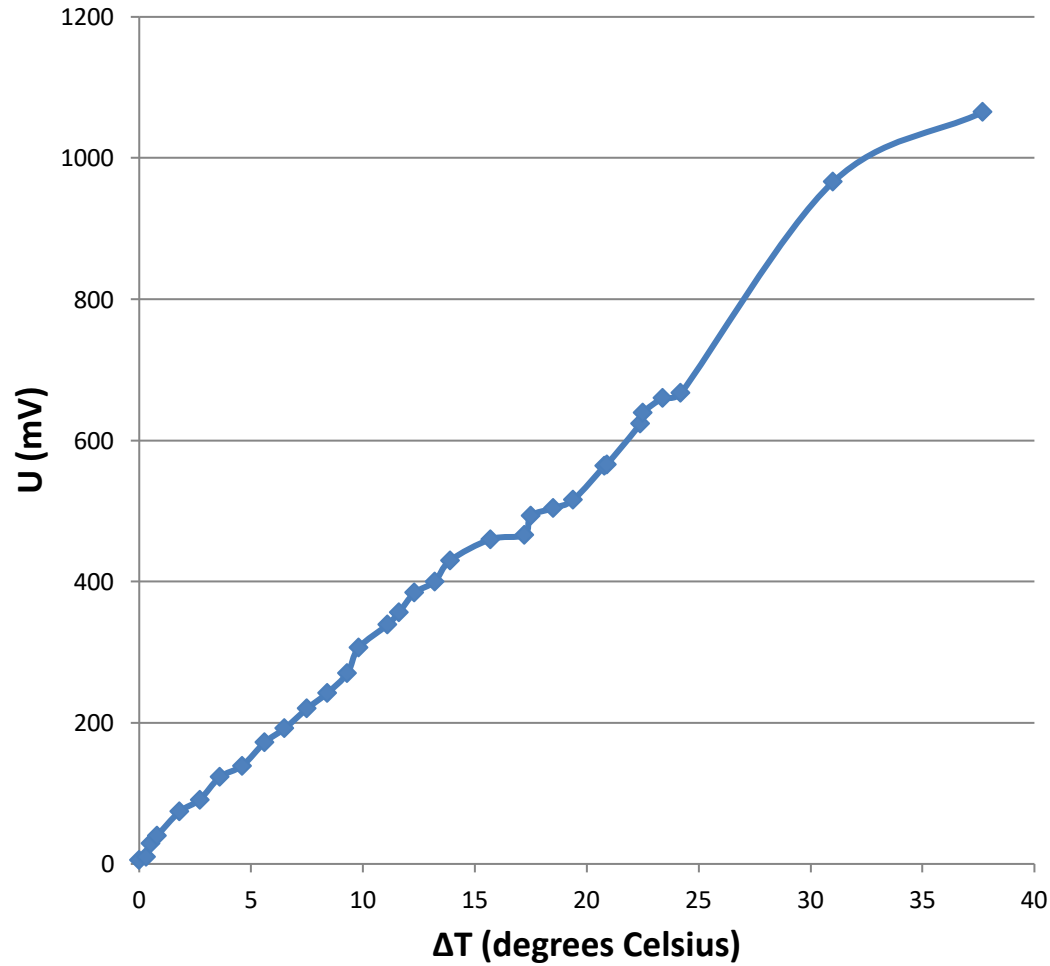
$$V = \alpha \Delta T$$

$$R_{TEG} = 2n\rho \left(\frac{L}{A} \right)$$

$$P_i = \frac{(2\alpha \Delta T)^2}{4R_{TEG}}$$

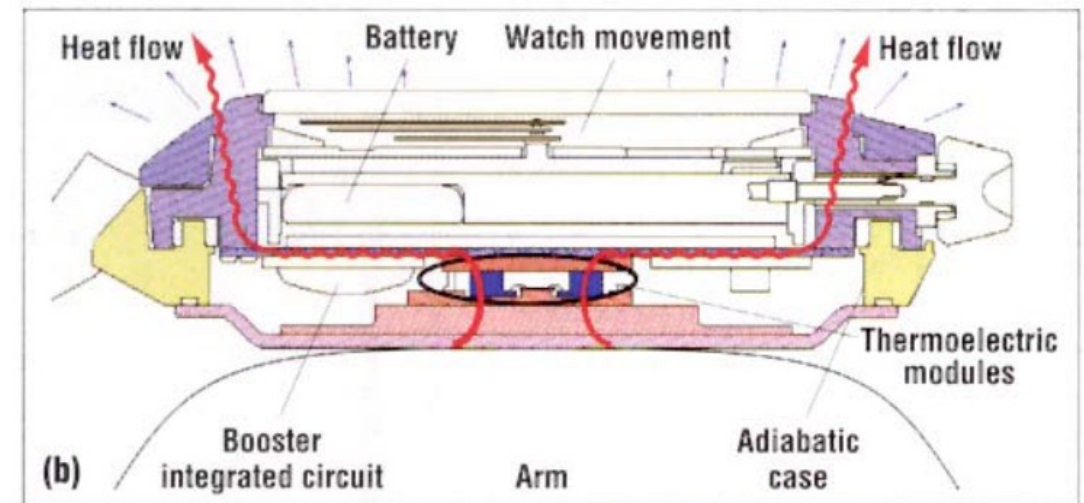
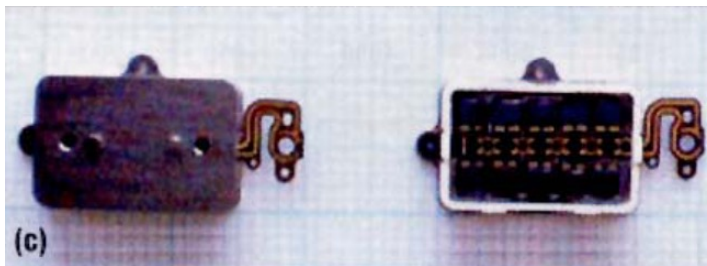


Generatorul Termoelectric



Seiko Thermic

- Primul ceas care a folosit efectul Seebeck pentru alimentarea proprie
- 10uA la 3V pentru diferență de 5 grade C



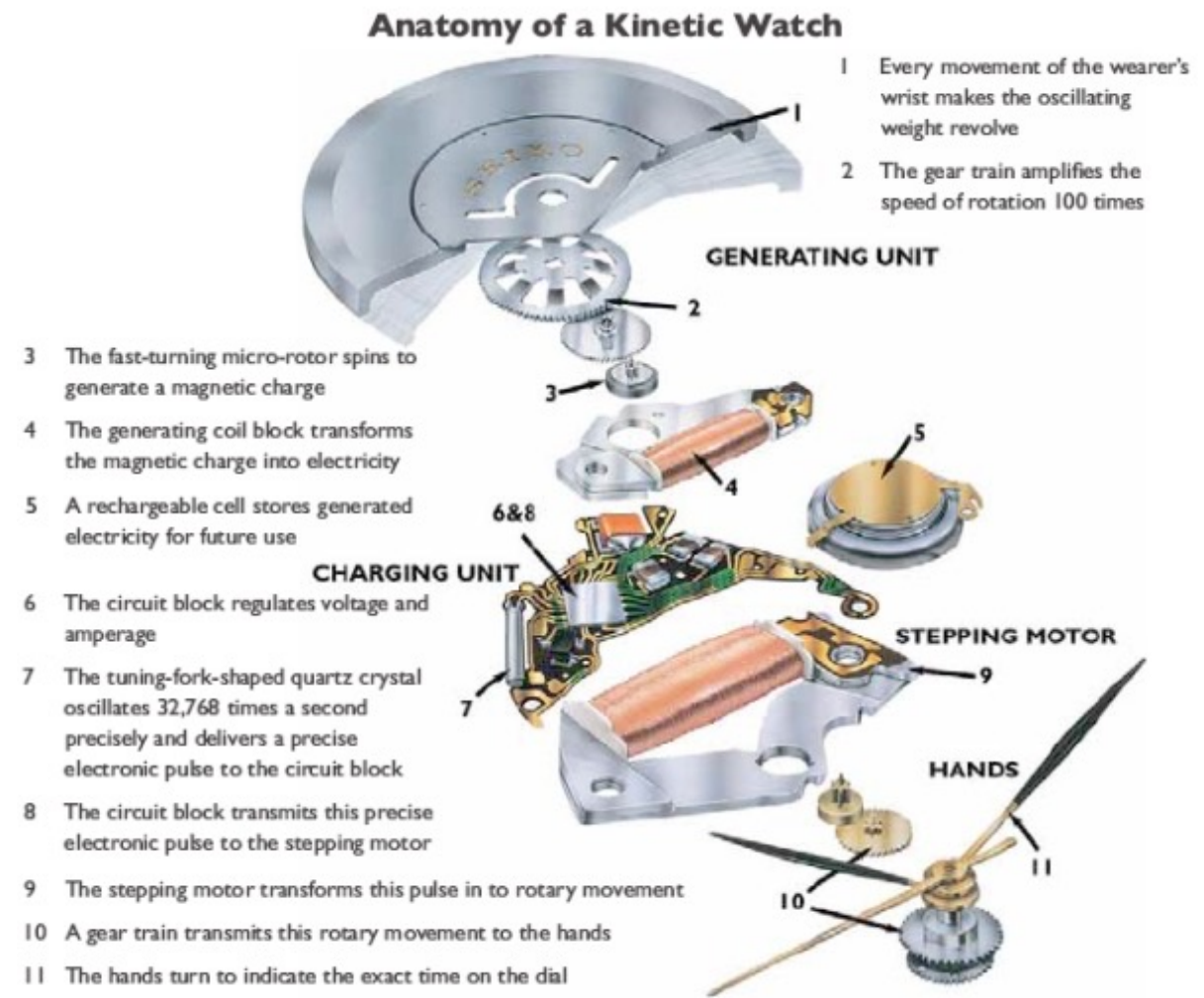
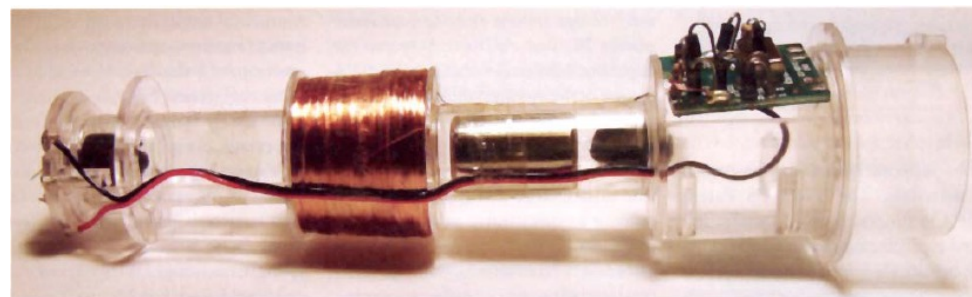
Powerwatch



www.powerwatch.com

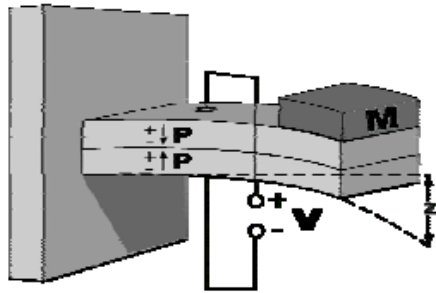
Recoltarea din Vibrații

- Ceas cu generator cinetic
 - Rotorul poate atinge 100.000rpm
 - 15.000rpm -> 6mA @ 1.6V
- Generator bazat pe inducție pentru lanternă (200mW)

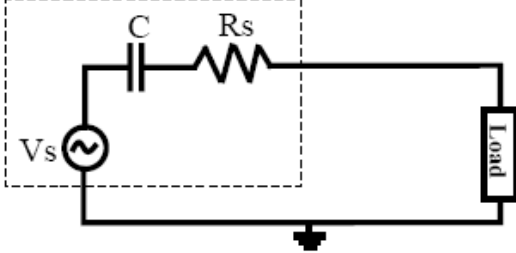


- Piezoelectric

Aplicarea de presiune asupra materialului produce acumularea de sarcină.

