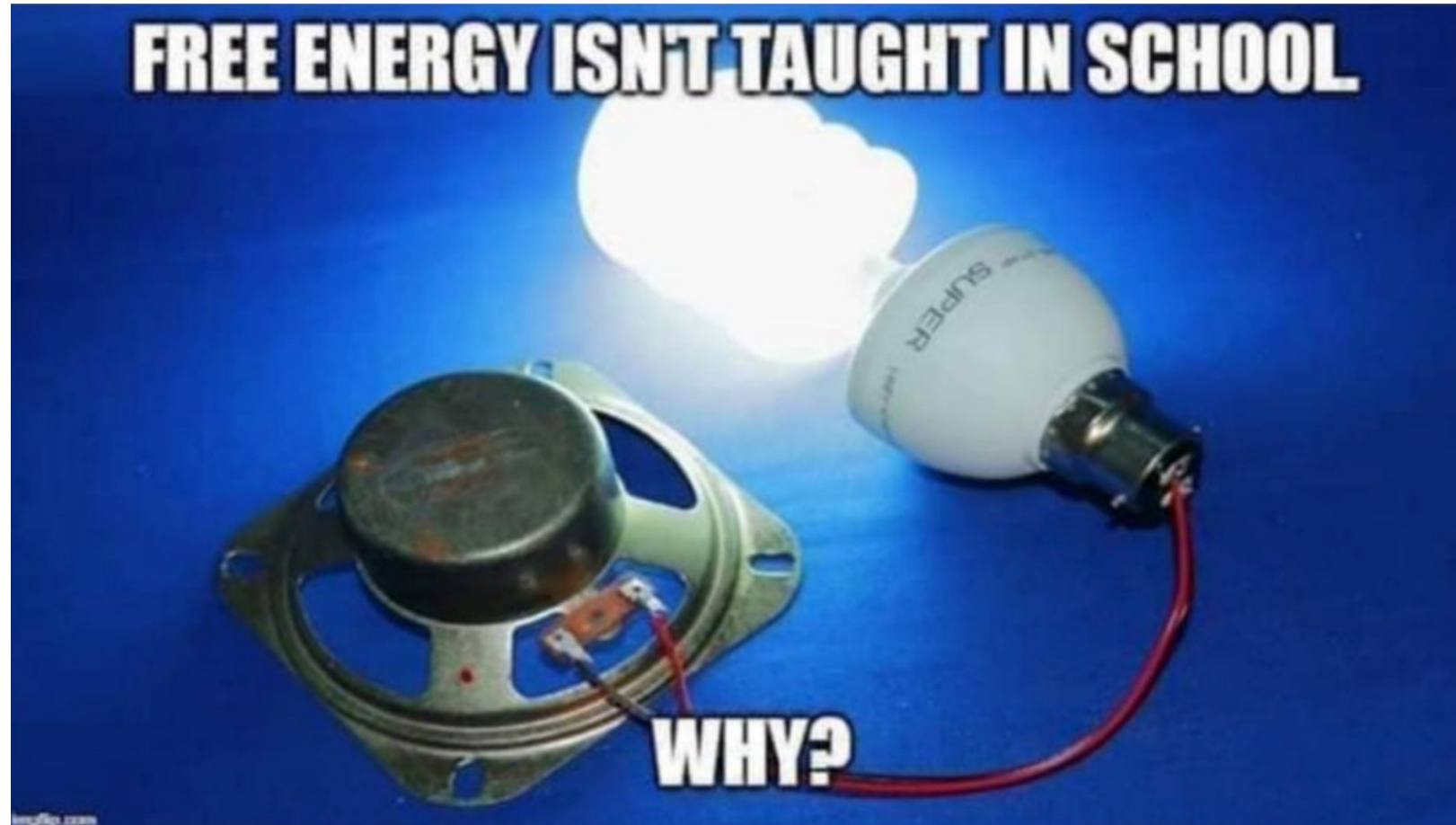


# Sisteme Încorporate

## Cursul 11

### 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



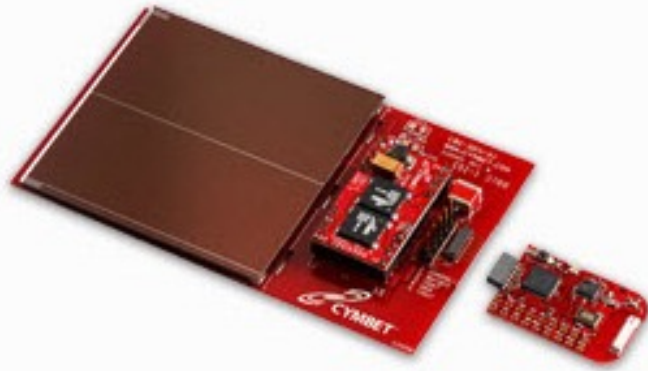
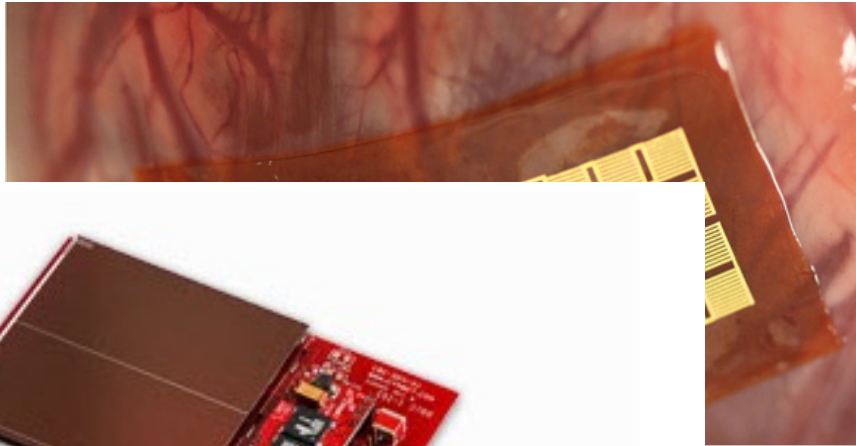
- Surse de radiație ambientale
  - Passive RFID
- Recoltarea de energie biomecanică
  - Mișcarea umană (genunchi, călcâi etc.)
- Energie piezoelectrică
  - Surse de vibrații
- Energie piroelectrică
- Energie termoelectrică
- Energie electromagnetică
  - Inducția magnetică într-o bobină (diferite tipuri 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

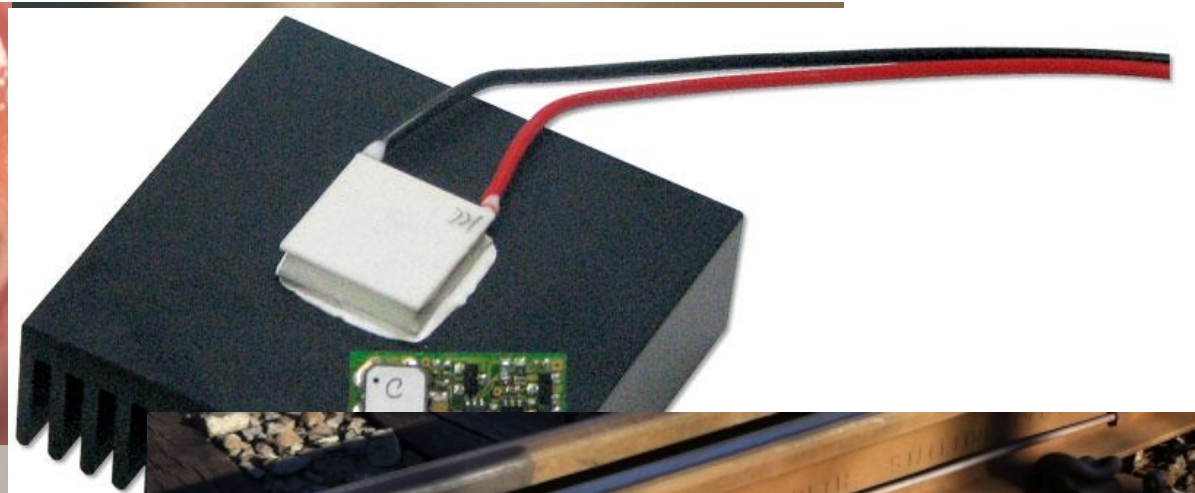
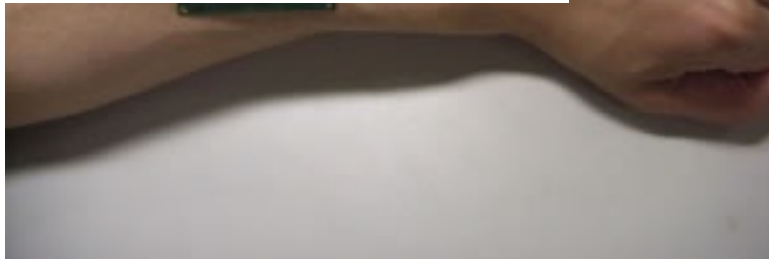




# Exemple

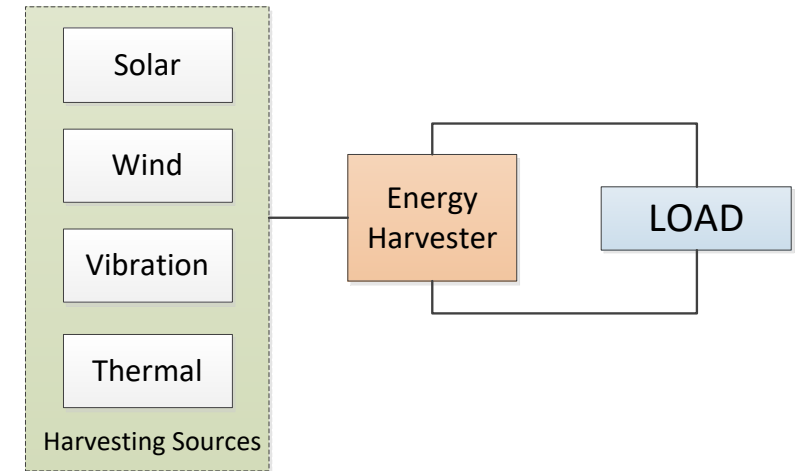


eZ430-RF2500-SEH  
Solar Energy Harvester



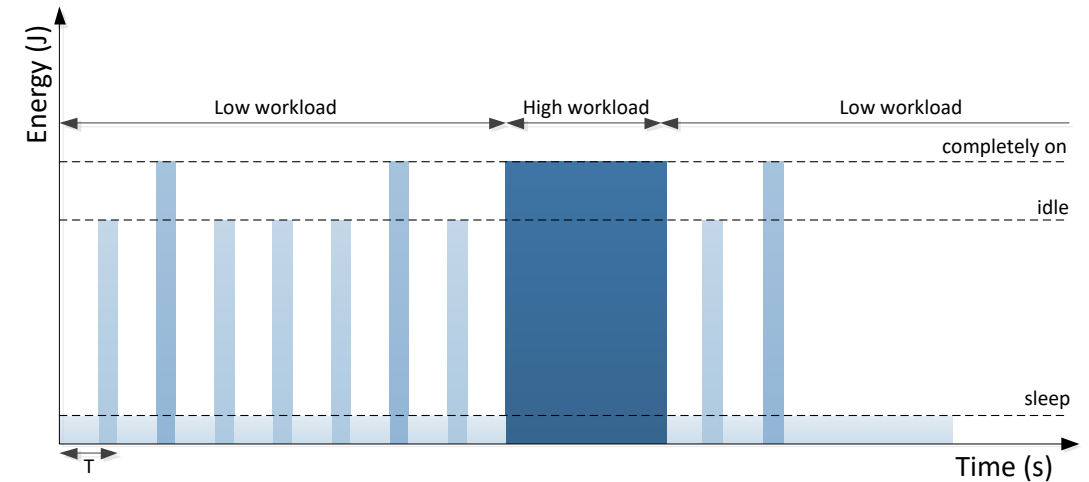
# Energy Harvesting

- 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

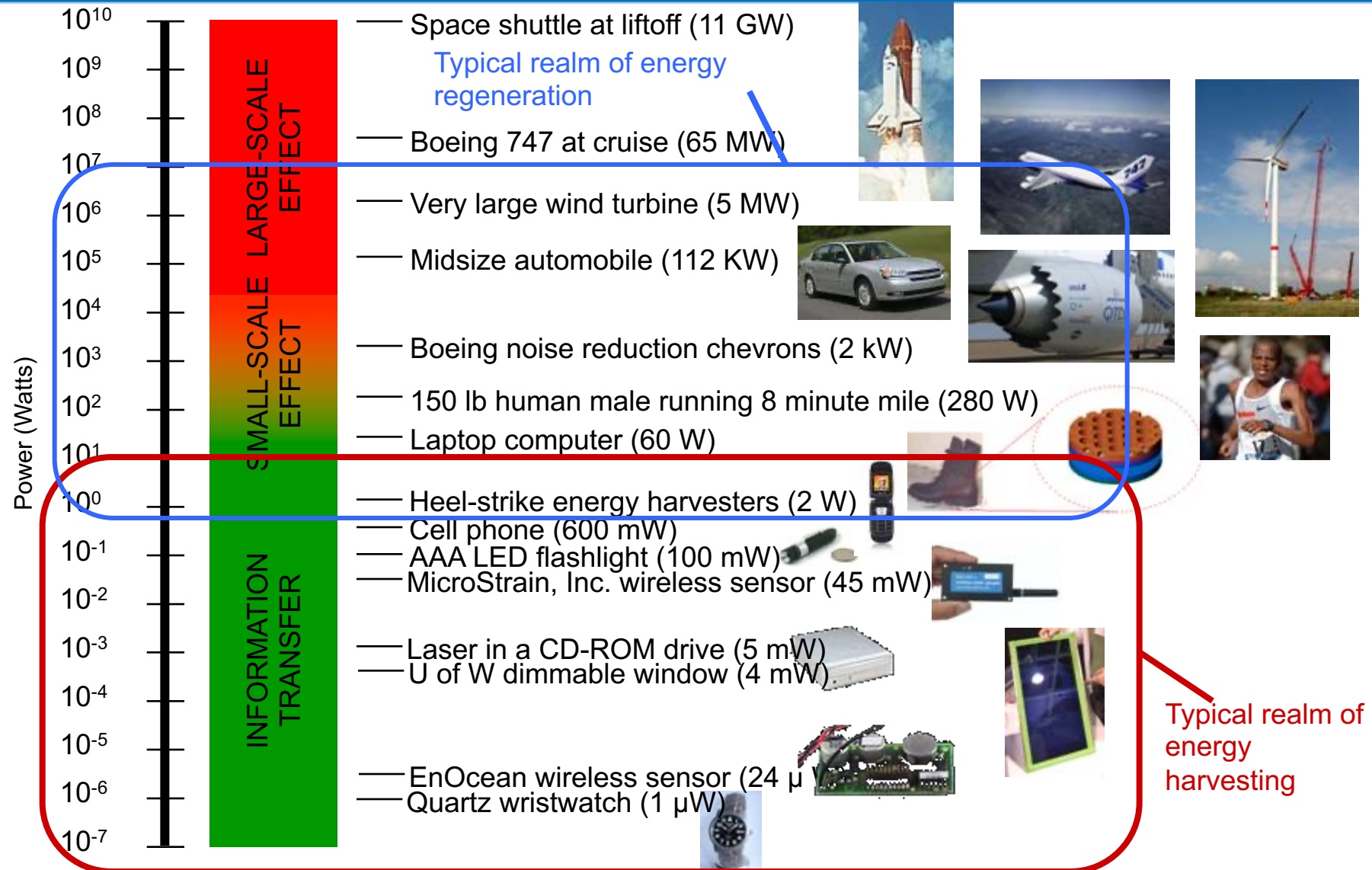
- Energy Neutrality. Cum poate fi variat consumul de energie al rețelei a.î. să fie tot timpul mai mic decât rata cu care e produsă energia?
- Performance Balancing: Cum poate fi maximizată performanța unui sistem într-un buget energetic dat?



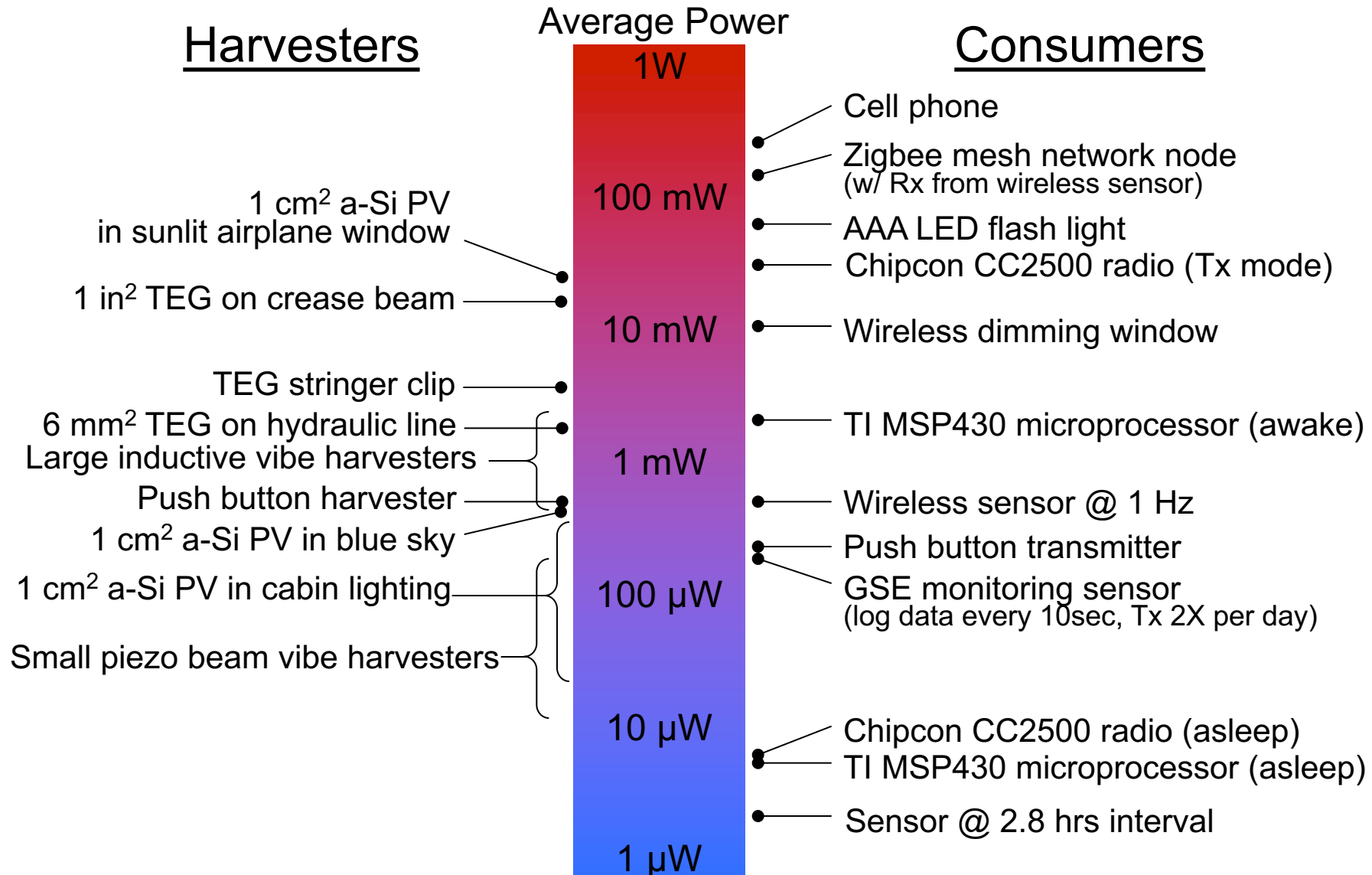


- Reducerea greutatei
- Reducerea costurilor de instalare și întreținere
- Introducerea rapidă a funcționalităților noi
- Reconfigurarea rapidă
- Se pune accent pe
  - Aplicații care au cerințe limitate de lățime de bandă
  - Eliminarea cablurilor: distanțe mari de acoperit, articulații flexibile, zone dificil de accesat, medii ostile

# Power Generation and Consumption



# Energy Harvesting Power Generation & Utilization



# Surse de energie regenerabilă

## - Conversia piezoelectrică

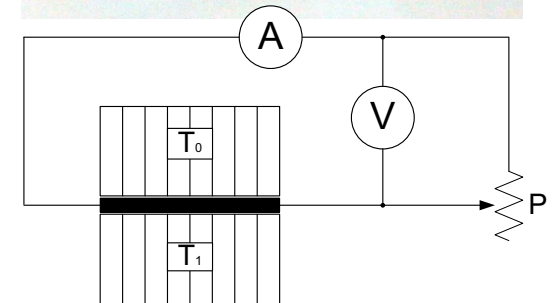
- Grindă elastică de material piezoelectric cu o greutate atașată la capătul mobil.
- Energie maximă -> frecvența de rezonanță
  - $f = 120\text{Hz}$ ;  $V = 4 - 6\text{V}$ ;  $P = 800\mu\text{W}$

## - 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)





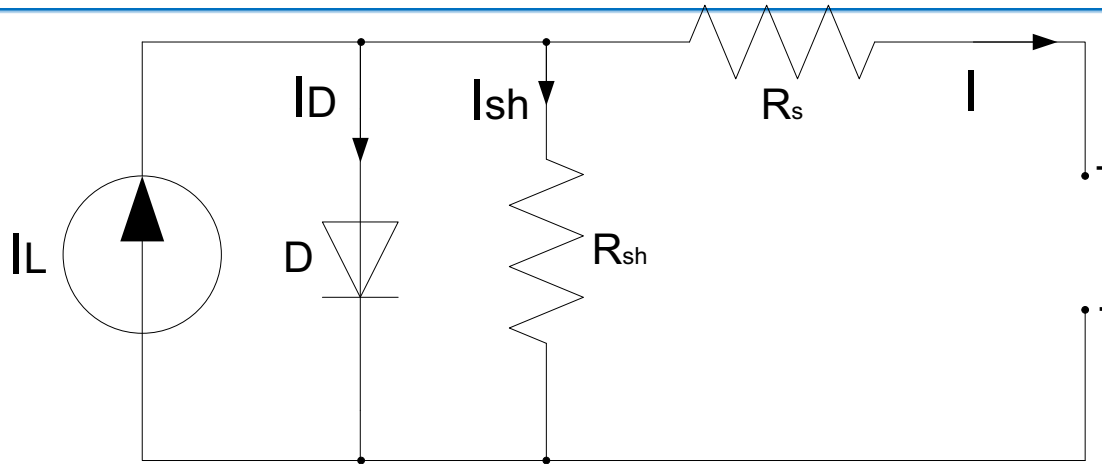
$$I = I_L - I_D - I_{SH}$$

$I$  = 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

$$I_{dark}(V) = I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

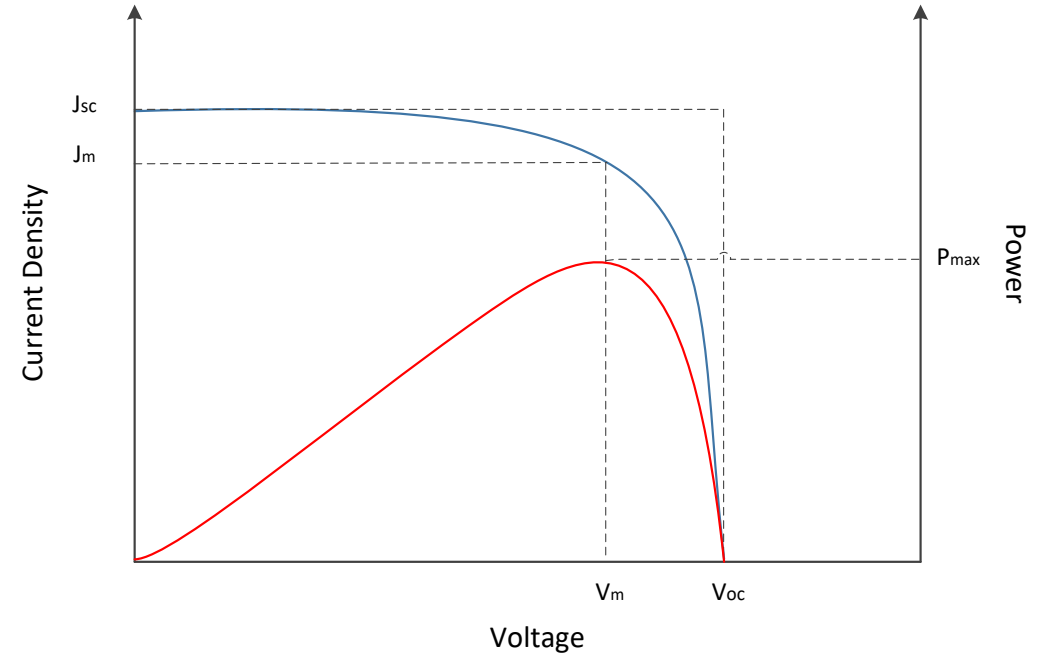
$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left( e^{\frac{I_{sc}}{I_0}} + 1 \right)$$

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

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

Parametrii ce descriu funcționarea unei celule:

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

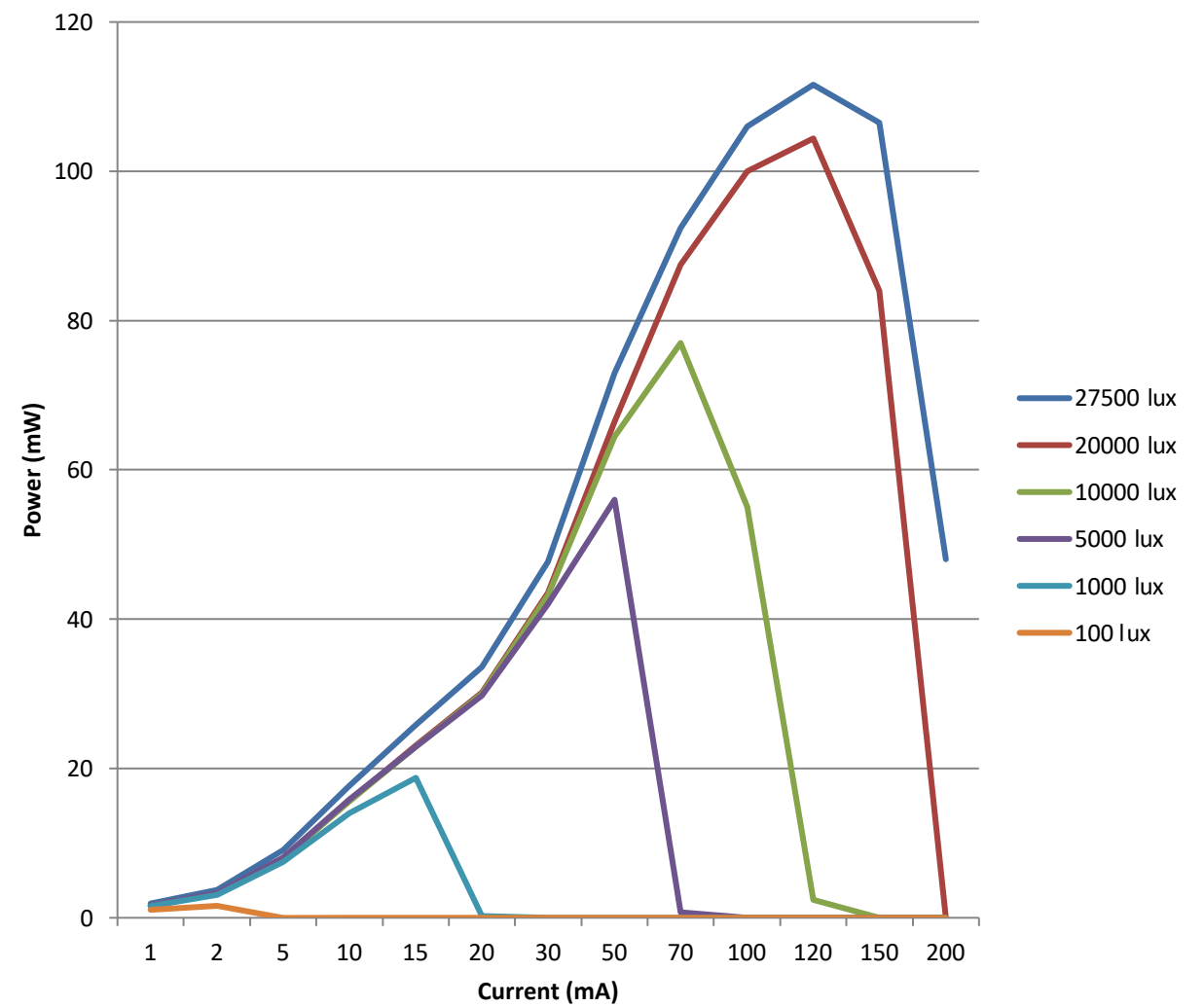
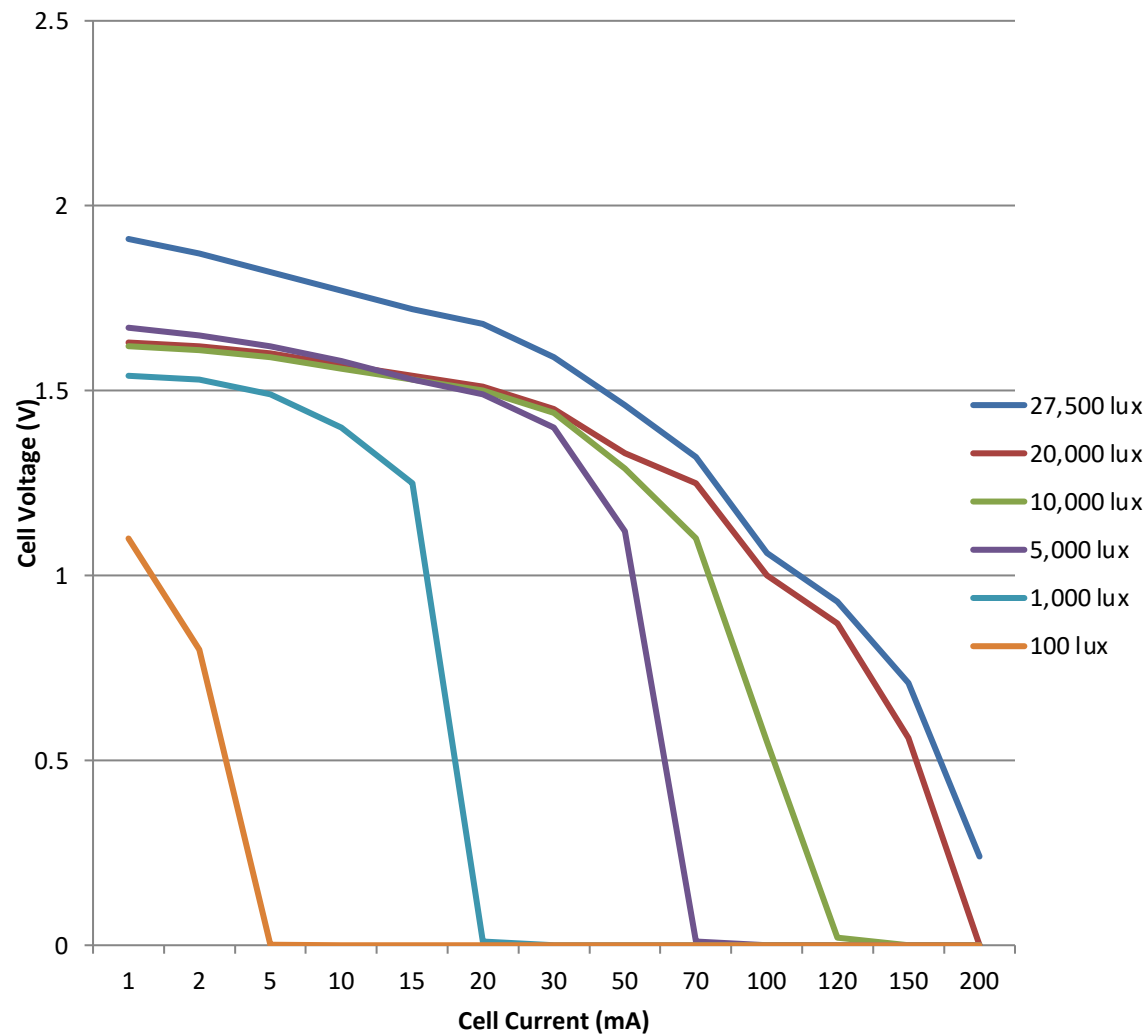