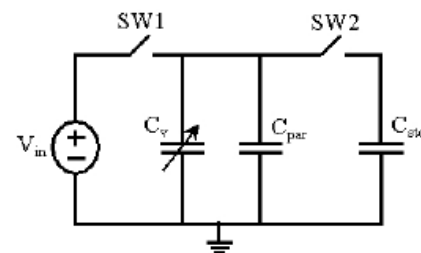
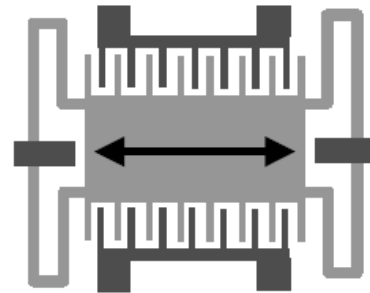


Piezoelectric generator



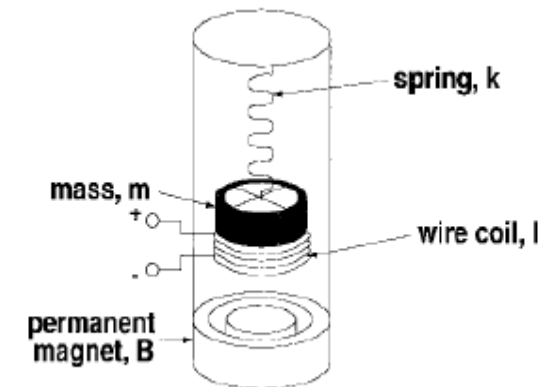
- Capacitiv

Modificarea capacității produce modificarea tensiunii în circuit



- Inductiv

Mișcarea unei bobine în câmp magnetic generează tensiune



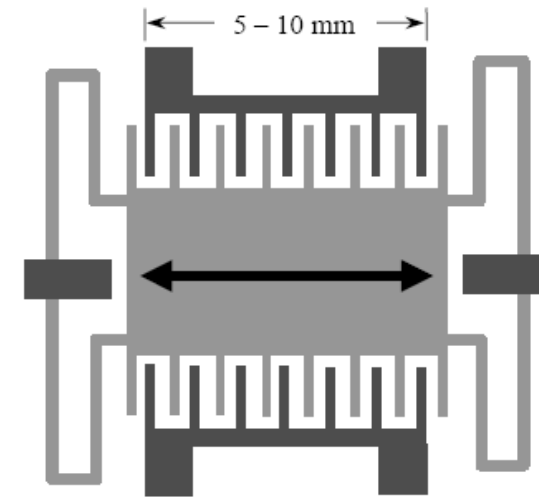
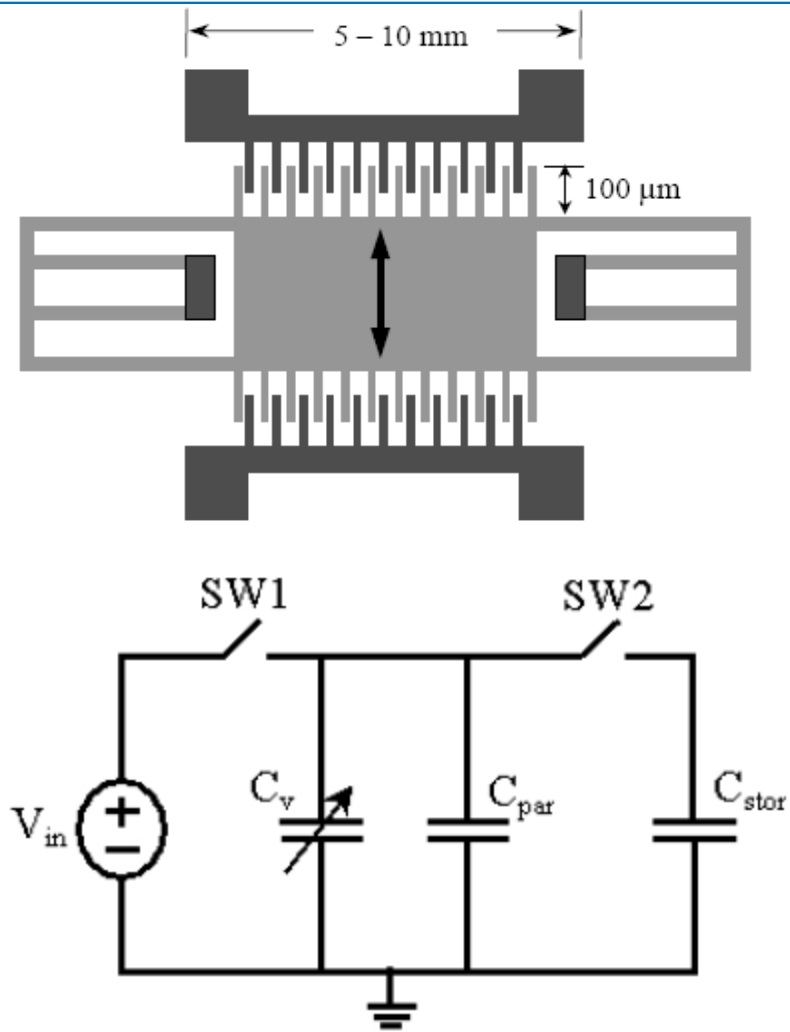
Conversie capacitivă

$$C = \frac{\varepsilon_o A}{d} \quad V = \frac{Q}{C} \quad E = \frac{1}{2} QV$$

- Proiectez un condensator care-și schimbă A sau d ca răspuns la vibrațiile aplicate
- Dacă Q este constant, V va crește după formula:

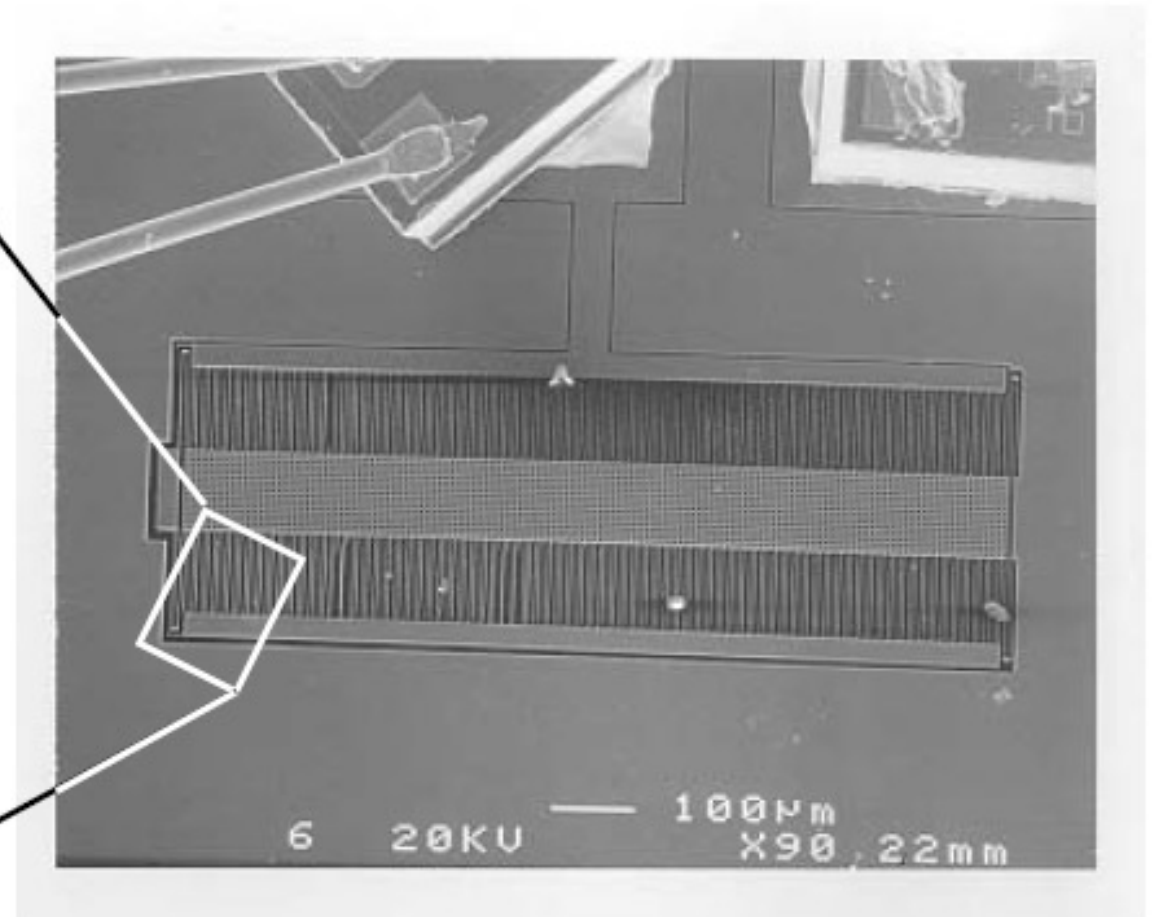
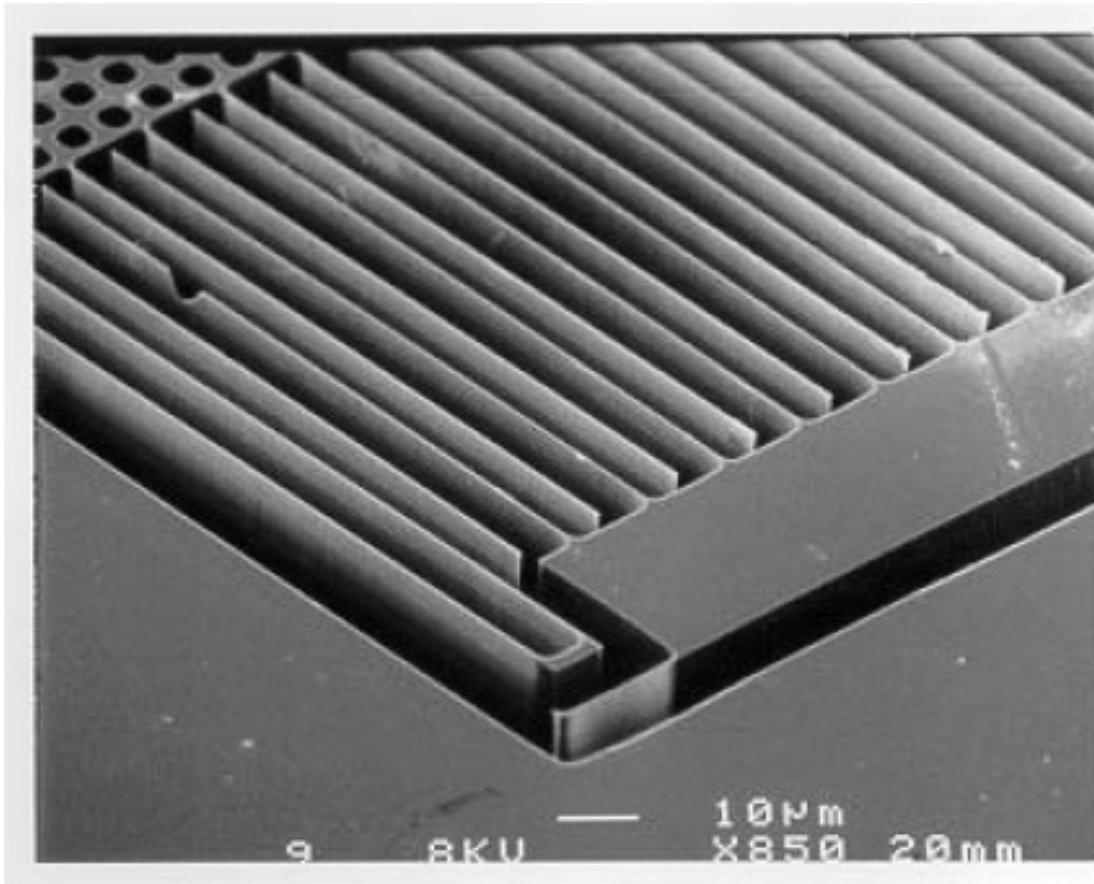
$$\frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{C_{\max} + C_{par}}{C_{\min} + C_{par}}$$