$$FF = \frac{P_m}{P_{max}} = \frac{J_m V_m}{J_{sc} V_{oc}}$$

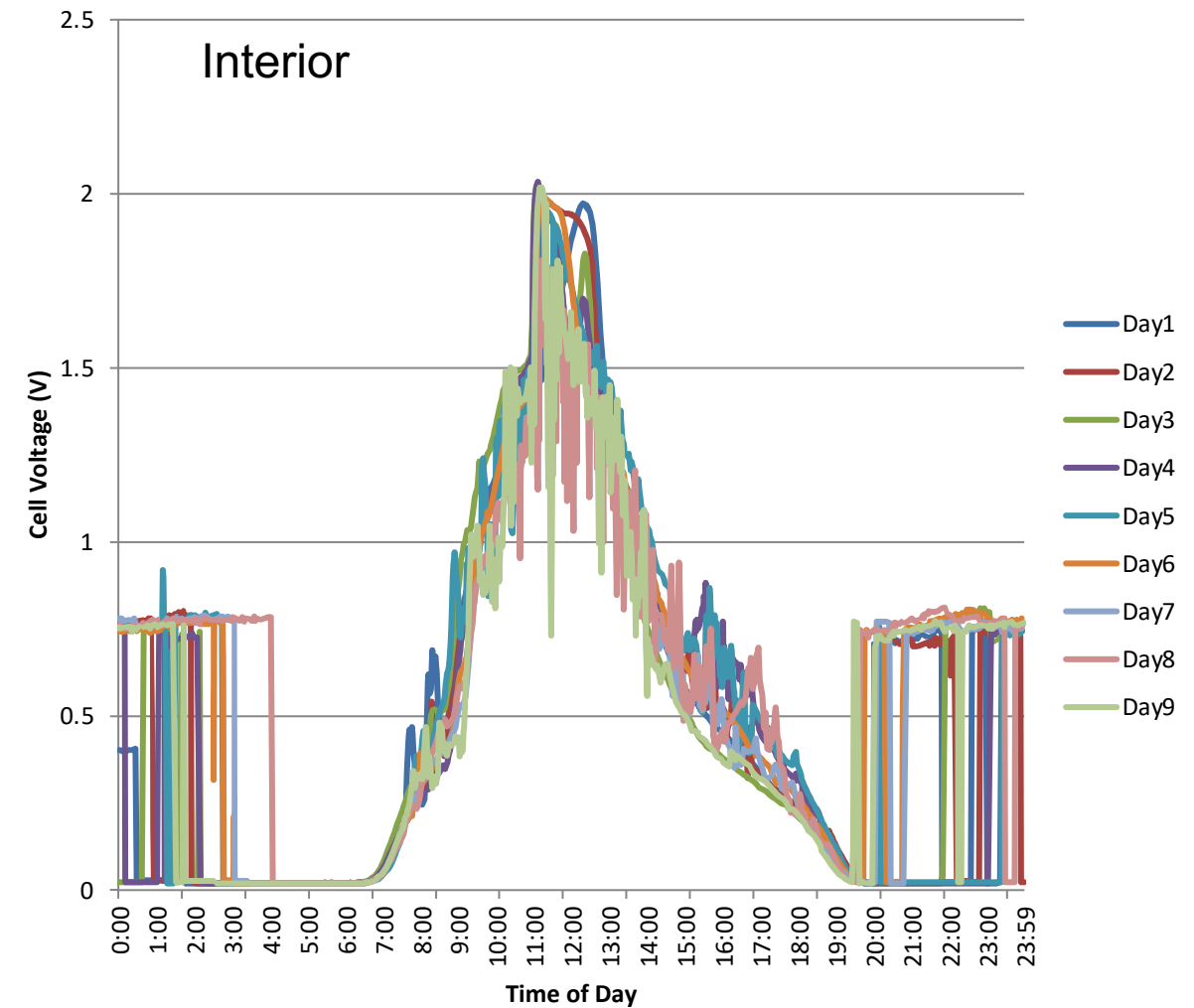
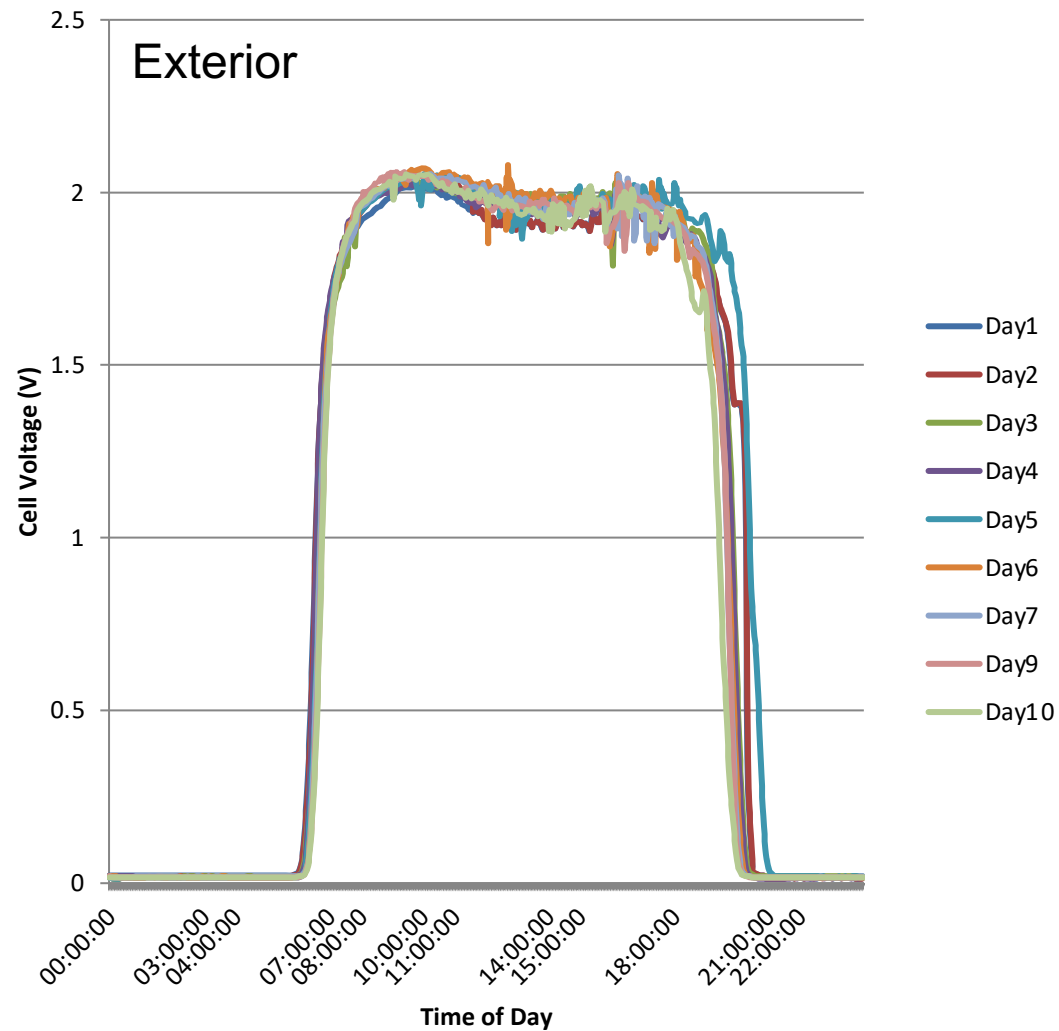
$$\eta = \frac{P_m}{P_l} = \frac{J_m V_m}{P_l}$$

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

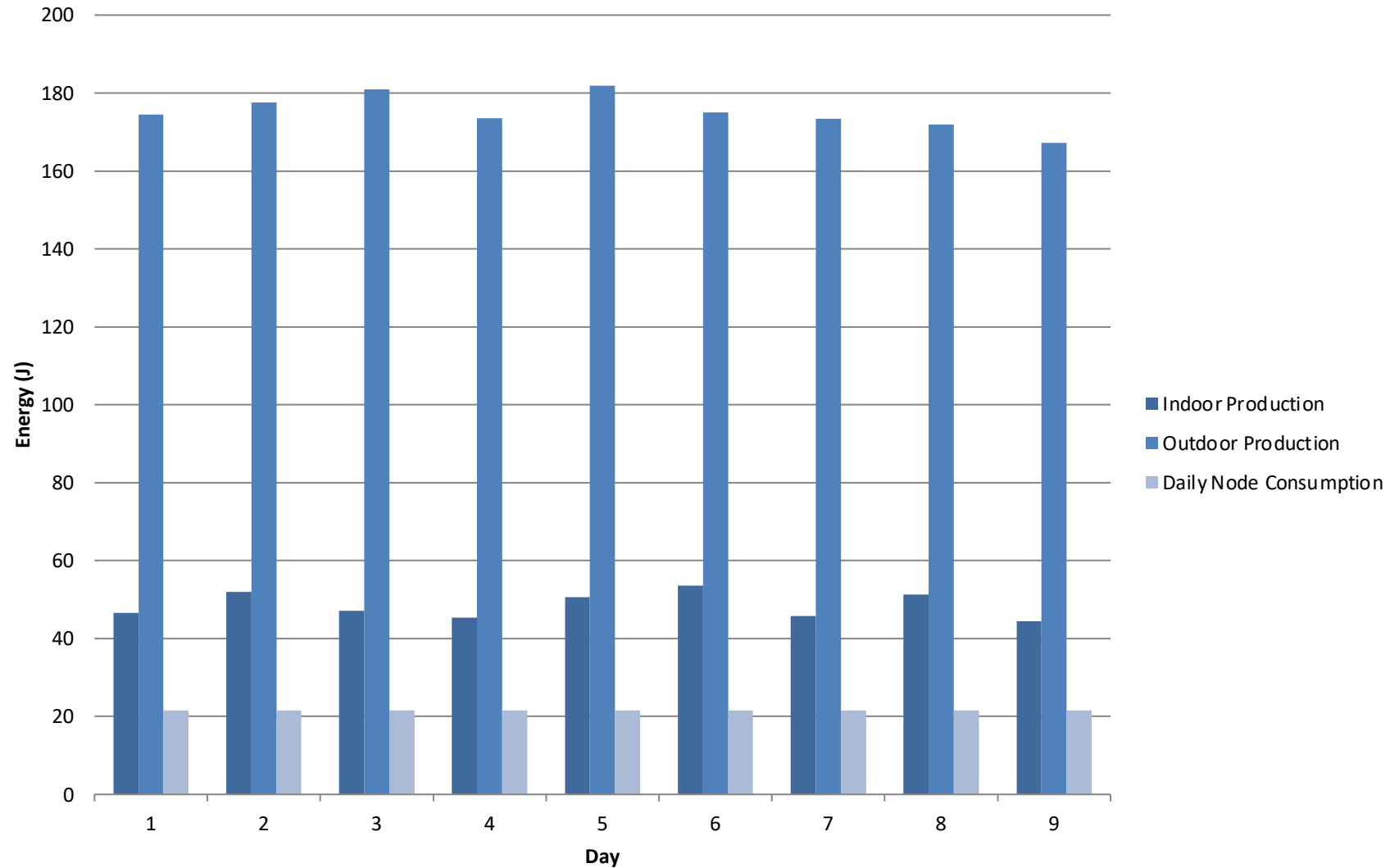
# Conversia Fotovoltaică – Eficiență



# Conversia Fotovoltaică – Profil Putere Produsă



# Independența Energetică?

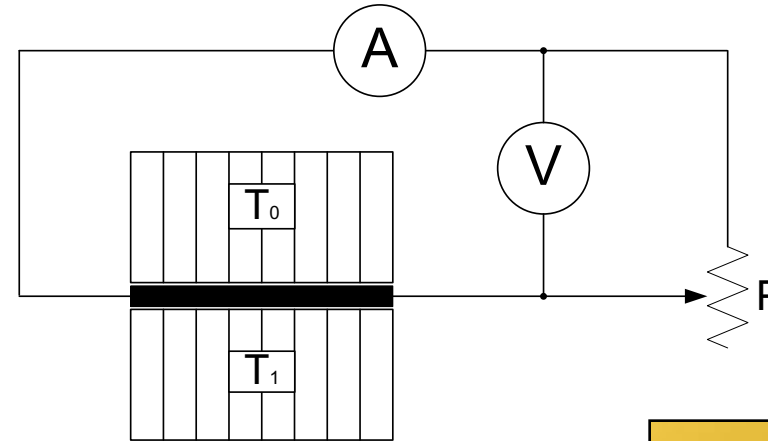




- Obiectele care au un gradient de temperatură pot genera (și) energie electrică
- Efectul Seebeck – generarea de electricitate din diferența de temperatură
  - Ceasul ATMOS
  - Seiko Thermic

# 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 ( $>30^{\circ}\text{C}$ )

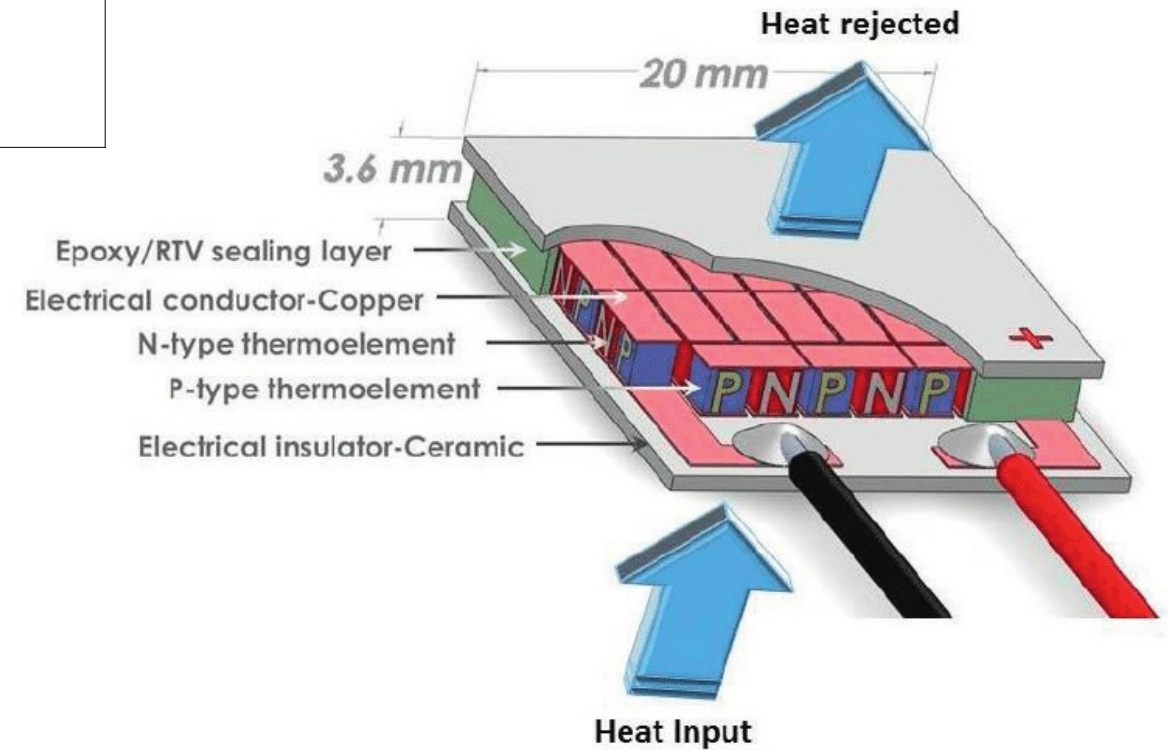
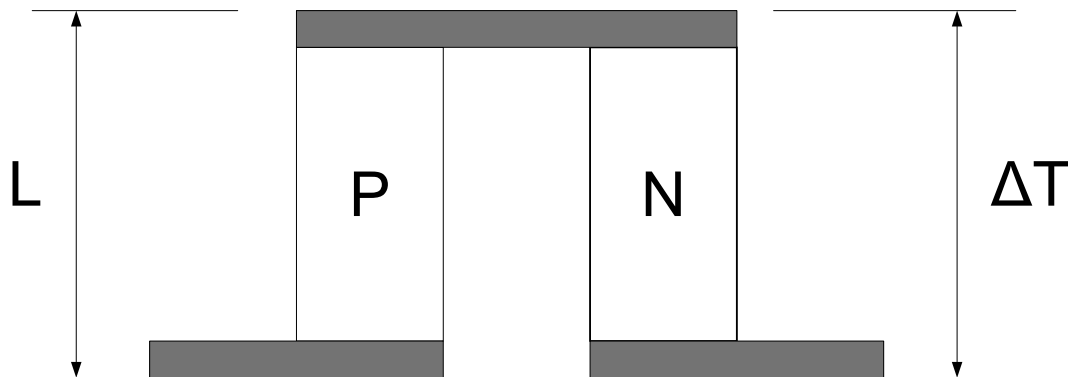
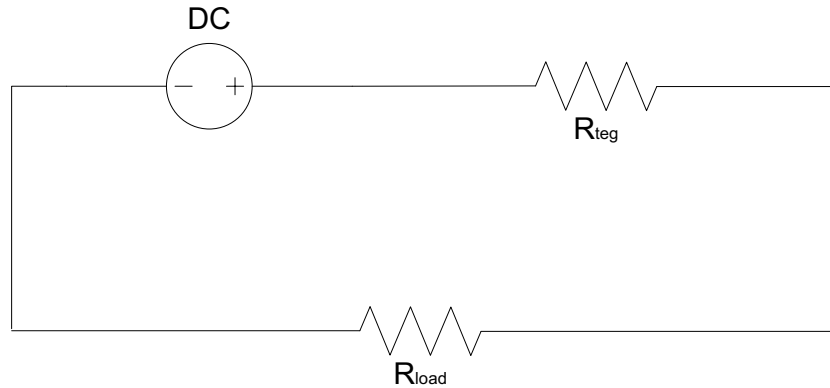


# Generatorul Termoelectric

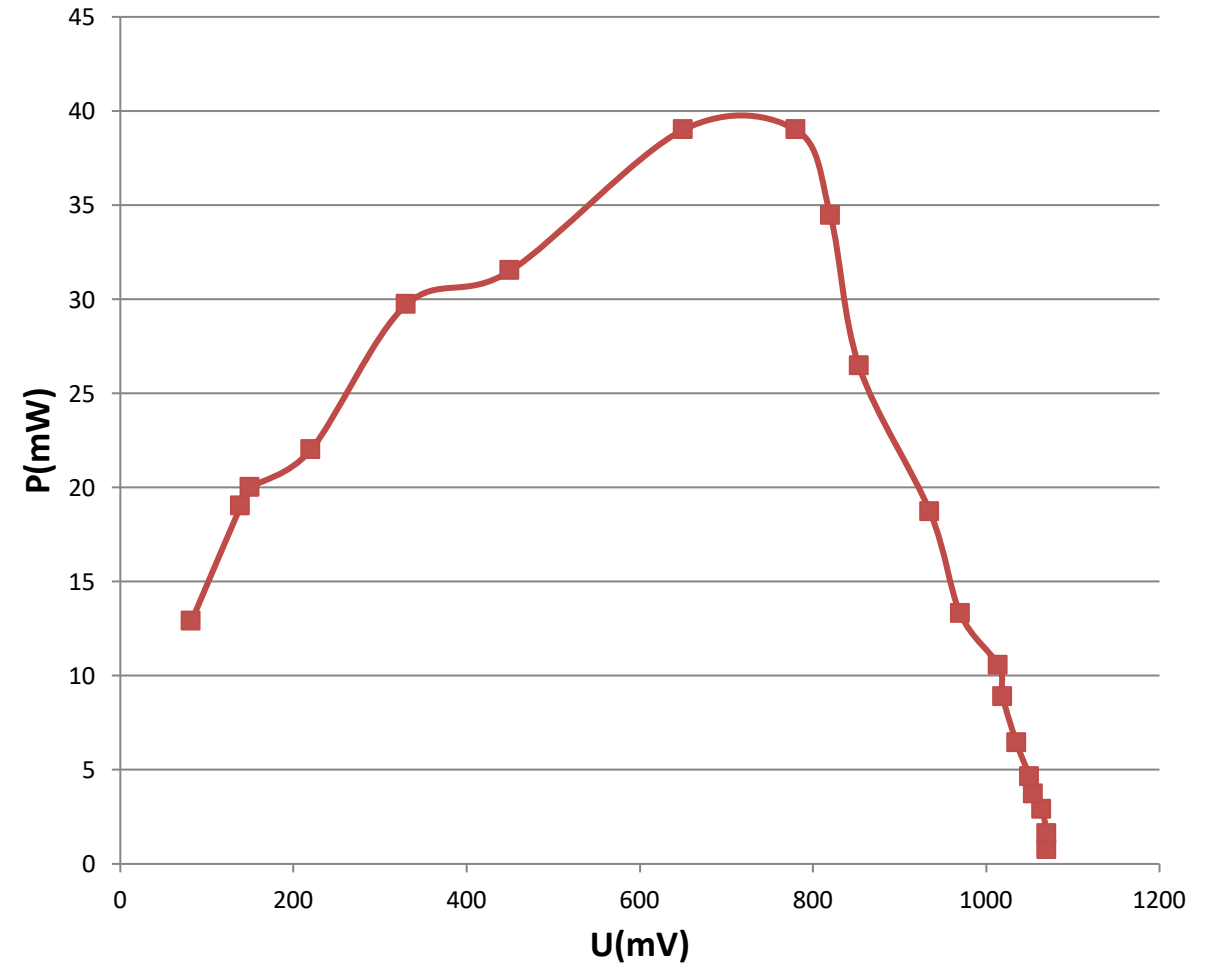
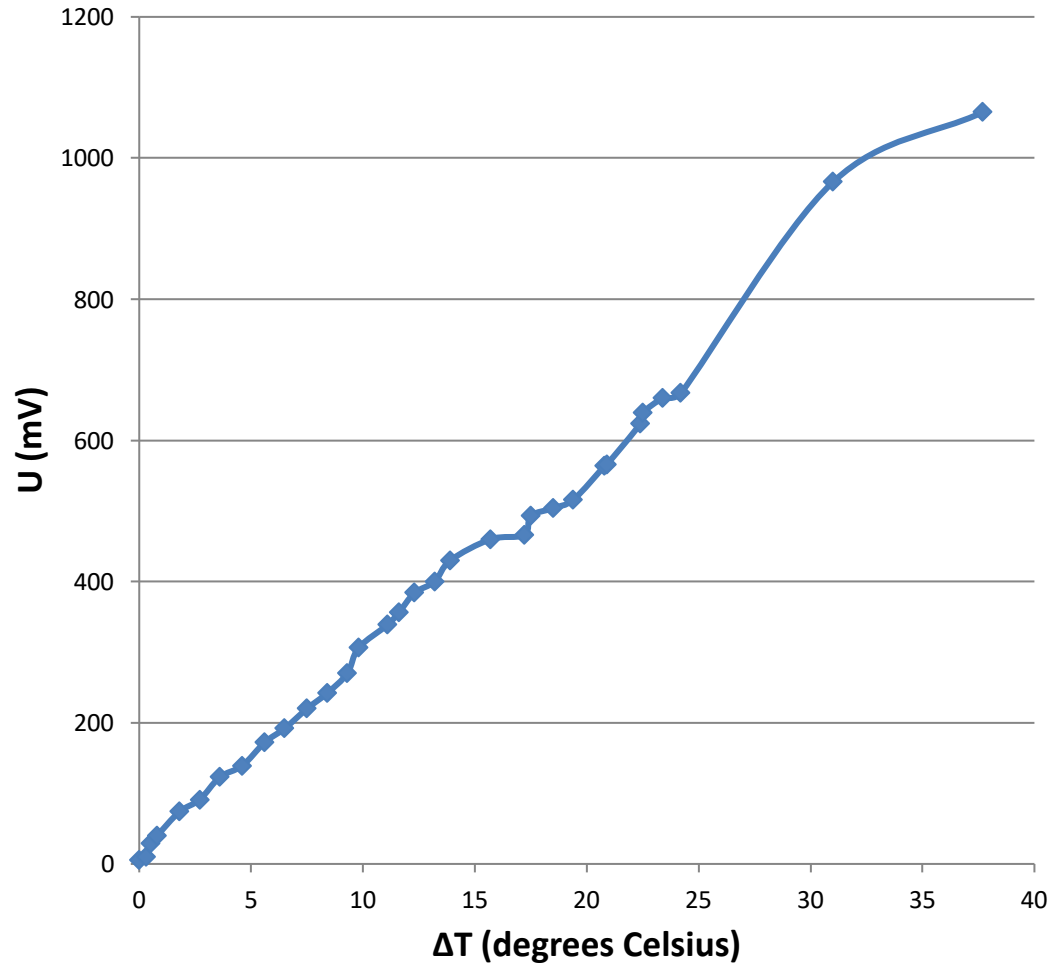
$$V = \alpha \Delta T$$

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

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

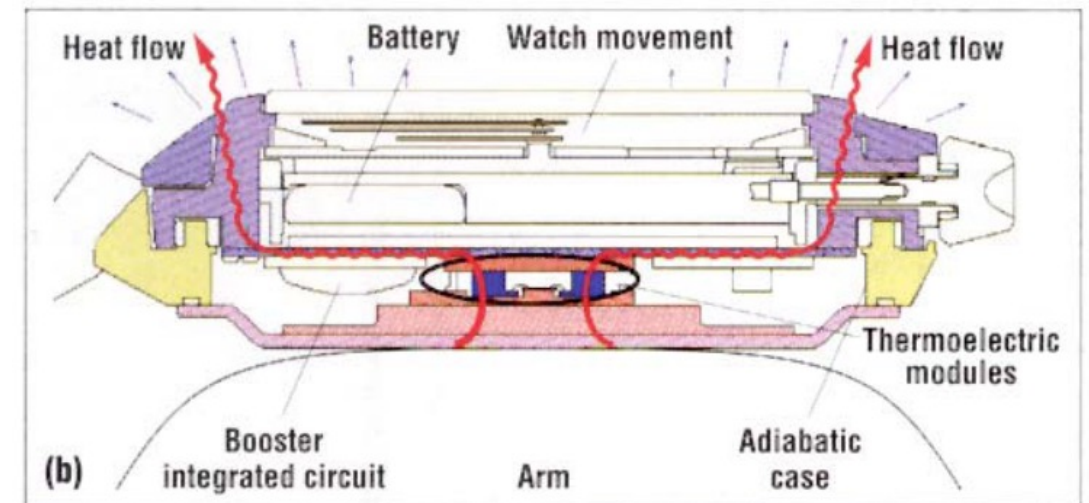
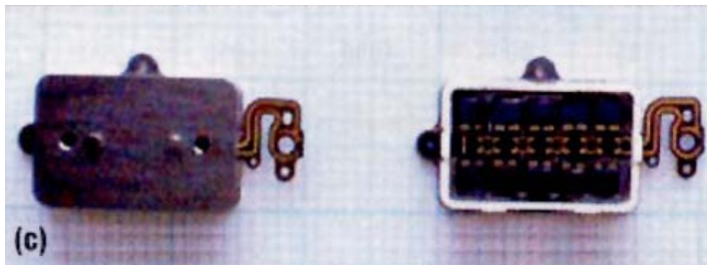