Tipuri de convertoare capacitive

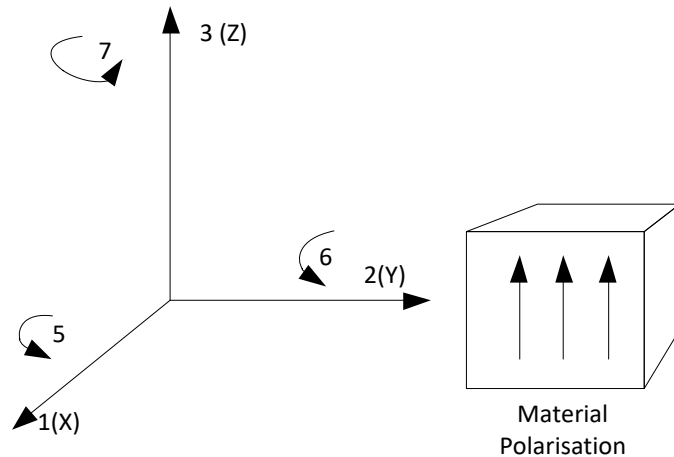


$$E = \frac{1}{2} V_{in}^2 (C_{max} - C_{min}) \left(\frac{C_{max} + C_{par}}{C_{min} + C_{par}} \right)$$

Convertor Capacitiv - Berkeley

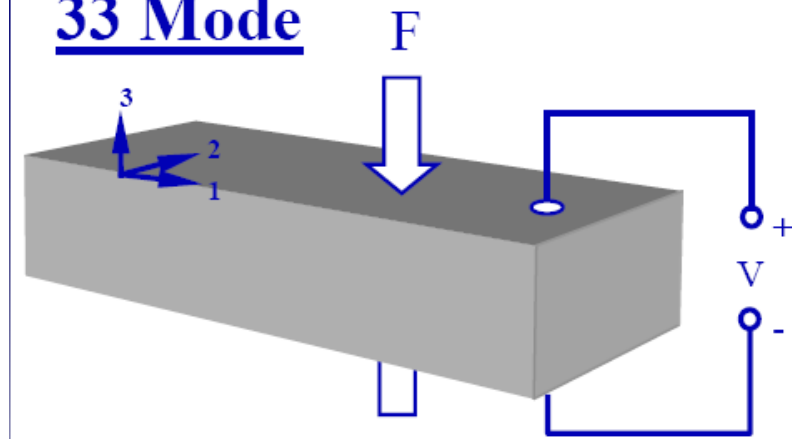


Conversia piezoelectrică

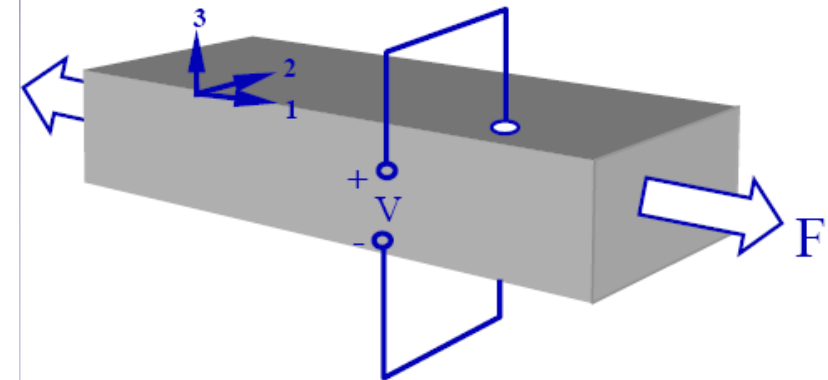


- Grindă elastică de material piezoelectric cu o greutate atașată la capătul mobil.
- Vibrează cu o anumită frecvență
- Energie maximă -> frecvența de rezonanță

33 Mode



31 Mode



Conversia Piezoelectrică

$$V_{open} = -\frac{td}{\epsilon s} S \quad I_{sc} = fdASY$$

d - piezoelectric strain coefficient

t - thickness of the piezoelectric material

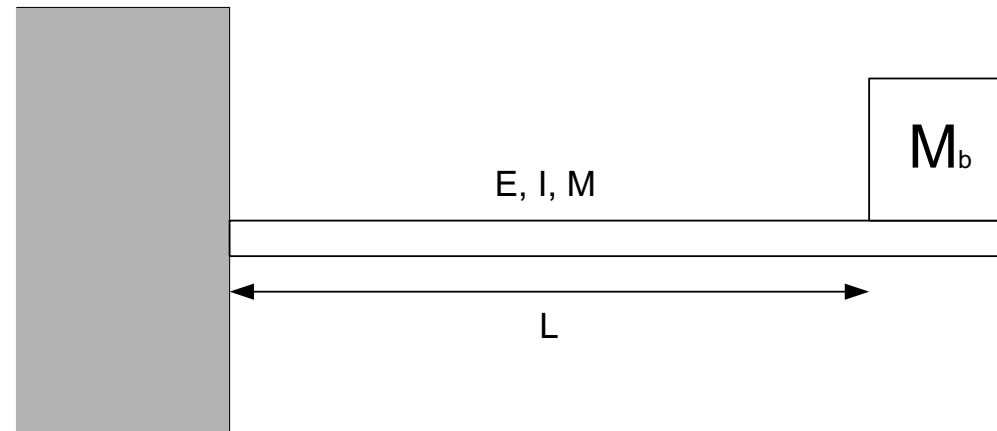
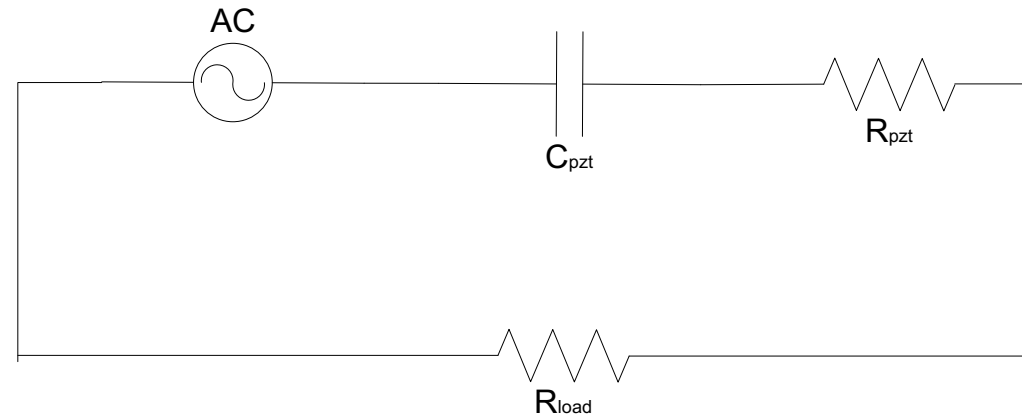
S - strain

s - resistance to deformation (compliance)

ϵ - dielectric constant

Y - Young Modulus

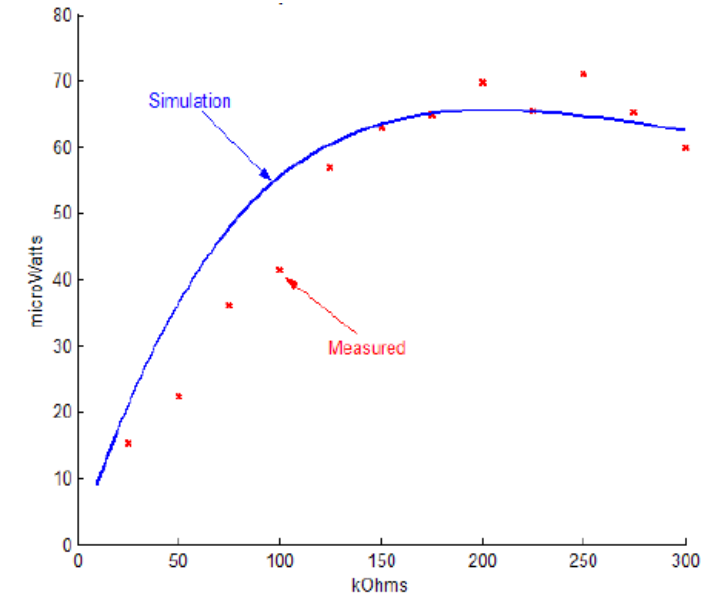
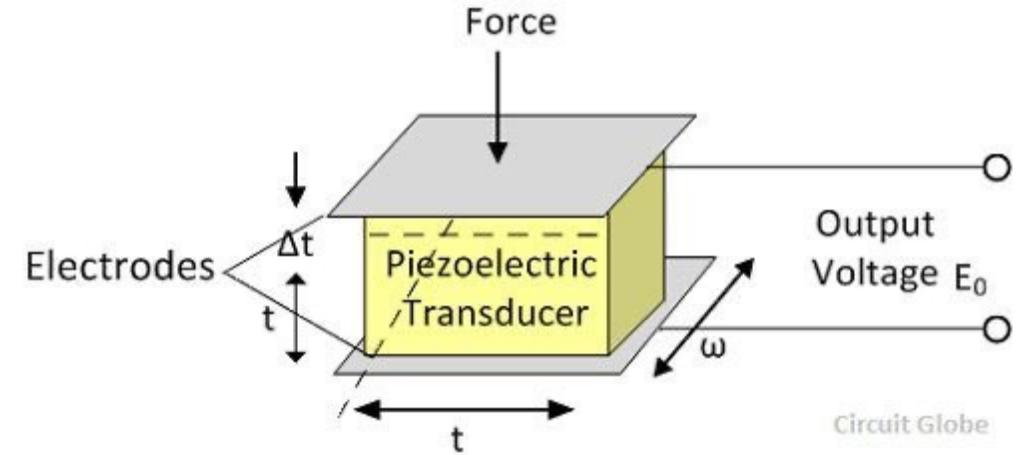
$$f_n = \sqrt{\frac{3YI}{L^3(M_b + 0.24M)}}$$