# Generatorul Termoelectric



# Seiko Thermic

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





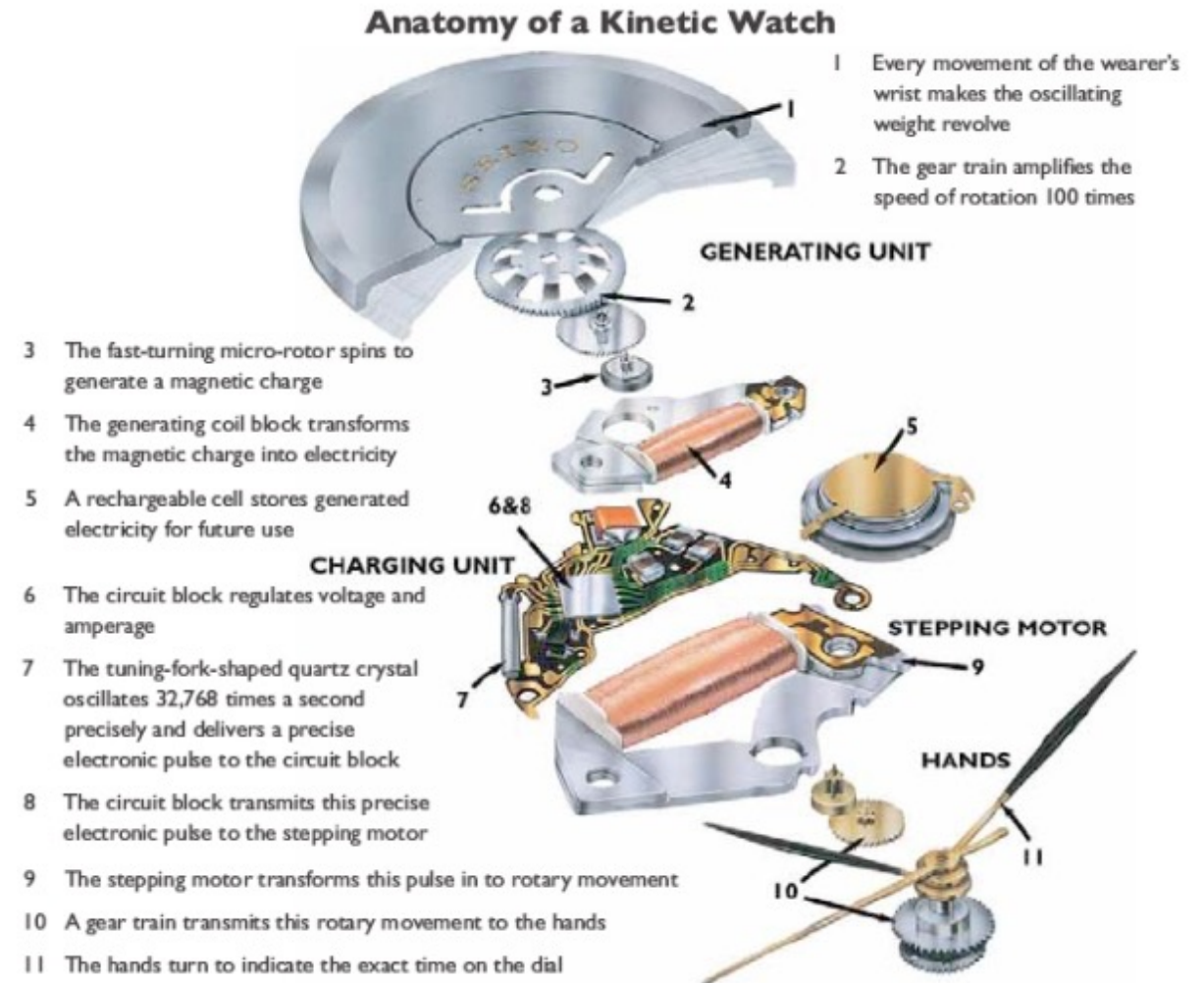
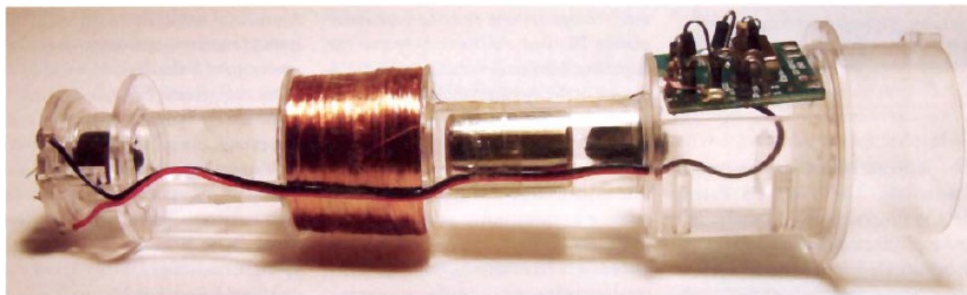
# Powerwatch



[www.powerwatch.com](http://www.powerwatch.com)

# Recoltarea din Vibrații

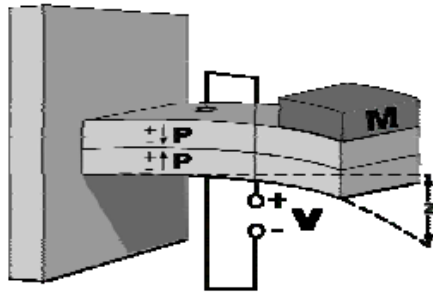
- Ceas cu generator cinetic
  - Rotorul poate atinge 100.000rpm
  - 15.000rpm -> 6mA @ 1.6V
- Generator bazat pe inducție pentru lanternă (200mW)



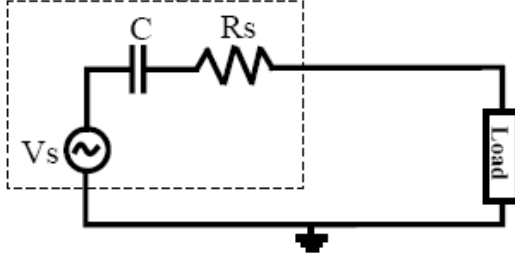


- Piezoelectric

Aplicarea de presiune asupra materialului produce acumularea de sarcină.

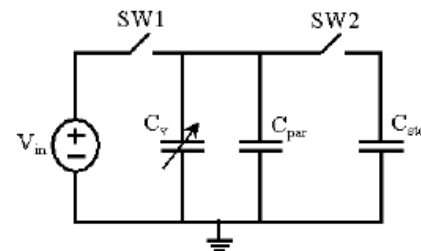
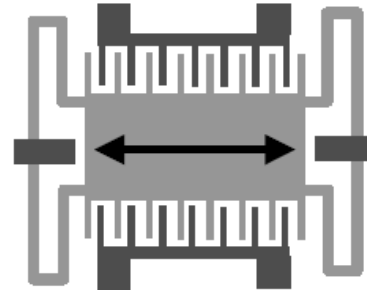


Piezoelectric generator



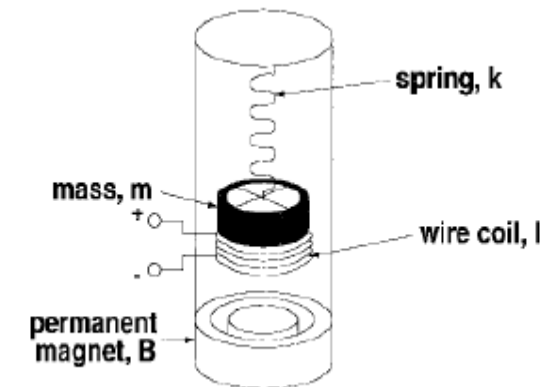
- Capacitiv

Modificarea capacității produce modificarea tensiunii în circuit



- Inductiv

Mișcarea unei bobine în câmp magnetic generează tensiune

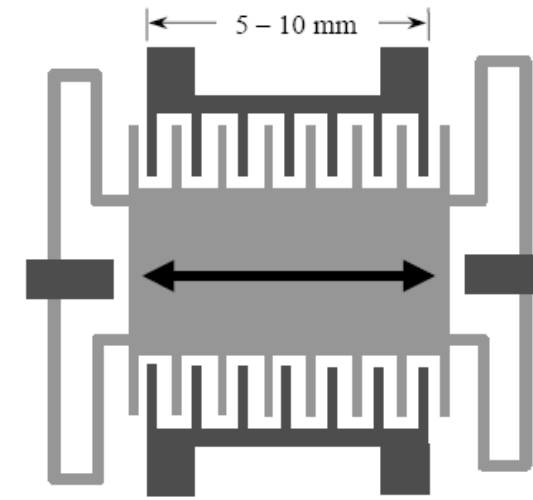
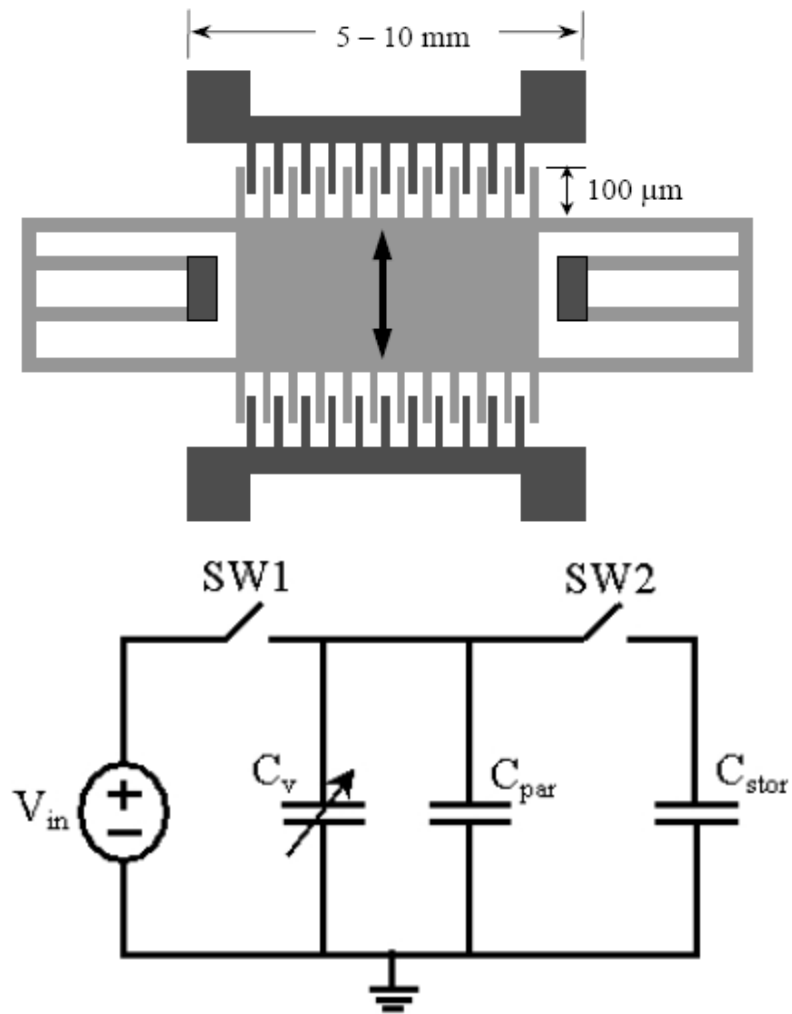


$$C = \frac{\varepsilon_o A}{d} \quad V = \frac{Q}{C} \quad E = \frac{1}{2} QV$$

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

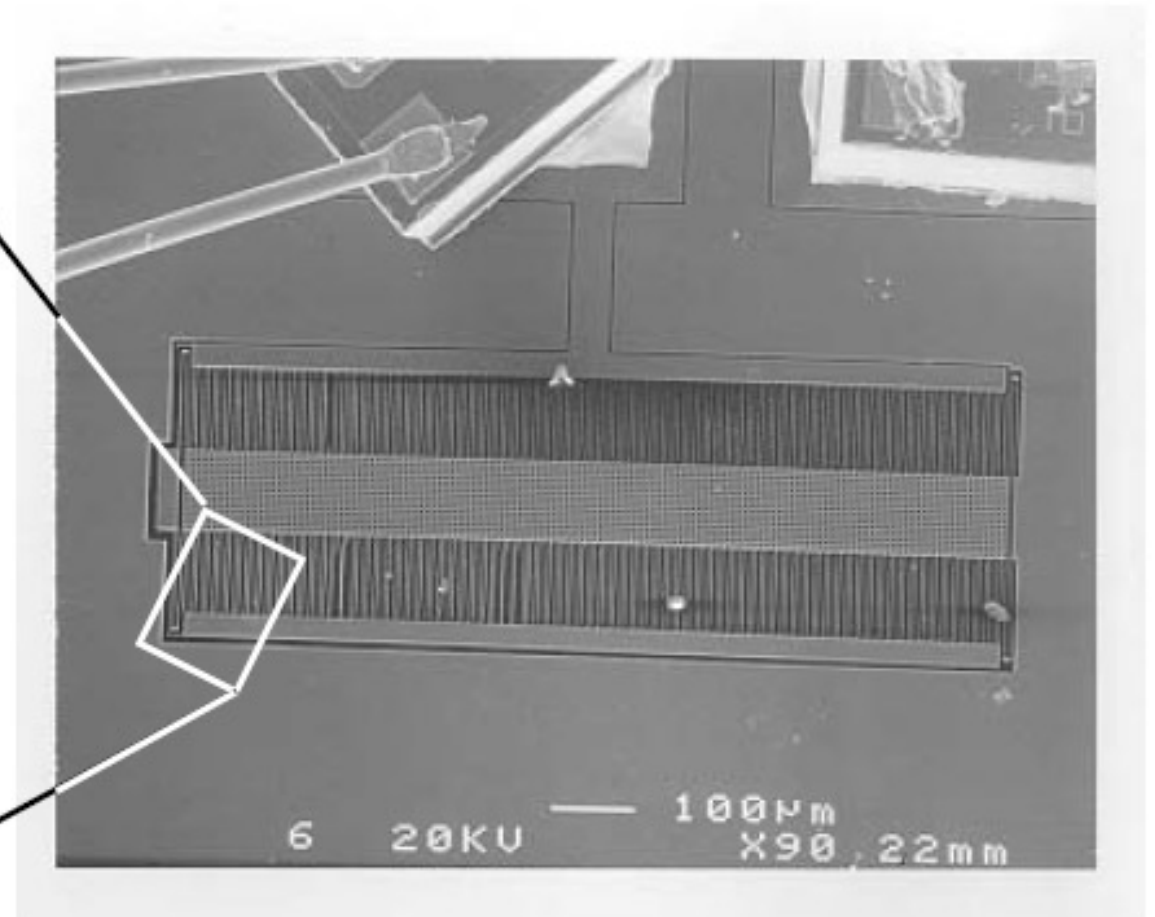
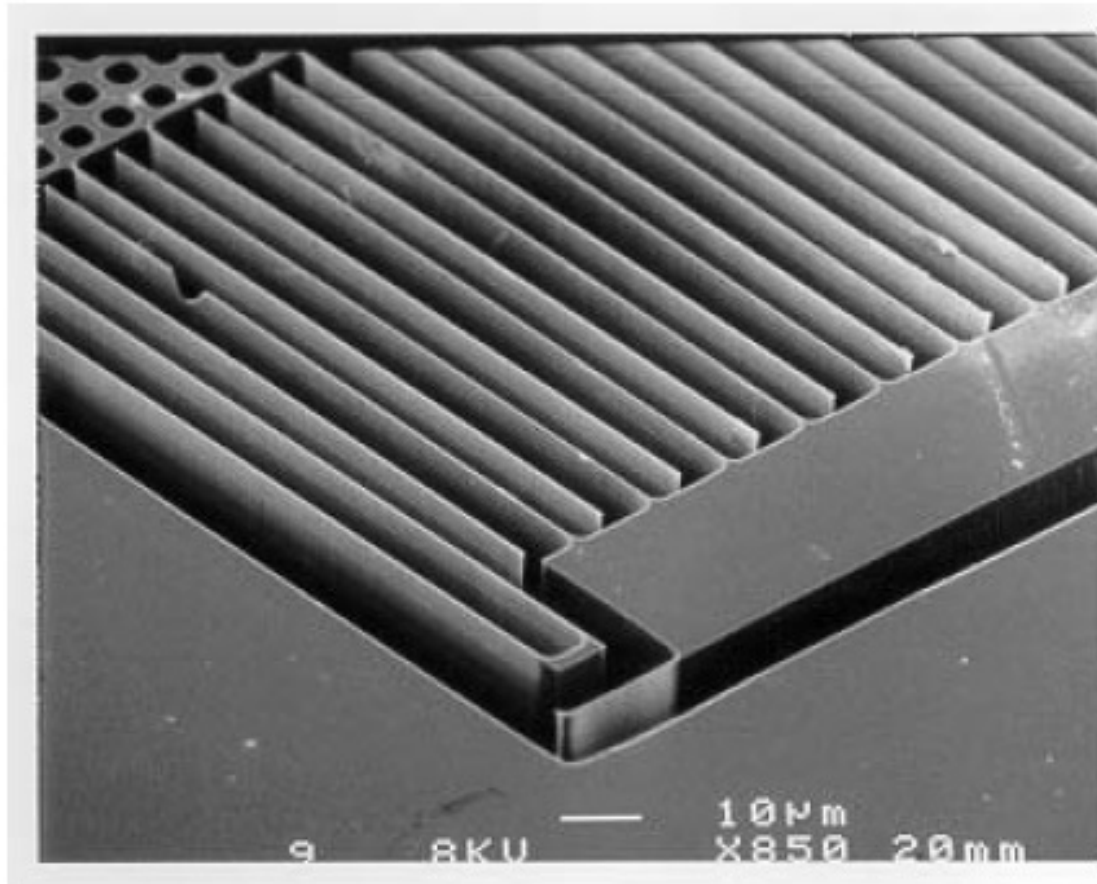
$$\frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{C_{\max} + C_{par}}{C_{\min} + C_{par}}$$

# Tipuri de convertoare capacitive

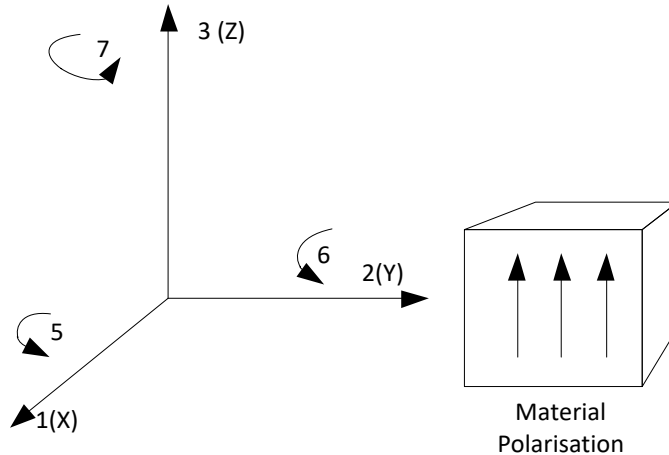


$$E = \frac{1}{2} V_{in}^2 (C_{\max} - C_{\min}) \left( \frac{C_{\max} + C_{par}}{C_{\min} + C_{par}} \right)$$

# Convertor Capacitiv - Berkeley

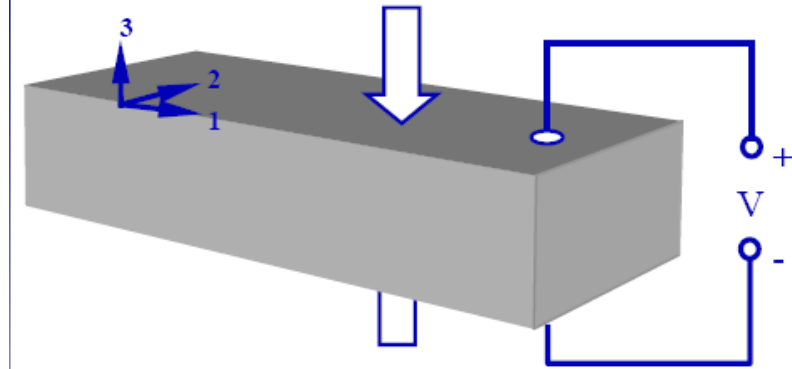


# Conversia piezoelectrică

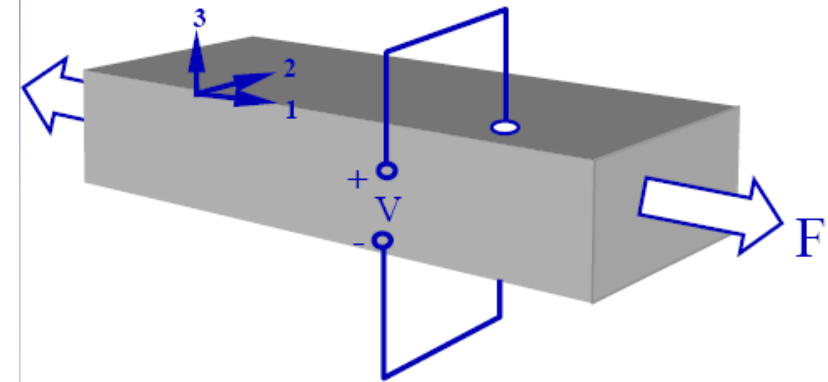


- Grindă elastică de material piezoelectric cu o greutate atașată la capătul mobil.
- Vibrează cu o anumită frecvență
- Energie maximă -> frecvența de rezonanță

## 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

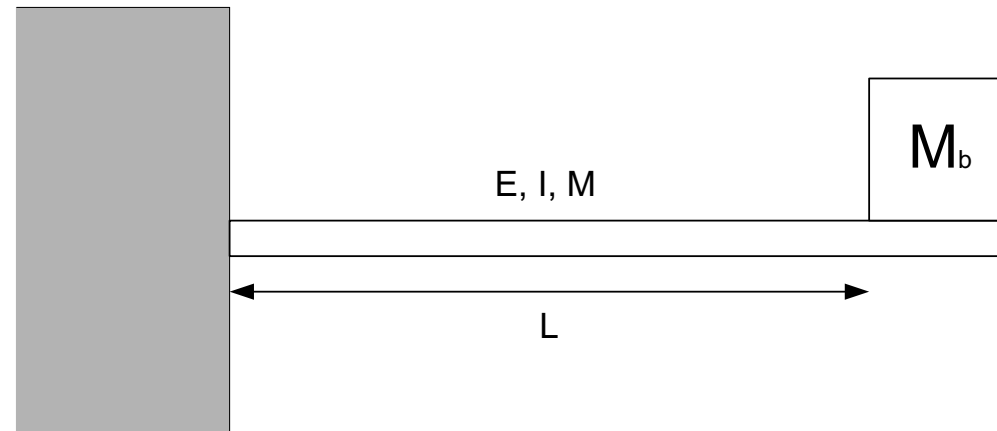
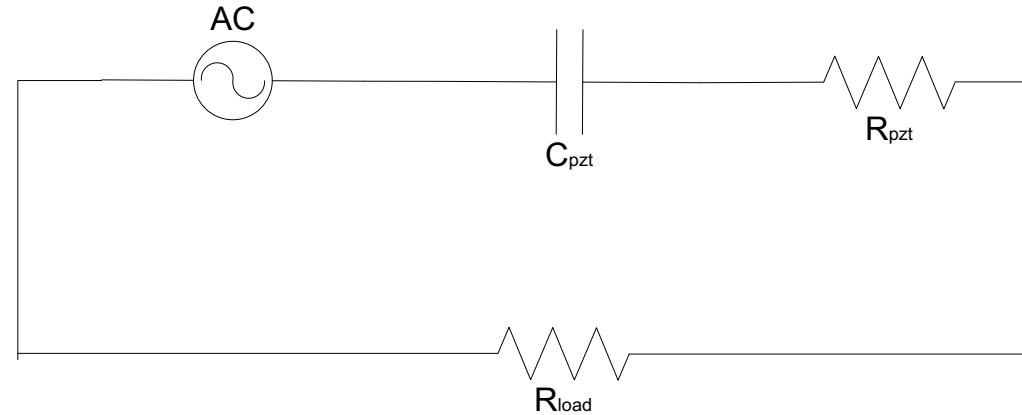
$S$  – strain

$s$  - resistance to deformation (compliance)

$\epsilon$  - dielectric constant

$Y$  – Young Modulus

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

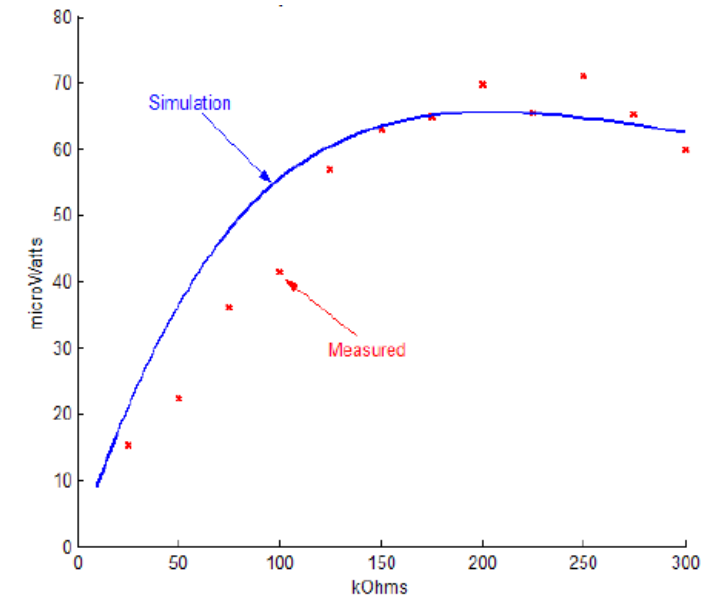
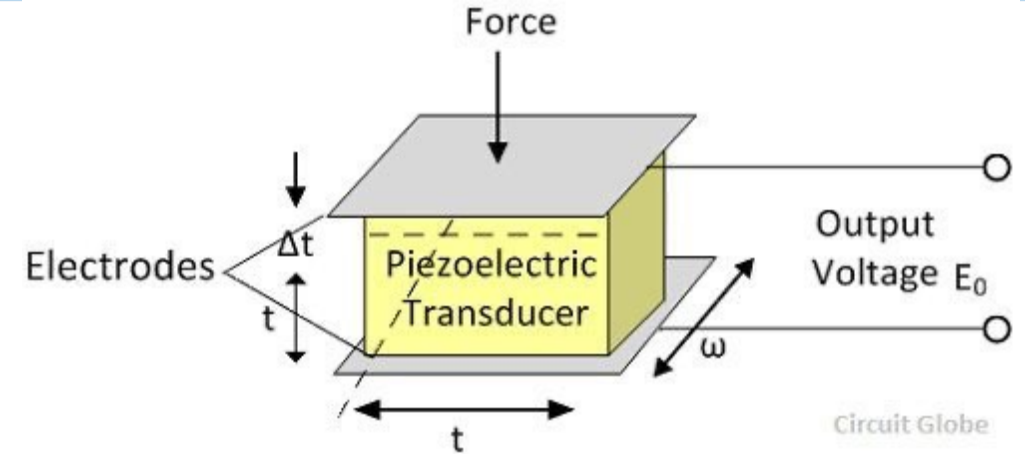




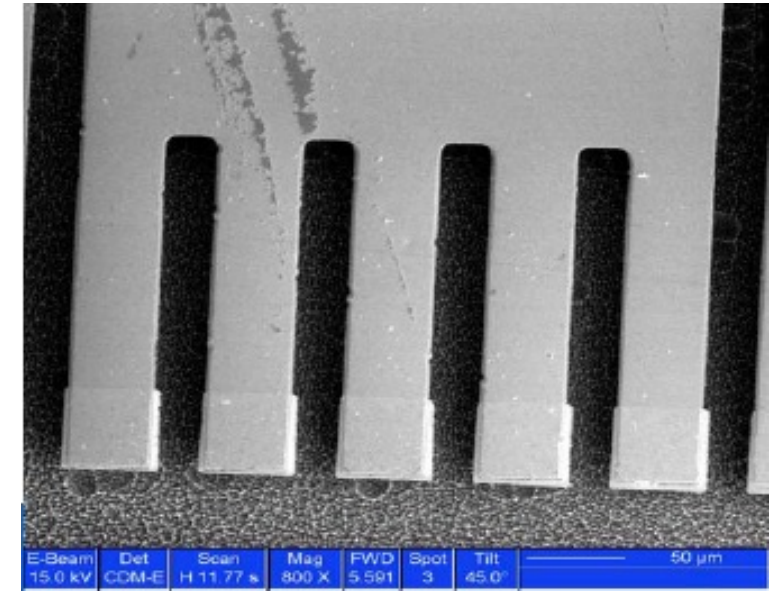
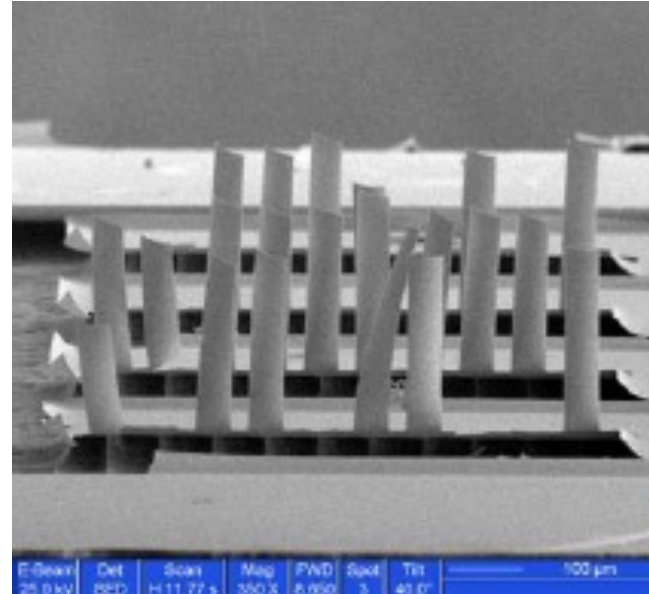
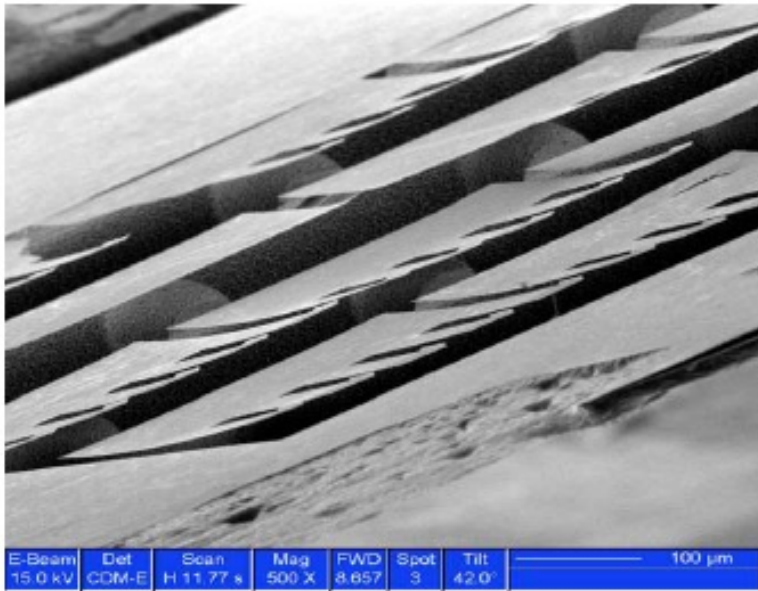
# Conversia piezoelectrică

$$P = \frac{1}{2} V_{open} \frac{1}{2} I_{sc} = \frac{1}{4} \left( \frac{td}{\epsilon S} S \right) (f d A S Y) = \frac{f V k}{s} S^2$$