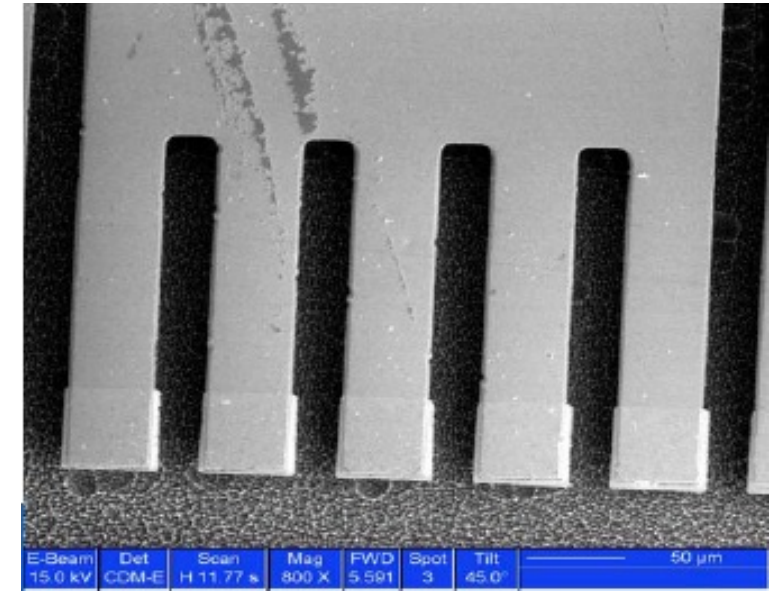
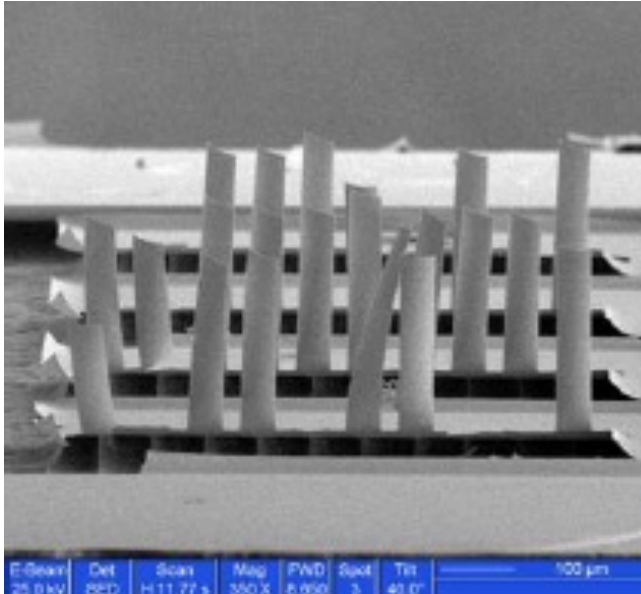
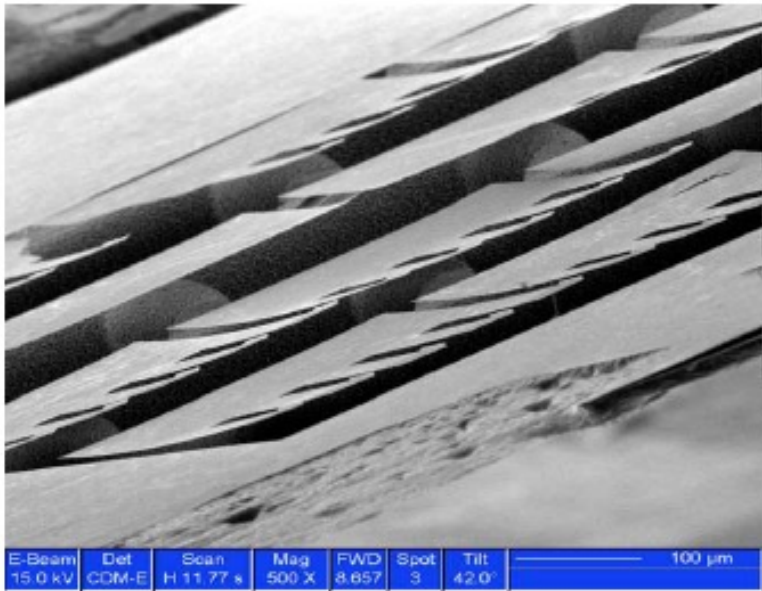
Conversia piezoelectrică

$$P = \frac{1}{2} V_{open} \frac{1}{2} I_{sc} = \frac{1}{4} \left(\frac{td}{\epsilon S} S \right) (fdASY) = \frac{fVk}{s} S^2$$

- $P \sim M$
- $P \sim A^2$
- $P \sim 1/\omega$
- Exemplu: $f = 120\text{Hz}$
 $V = 4 - 6\text{V}$
 $P = 800\mu\text{W}/\text{cm}^3$



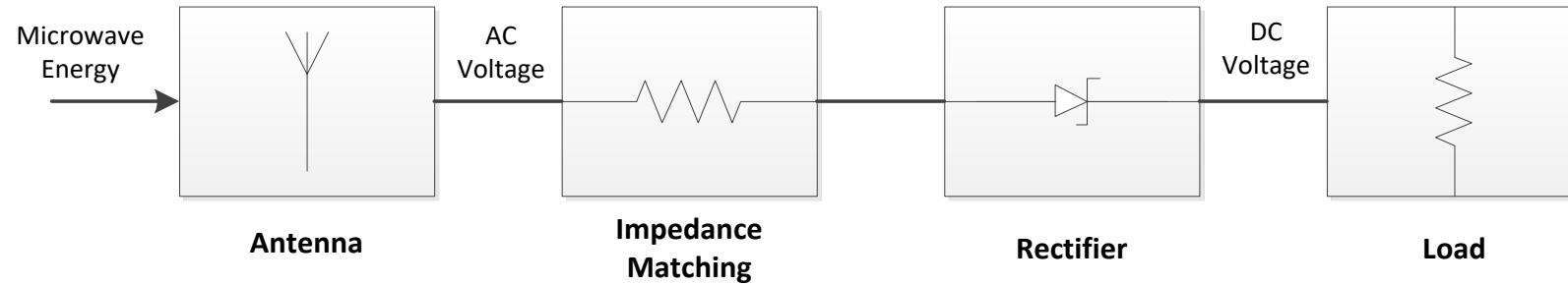
Exemplu: Cantilevered Nano-Piezo Generators



Structuri microscopice de grinzi piezoelectrice construite folosind tehnologia de fabricație a circuitelor integrate

- Frecvența de rezonanță 250-2500Hz
- Densitate de energie de 200mW/cm³

RF Harvesting



- Recoltarea energiei din radiația electromagnetică emisă de dispozitivele electronice
- Antena – tensiune alternativă indusă
- Rectificare – tensiune continuă



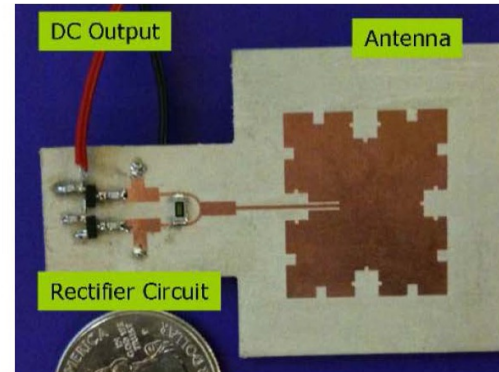
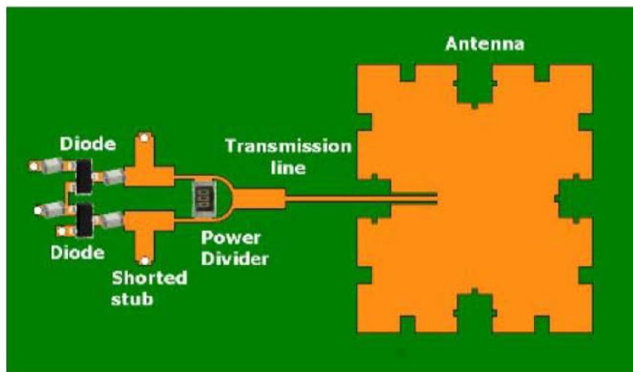
Intentional



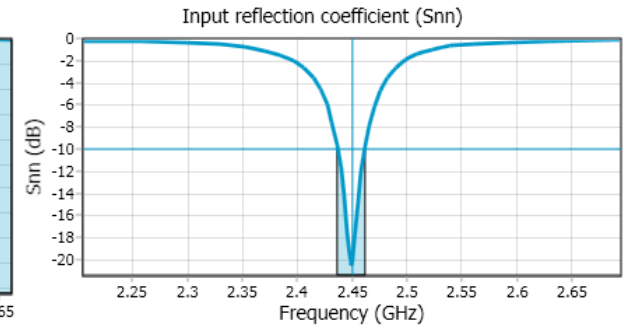
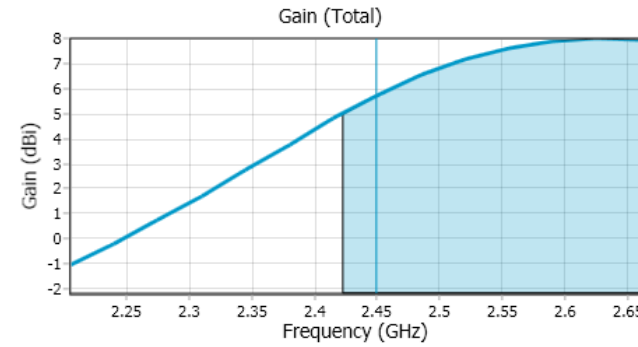
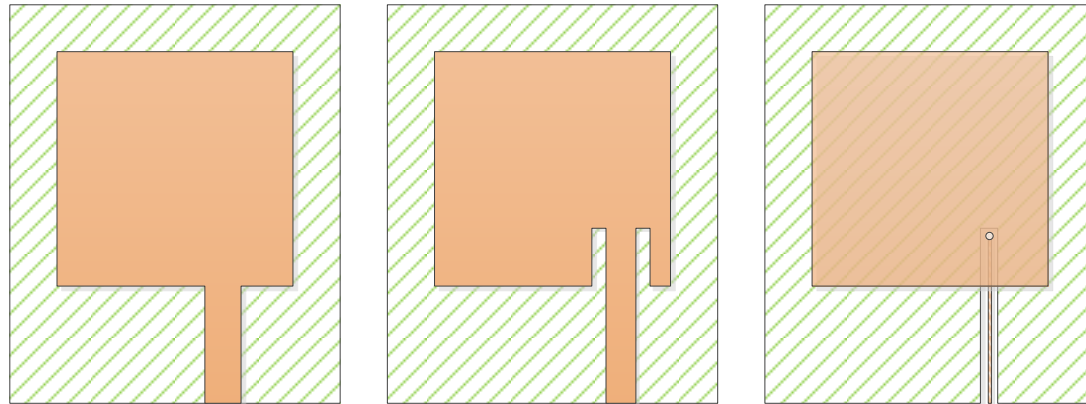
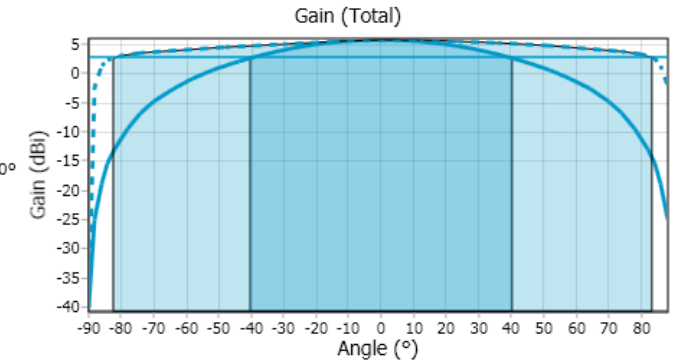
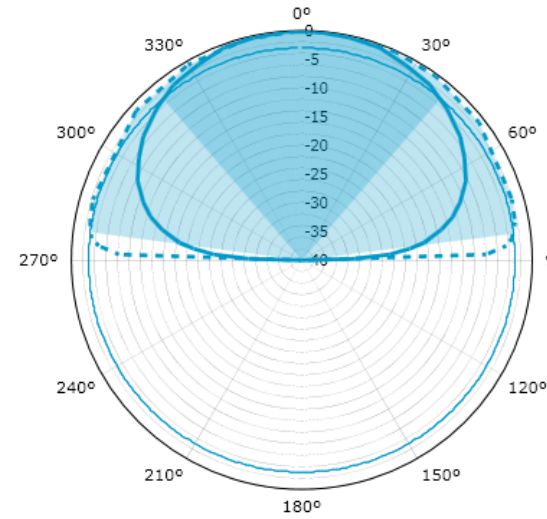
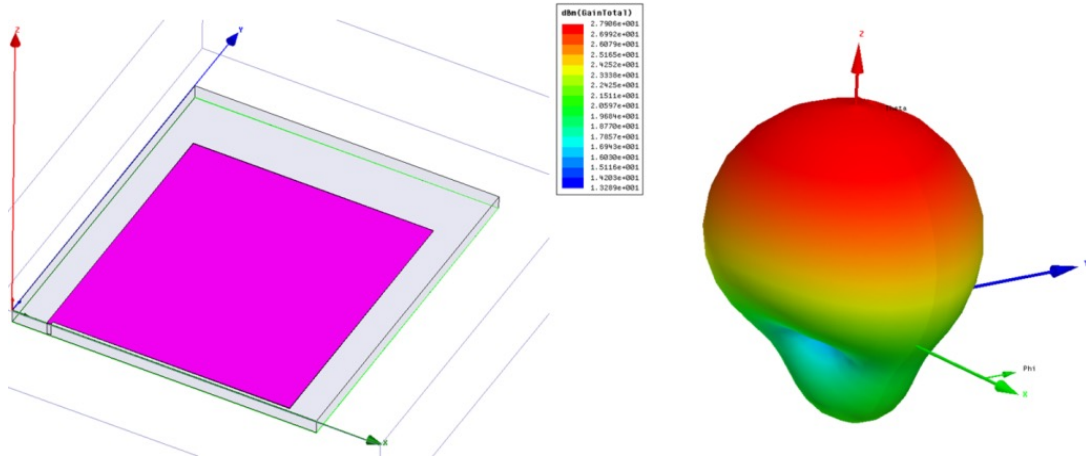
Anticipated