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



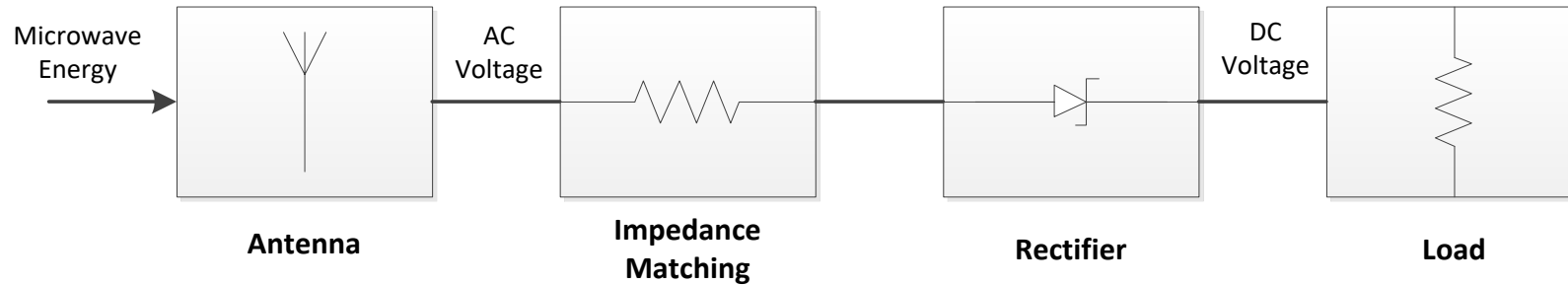
# Exemplu: Cantilevered Nano-Piezo Generators



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

- Frecvența de rezonanță 250-2500Hz
- Densitate de energie de 200mW/cm<sup>3</sup>

# RF Harvesting



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



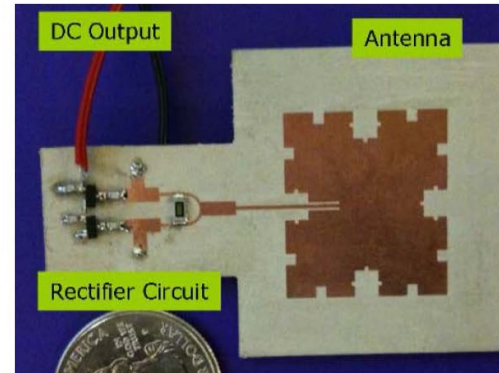
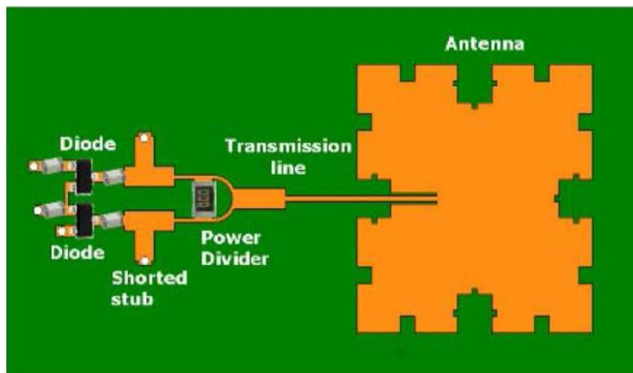
Intentional



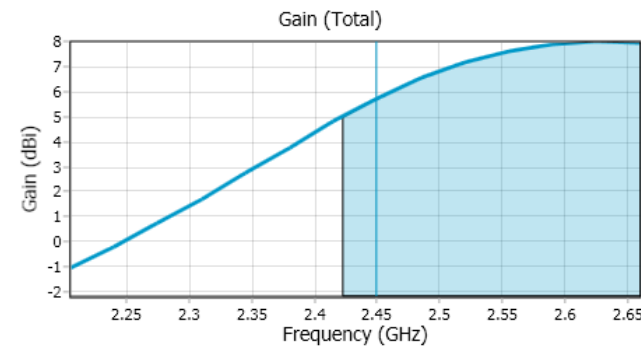
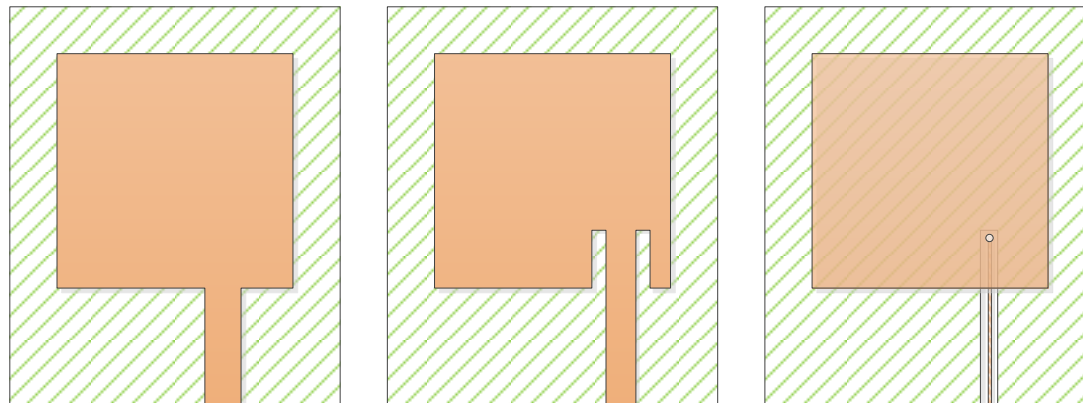
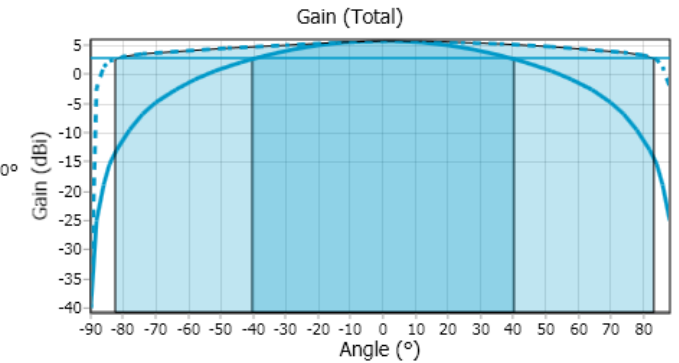
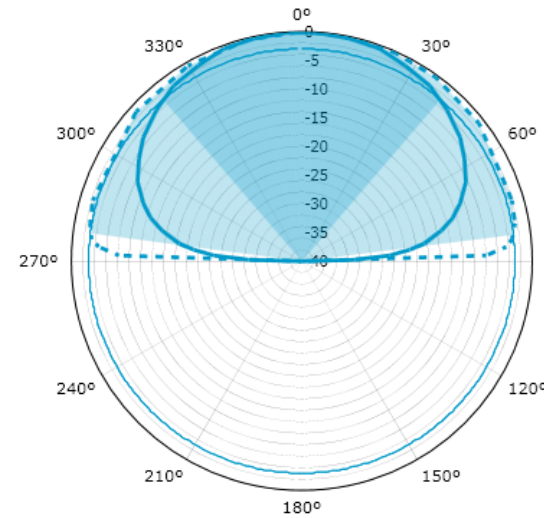
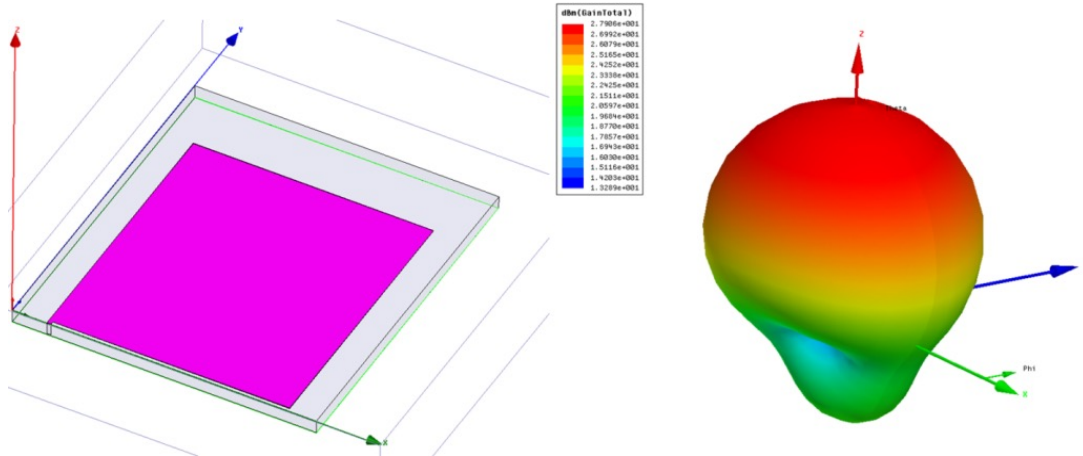
Anticipated



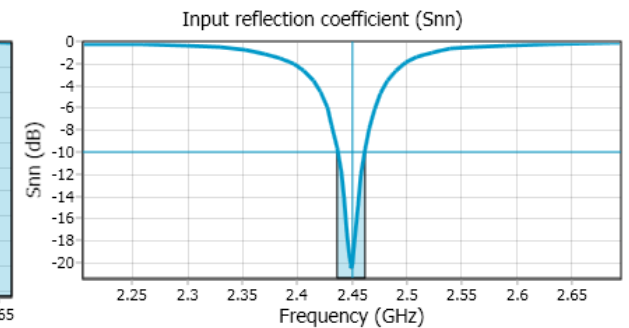
Unknown



# 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         |



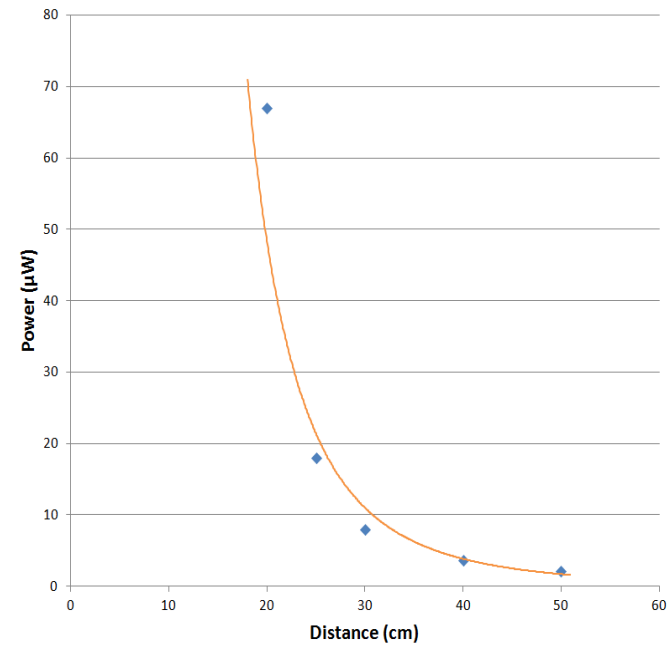
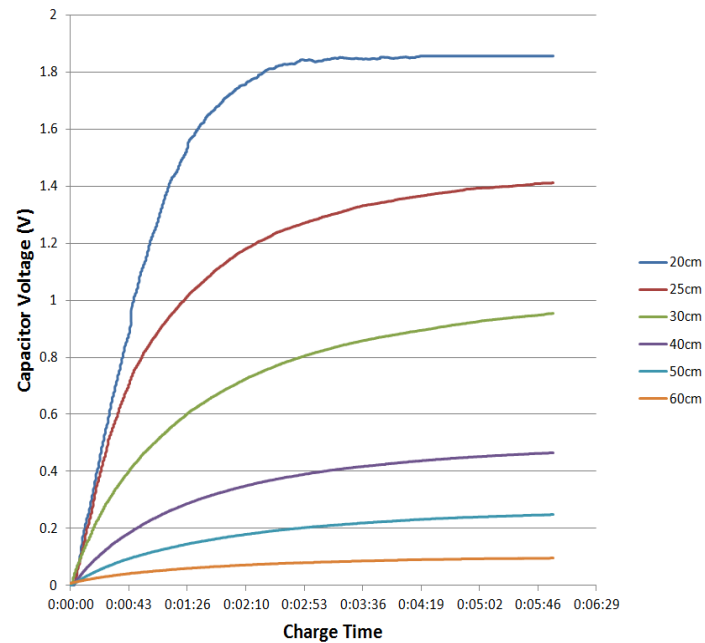
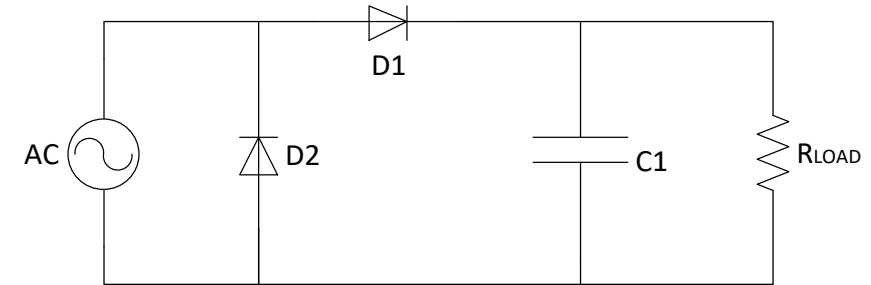
|                                 |                       |
|---------------------------------|-----------------------|
| Reference impedance @ port 1    | 50 $\Omega$           |
| Frequency at which S11 = -10 dB | 2.437 GHz             |
| Minimum S11 value               | -20.47 dB @ 2.450 GHz |