Unknown



Example – PCB Antenna tuned to 2.4GHz



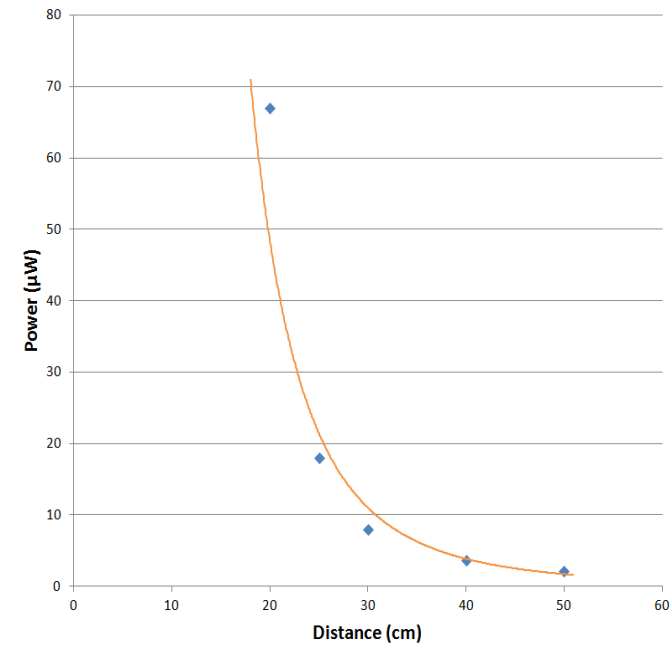
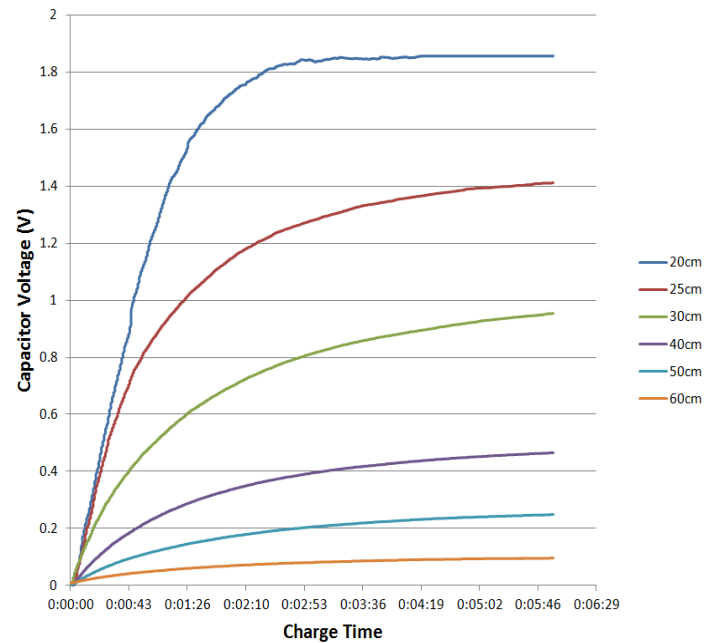
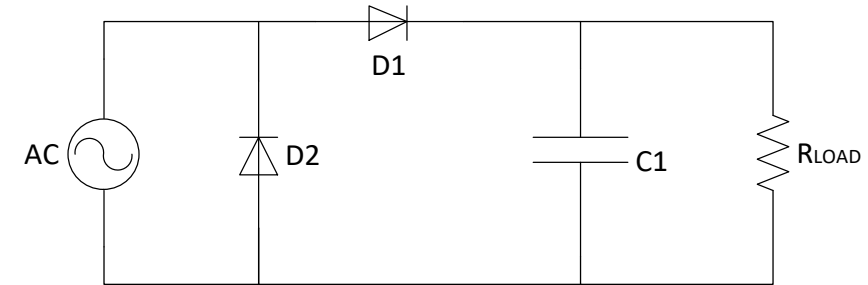
Peak gain @ frequency ($\theta = 0^\circ$; $\phi = 0^\circ$)	7.986 dBi @ 2.625 GHz
3dB beamwidth ($\theta = 0^\circ$; $\phi = 0^\circ$)	indeterminate

Reference impedance @ port 1	50 Ω
Frequency at which S11 = -10 dB	2.437 GHz
Minimum S11 value	-20.47 dB @ 2.450 GHz

RF Harvesting

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{recv.}} = \frac{V_{DC}}{R_{load}^2 \cdot P_{recv.}}$$

$$P_{recv.} = P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$$



- Sistemul Embedded
 - Sistem închis
 - Producători (P_s) și consumatori (P_c) de energie
- Excesul de energie pentru un dispozitiv la momentul t

$$E(t) = \int_0^t (P_s(t) - P_c(t)) dt$$

- Sistemul este independent d.p.d.v. energetic dacă

$$E(t) > 0 \forall t > 0$$

Cazuri speciale

- Harvester fără stocare de energie

$$P_s(t) \geq P_c(t)$$

- Harvester cu mediu de stocare ideal

$$\int_0^T P_c(t) dt = \int_0^T P_s(t) dt + B_0 \quad \forall T \in [0, \infty)$$

- Harvester cu mediu de stocare ne-ideal

$$B_0 + \eta \int_0^T [P_s(t) - P_c(t)]^+ dt - \int_0^T [P_c(t) - P_s(t)]^+ dt - \int_0^T P_{leak}(t) dt \geq 0 \quad \forall T \in [0, \infty) \quad (1)$$

$$B_0 + \eta \int_0^T [P_s(t) - P_c(t)]^+ dt - \int_0^T [P_c(t) - P_s(t)]^+ dt - \int_0^T P_{leak}(t) dt \leq B \quad \forall T \in [0, \infty) \quad (2)$$

Rafinare

- Funcții (ρ , σ_1 , σ_2):
- $P_s(t) = f(\rho_1, \sigma_1, \sigma_2)$; $P_c(t) = f(\rho_2, \sigma_3, \sigma_4)$
- Înlocuind în (1) și (2), obținem:

$$\rho T - \sigma_2 \leq \int_{\tau}^{T+\tau} P(t) dt \leq \rho T + \sigma_1$$

$$B_0 + \eta \cdot (\rho_1 T + \sigma_1) - (\rho_2 T - \sigma_4) - \rho_{leak} T \leq B$$

$$B_0 + \eta \cdot (\rho_1 T - \sigma_2) - (\rho_2 T + \sigma_3) - \rho_{leak} T \geq 0$$

- Condiții limită

– $T = 0$

$$\left. \begin{array}{l} B_0 \geq \eta \cdot \sigma_2 + \sigma_3 \\ B_0 + \eta \cdot \sigma_1 - \sigma_4 \leq B \end{array} \right\} \Rightarrow B \geq \eta \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) + \sigma_3 - \sigma_4$$

– $T \rightarrow \infty$

$$\eta \cdot \rho_1 - \rho_{leak} \geq \rho_2$$

$$\eta \cdot \rho_1 - \rho_{leak} \leq \rho_2$$

Evaluarea Surselor de Energie Regenerabilă

Randamentul a trei metode de energy harvesting a fost evaluat experimental

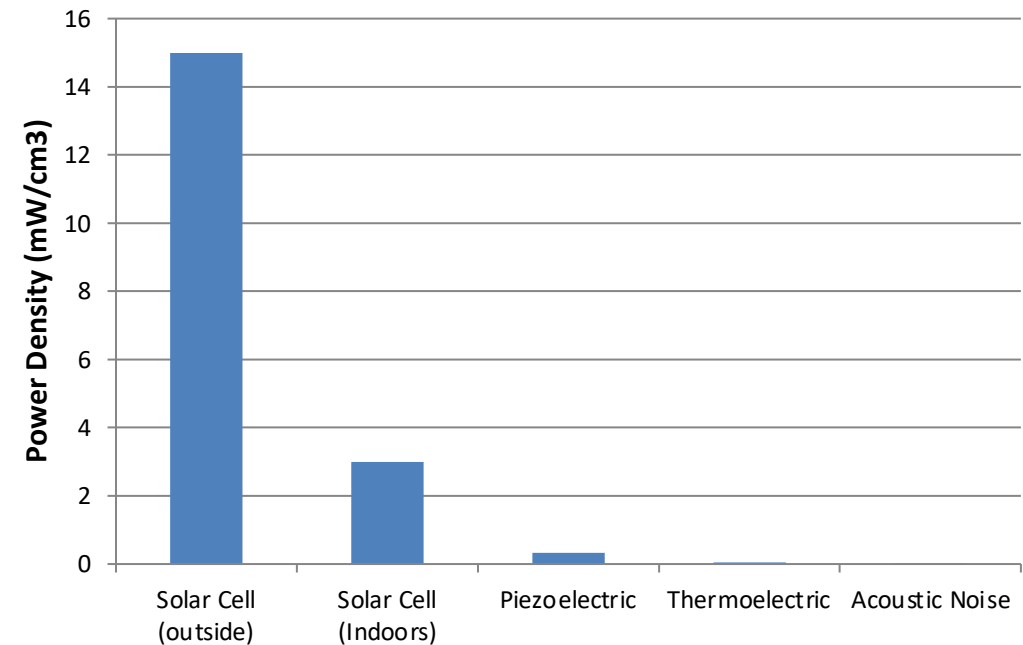
- Fotovoltaic
- Termoelectric
- Piezoelectric

Metrică – densitatea de energie

Recoltarea fotovoltaică a da cele mai bune rezultate

Atunci când nu este disponibilă, celelalte metode pot fi implementate

Harvesting Technology	Power Density
Solar Cells(outdoors at noon)	15mW/cm ³
Piezoelectric (shoe inserts)	330uW/cm ³
Vibration(microwave oven)	116uW/cm ³
Thermoelectric(10°C)	40uW/cm ³
Acoustic noise (100dB)	960nW/cm ³



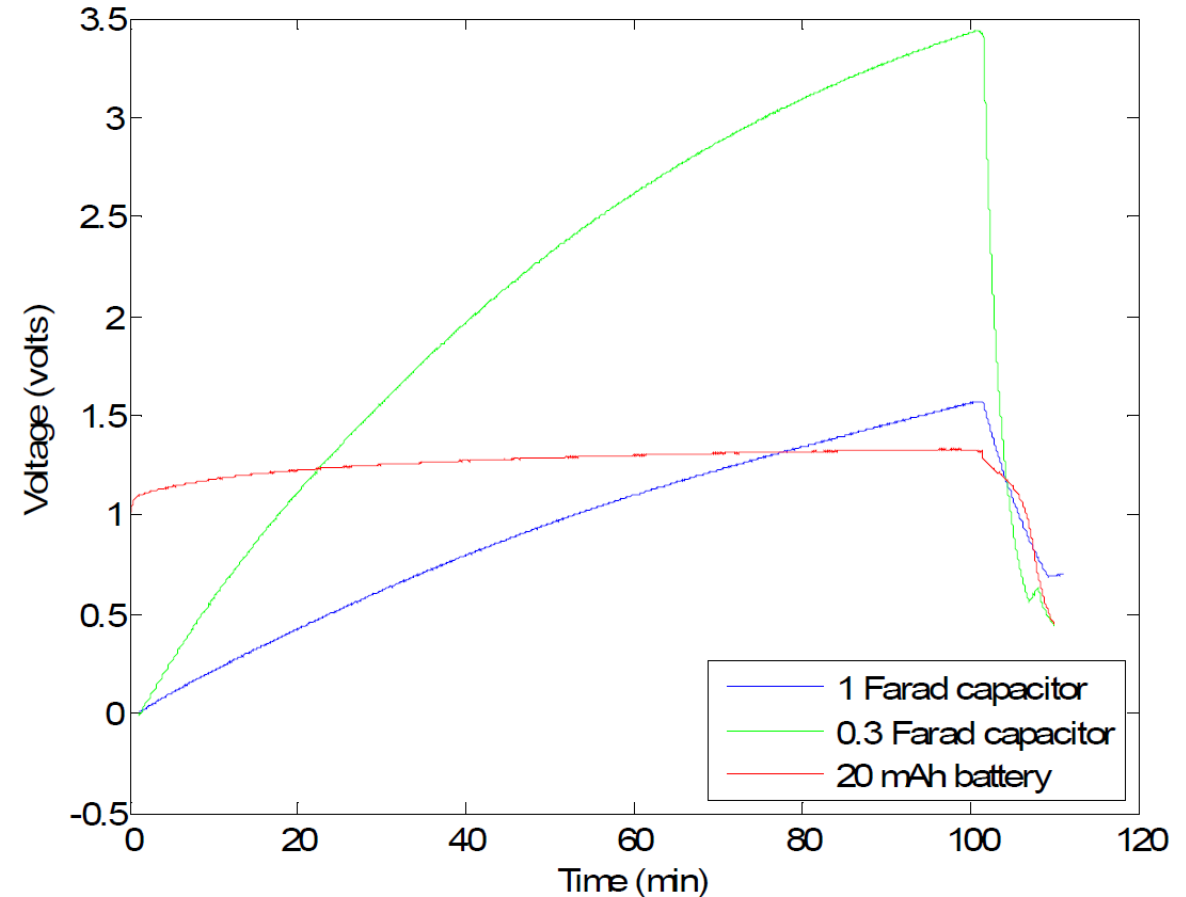
Medii pentru stocarea energiei

Acumulatori

- Tehnologie matură
- Stochează sarcina electrică electrochimic
- Preț scăzut și disponibilitate mare
- Folosite pe scară largă în WSN
- Timpi mari de încărcare
- Se degradează odată cu trecerea timpului
- Au un număr finit de cicli încărcare/descărcare

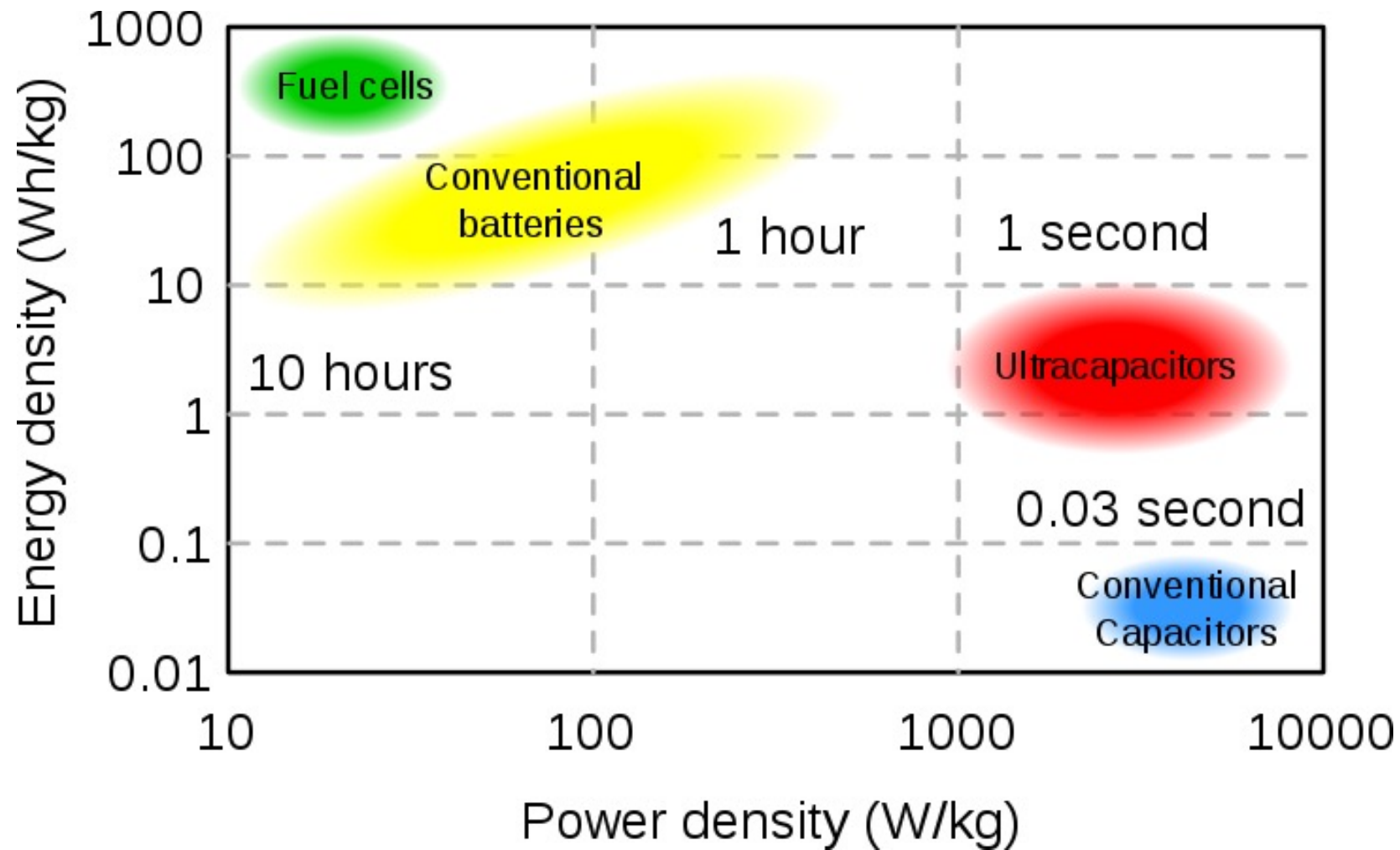
Supercondensatoare

- Tehnologie emergentă
- Stochează sarcina electrostatic, sub formă de ioni
- Capacități foarte mari (1F-1000F)
- Timpi reduși de încărcare și descărcare
- Nu se degradează cu trecerea timpului
- Preț (mai) ridicat

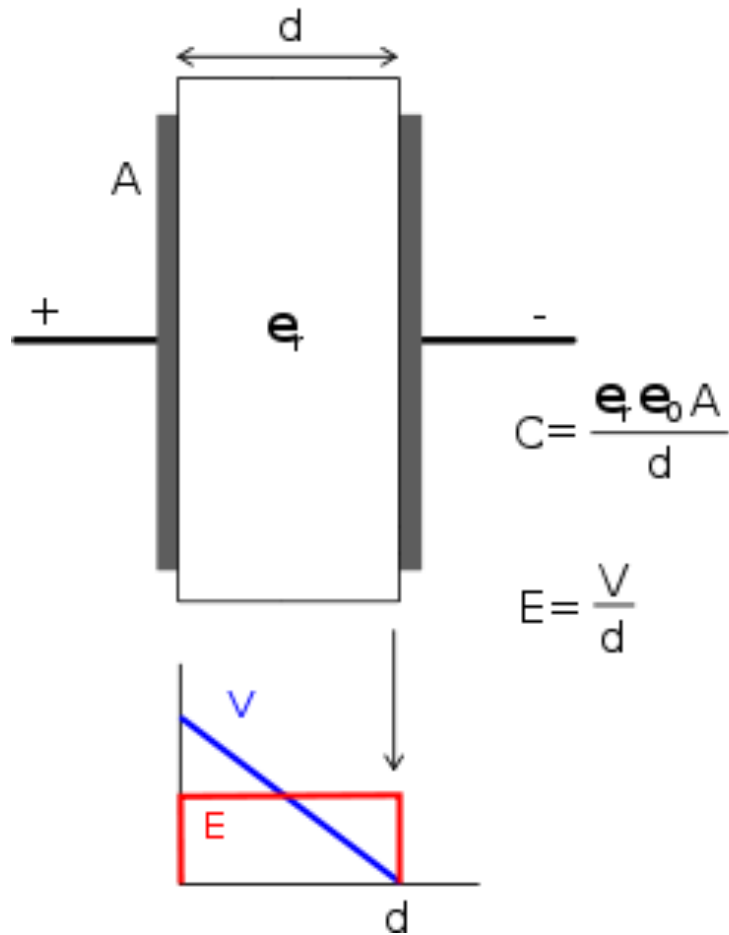


Folosirea celulelor electrochimice nu este optimă
pentru aplicațiile IoT

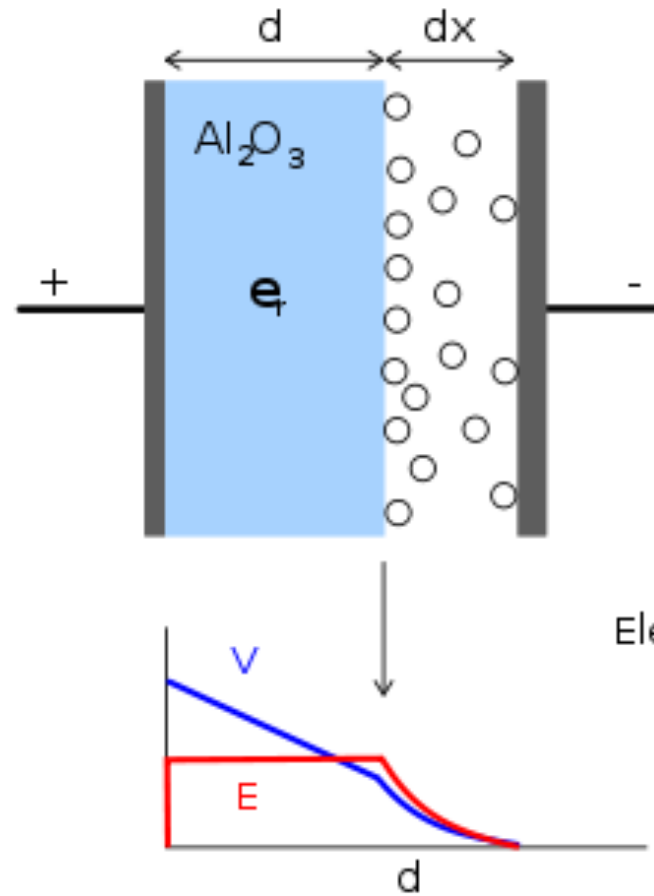
Stocarea energiei



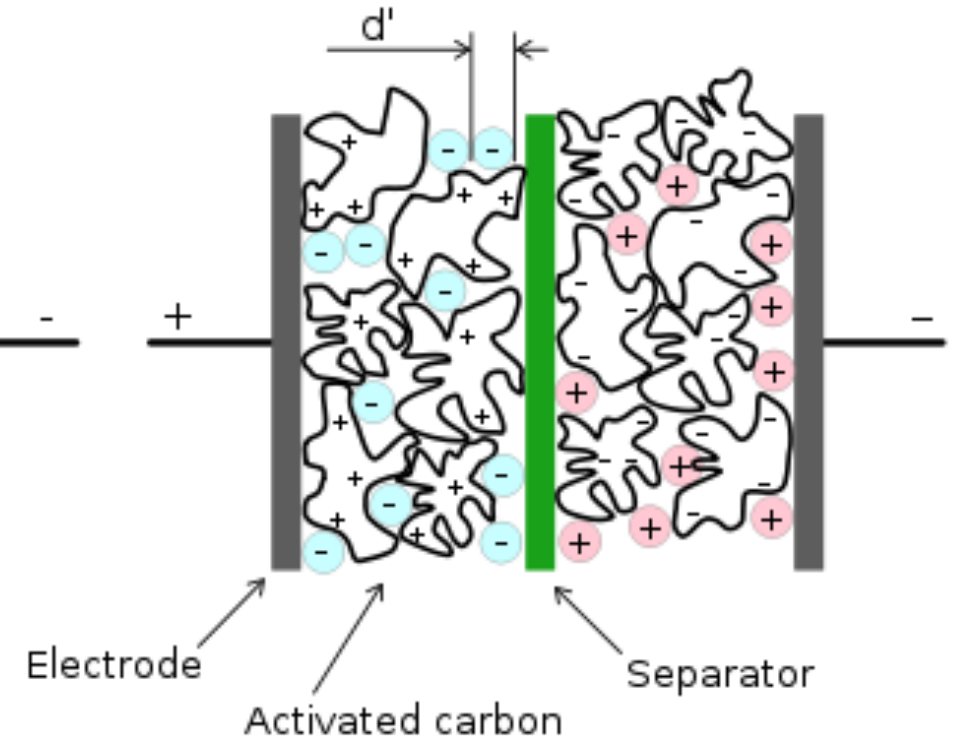
Electrostatic



Electrolytic

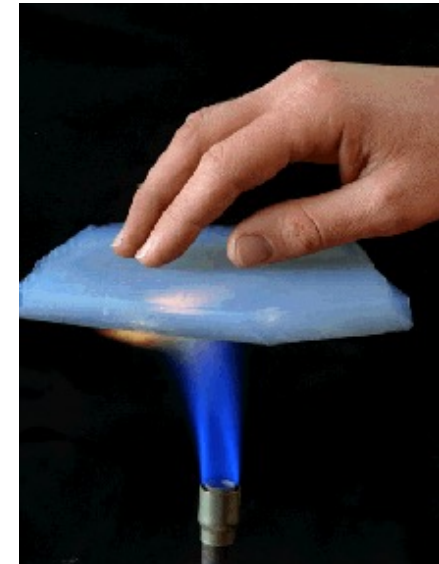
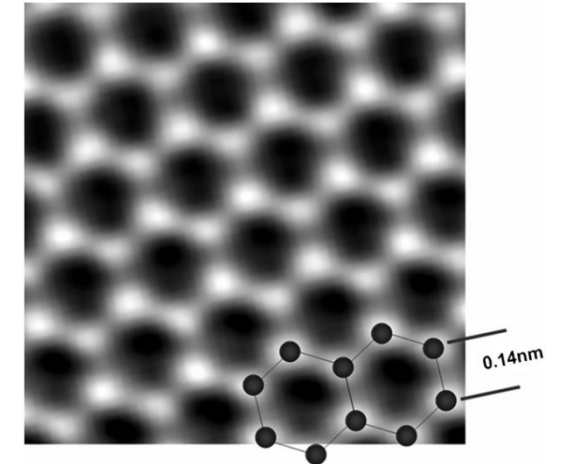
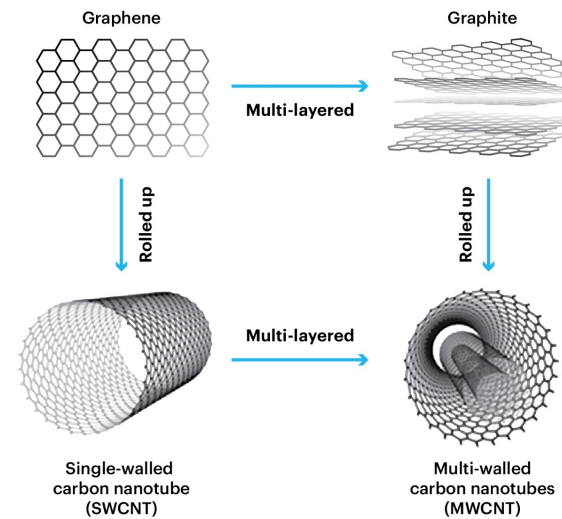


Electrochemical double-layer

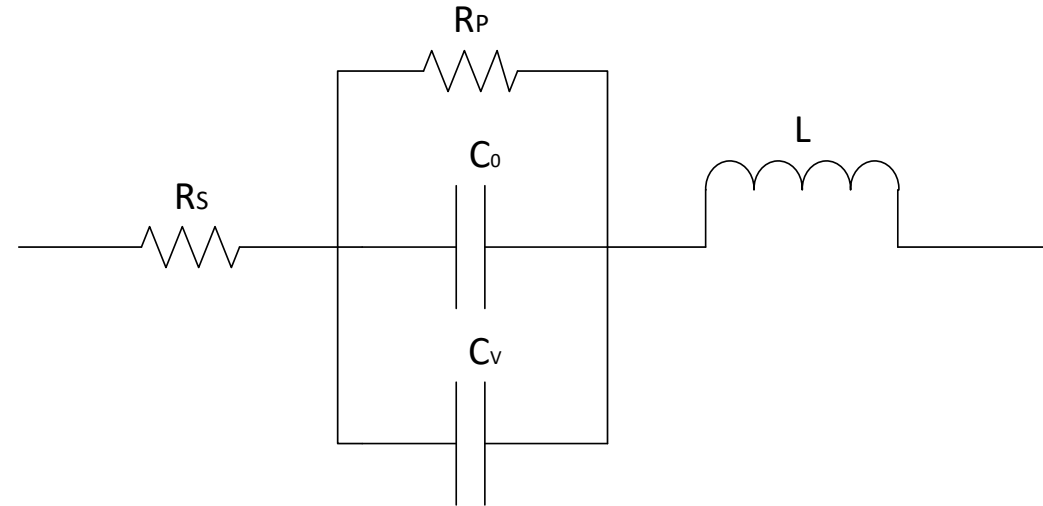


Supercondensatoare

- Dielectric
 - Carbon activat
 - Grafen
 - Nanotuburi
 - Aerogel



$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{D} \quad P_{max} = \frac{V^2}{4R_S}$$

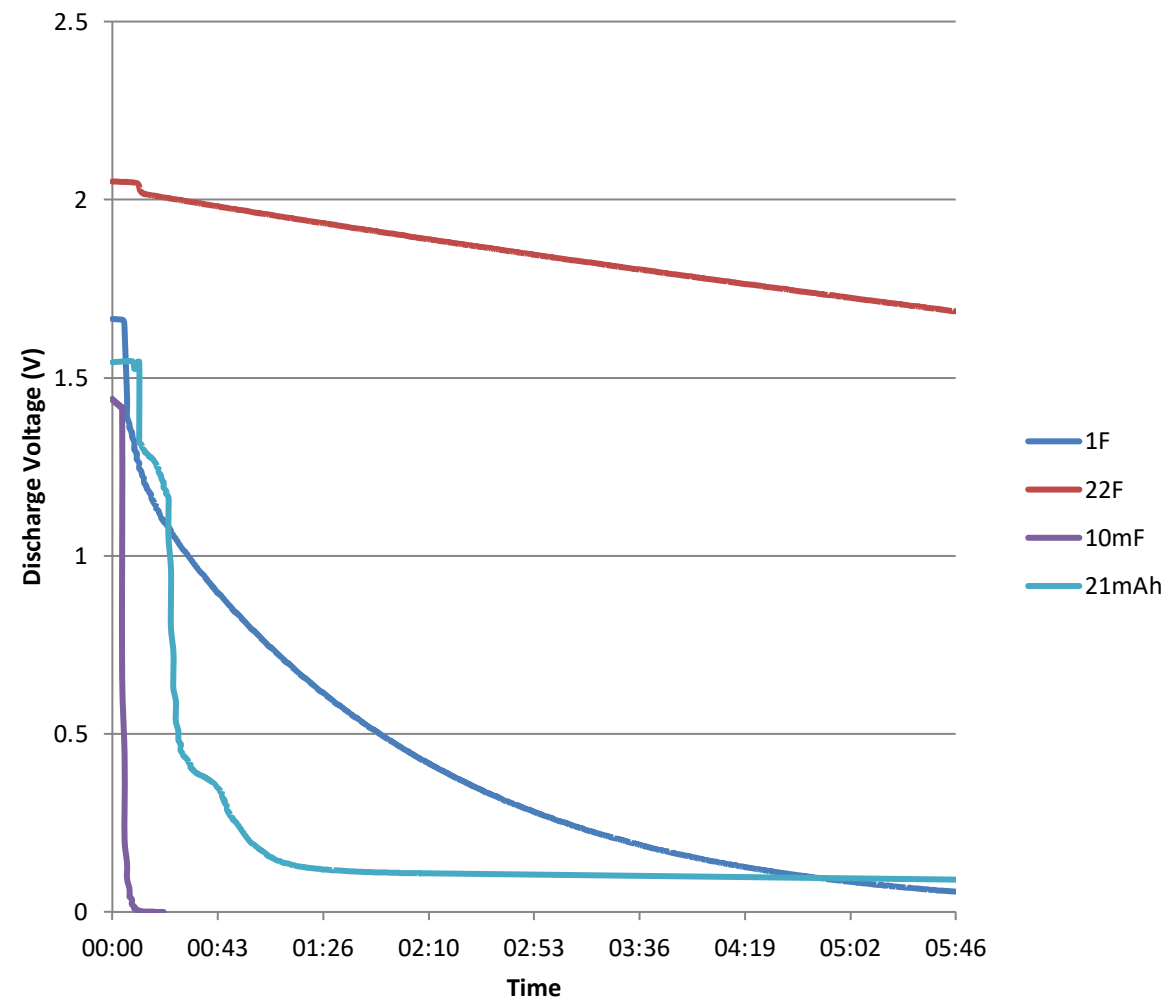
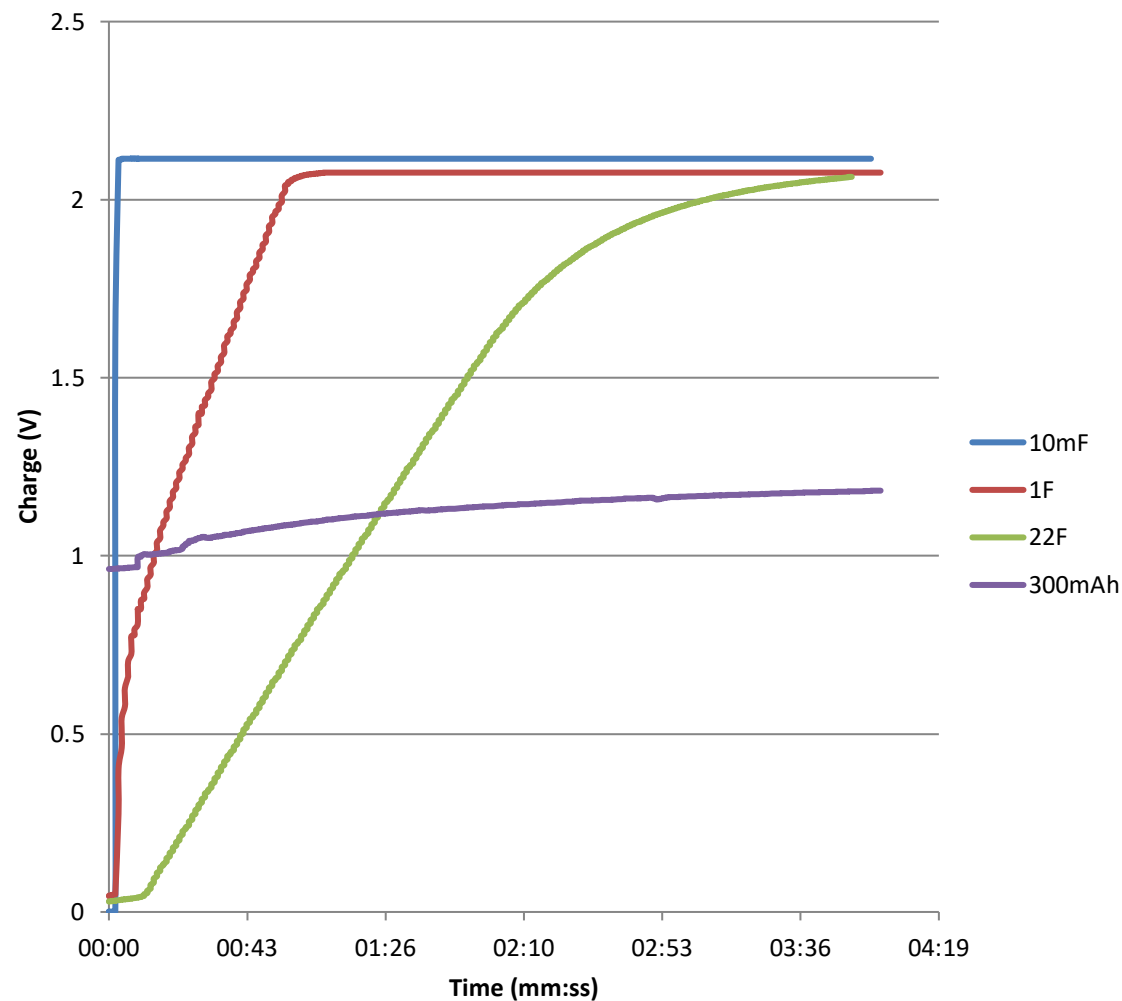


- Capacitate suplimentară ce depinde de tensiunea de alimentare

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(CV)}{dt} = \frac{d(C_0V + K_VV^2)}{dt} = (C_0 + 2K_VV) \frac{dV}{dt}$$

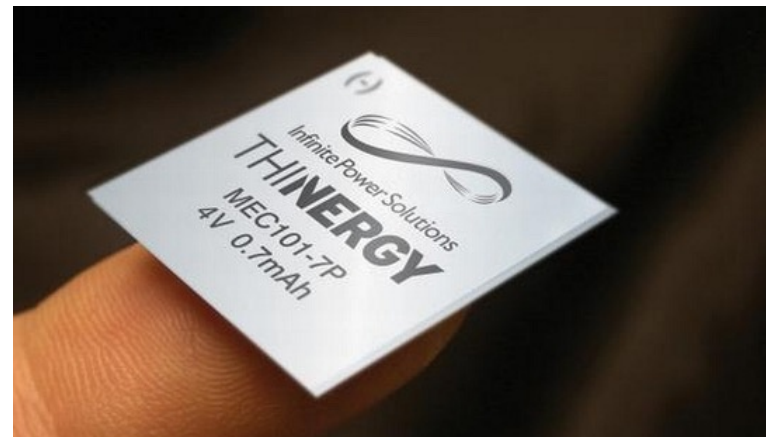
$$E(V) = \int P(V)dV = \left(C_0 + \frac{4}{3}K_VV\right) \frac{V^2}{2}$$

Supercondensatoare

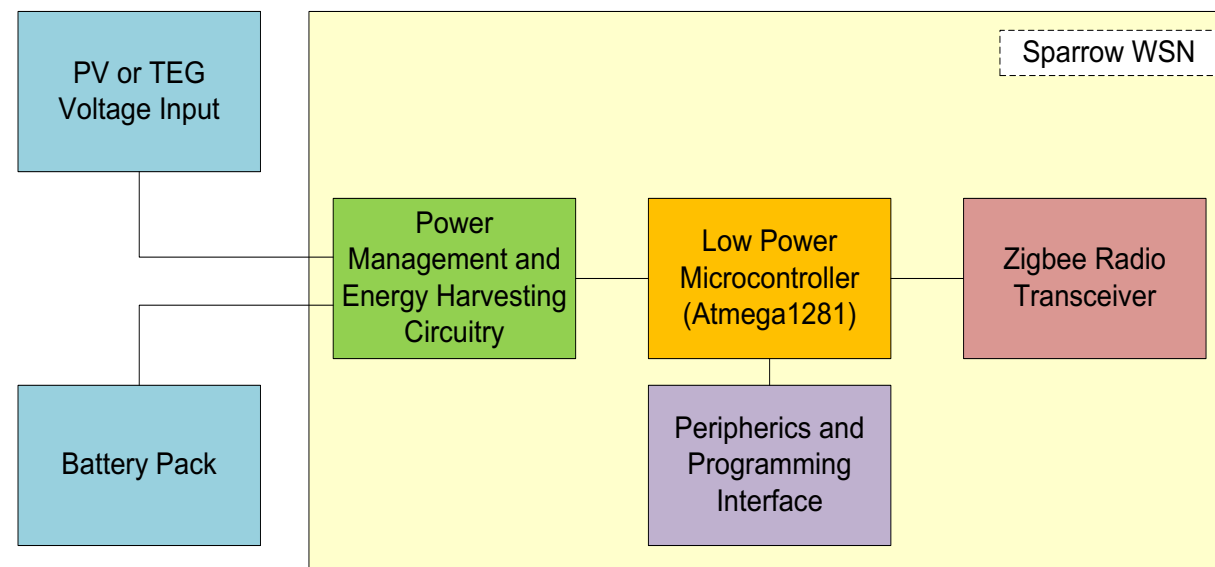
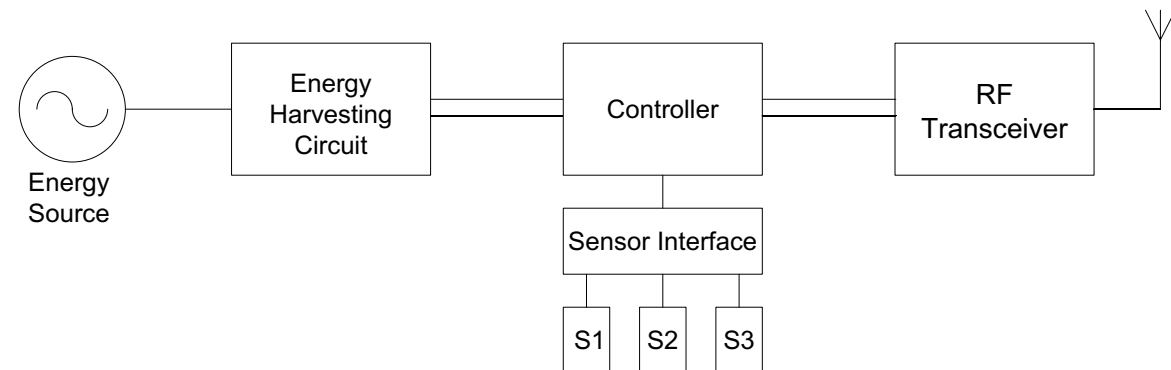
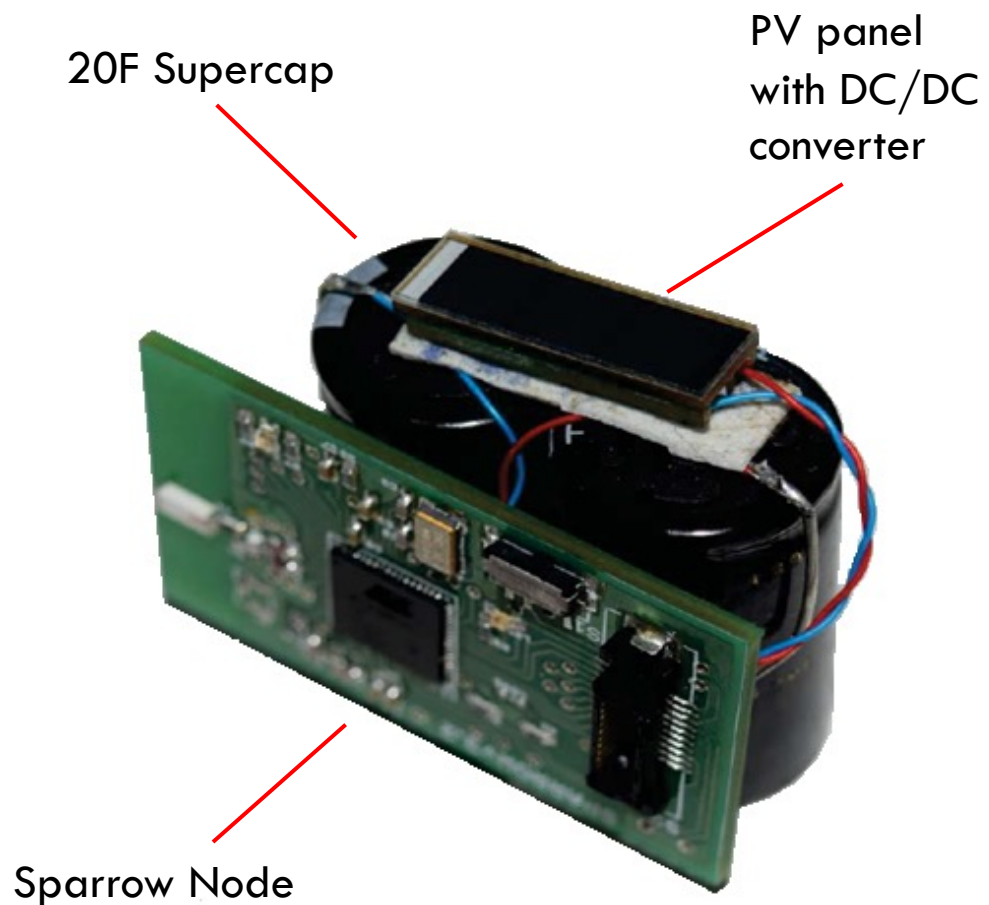


Medii de stocare

- Baterii
 - + Cost redus
 - + Densitate mare de energie
 - + Tehnologie sigură și testată în timp
 - Diferite regimuri de încărcare
 - Cicli de încărcare reduși
 - Curent de leakage
- Supercondensatoare
 - + Circuite de încărcare simple
 - + Densitate de energie mare (< baterii)
 - + Număr foarte mare de cicli de încărcare
 - Cost mare
 - Curent de leakage
 - Tensiune de operare mică
- Hibridi baterie-condensator
 - Lithium-ion capacitor



Energy Harvesting Sensor Node



Independența energetică

Este posibil ca un nod senzorial să fie independent din punct de vedere energetic?

Experiment:

- ▶ Nod senzorial Sparrow
- ▶ Panou fotovoltaic 5V 200mA
- ▶ Condensator de 1F
- ▶ 1% duty cycle