# 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

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



- 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

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

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

- Funcții ( $\rho, \sigma_1, \sigma_2$ ):
- $P_s(t) = f(\rho_1, \sigma_1, \sigma_2)$ ;  $P_c(t) = f(\rho_2, \sigma_3, \sigma_4)$
- 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

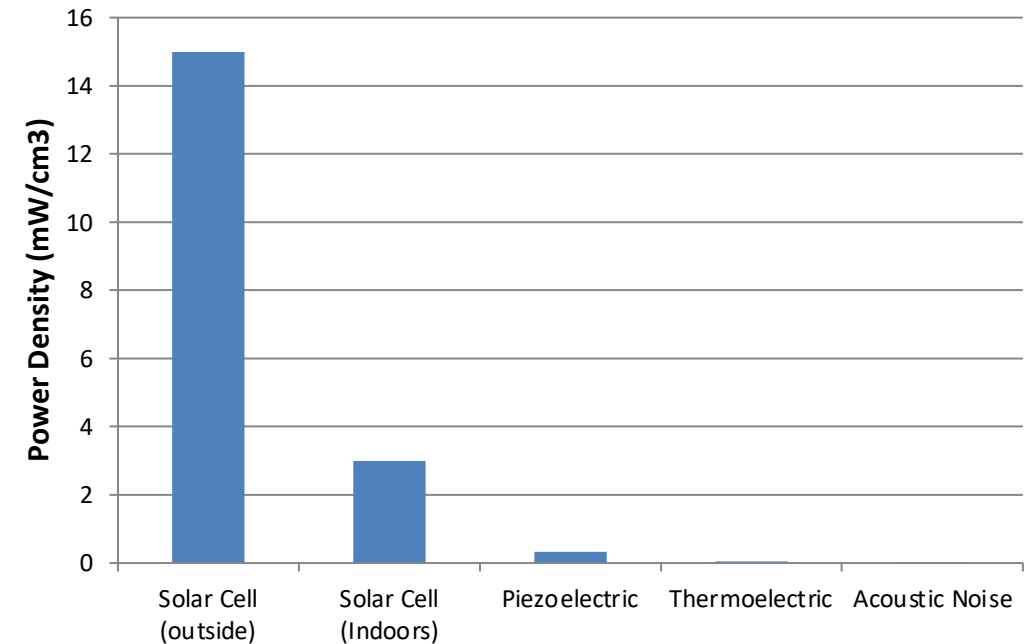
- Fotovoltaic
- Termoelectric
- Piezoelectric

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 <sup>3</sup>  |
| Piezoelectric (shoe inserts)  | 330uW/cm <sup>3</sup> |
| Vibration(microwave oven)     | 116uW/cm <sup>3</sup> |
| Thermoelectric(10°C)          | 40uW/cm <sup>3</sup>  |
| Acoustic noise (100dB)        | 960nW/cm <sup>3</sup> |



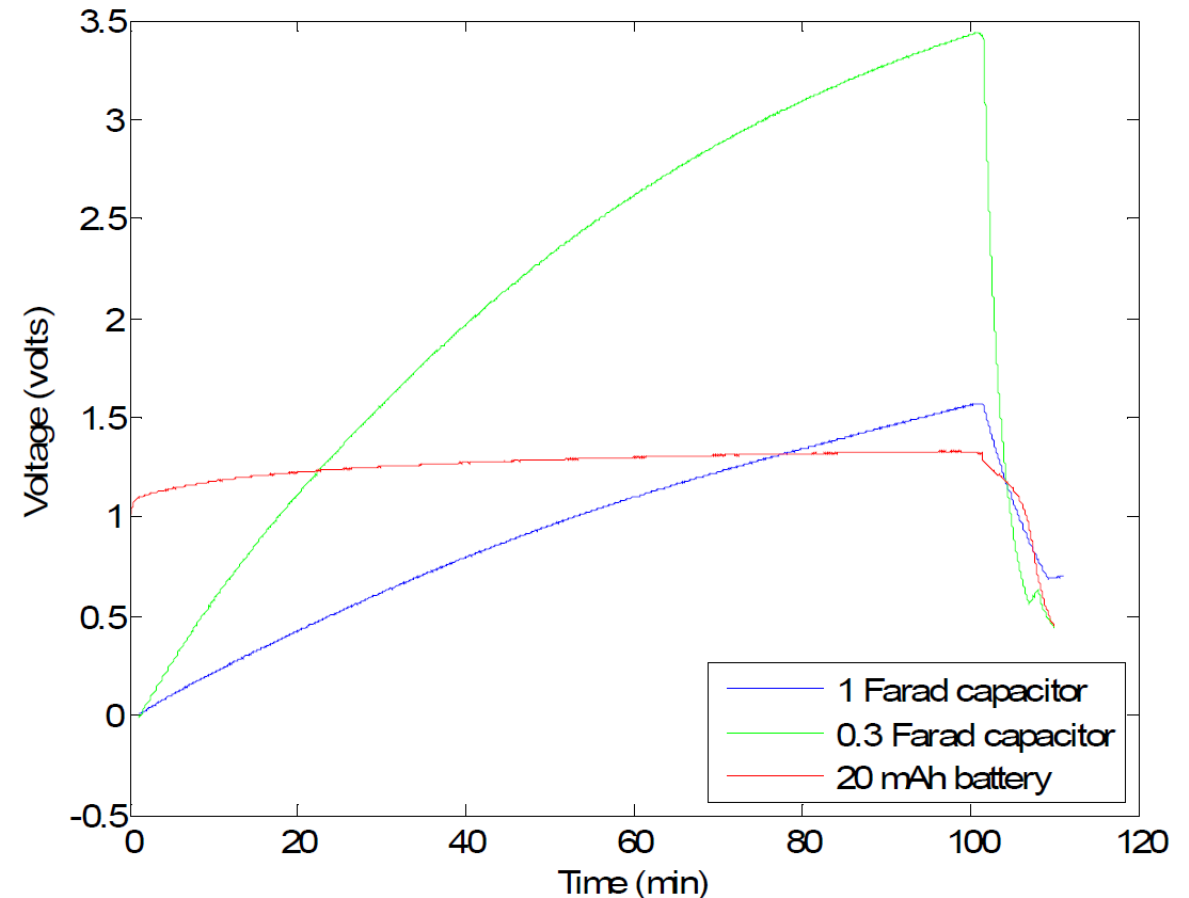
# Medii pentru stocarea energiei

## 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

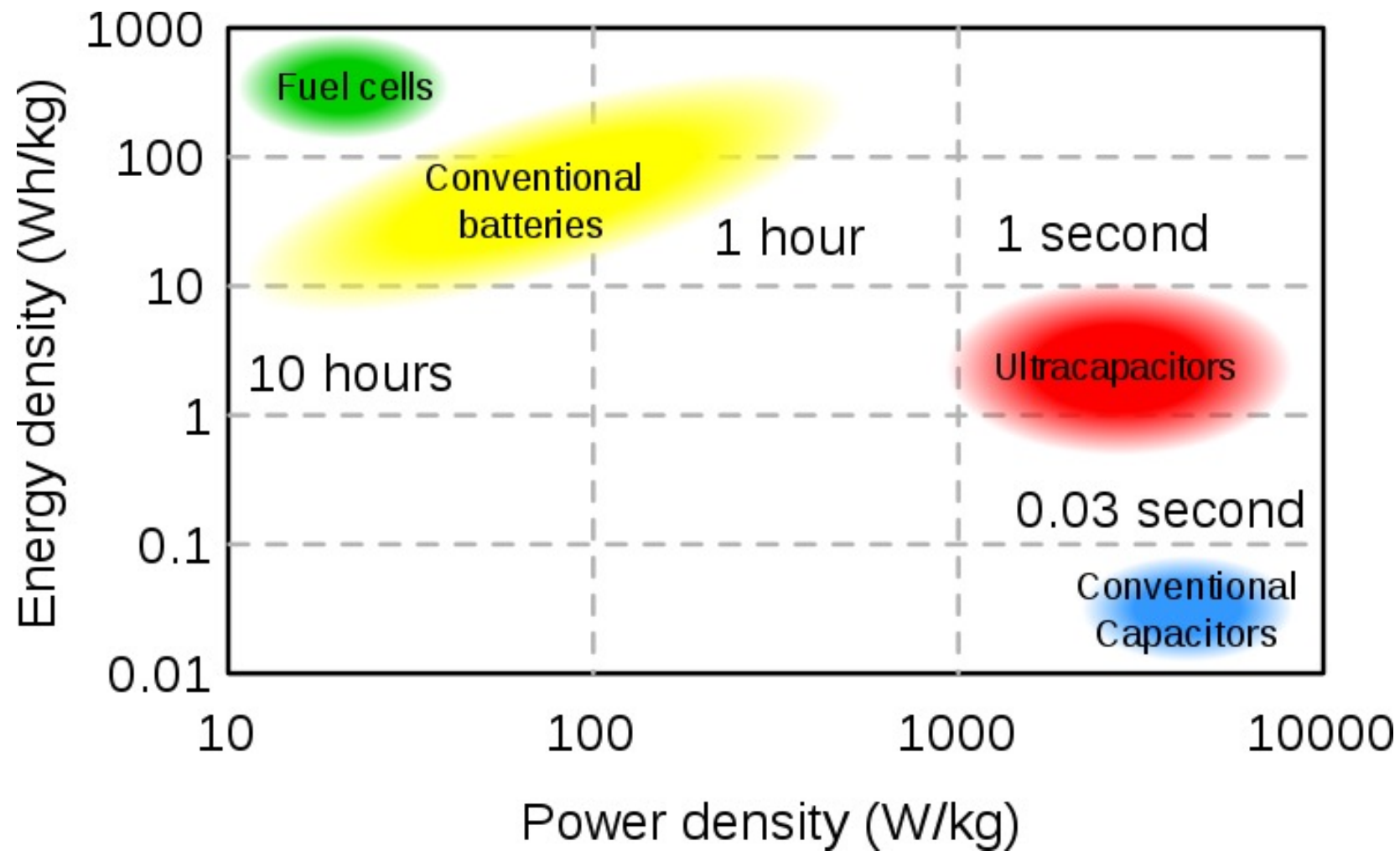
## Supercondensatoare

- 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



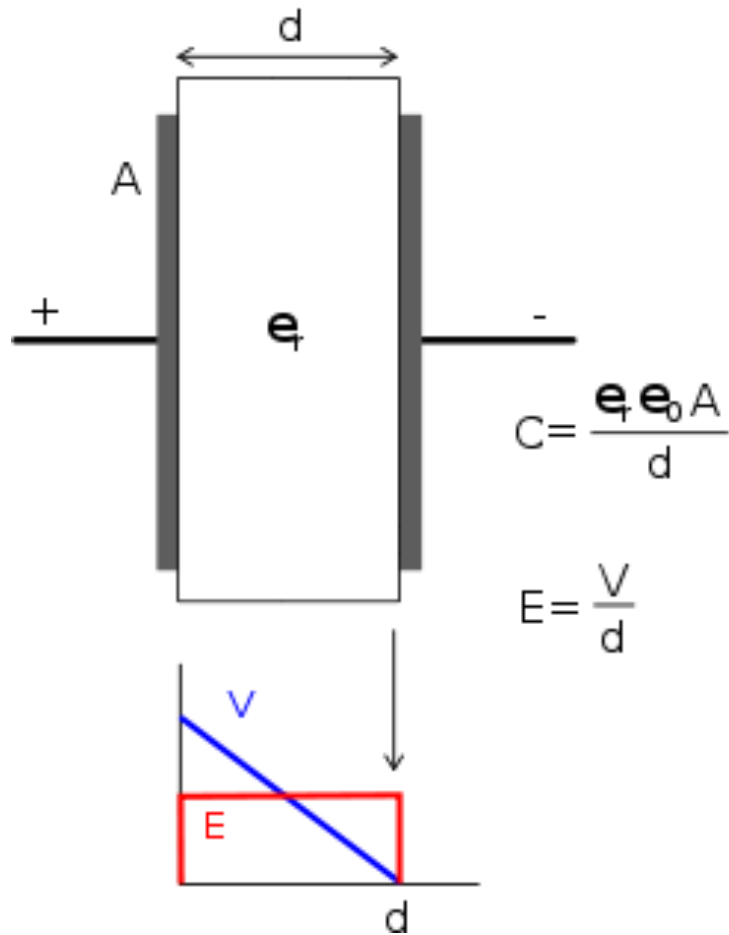
Folosirea celulelor electrochimice nu este optimă  
pentru aplicațiile IoT

# Stocarea energiei

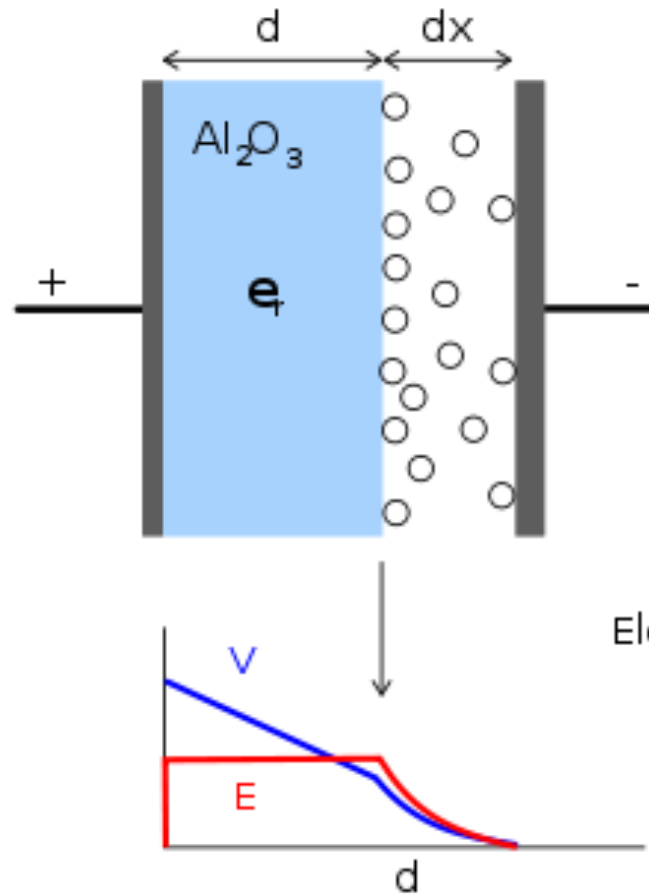


# Condensatoare

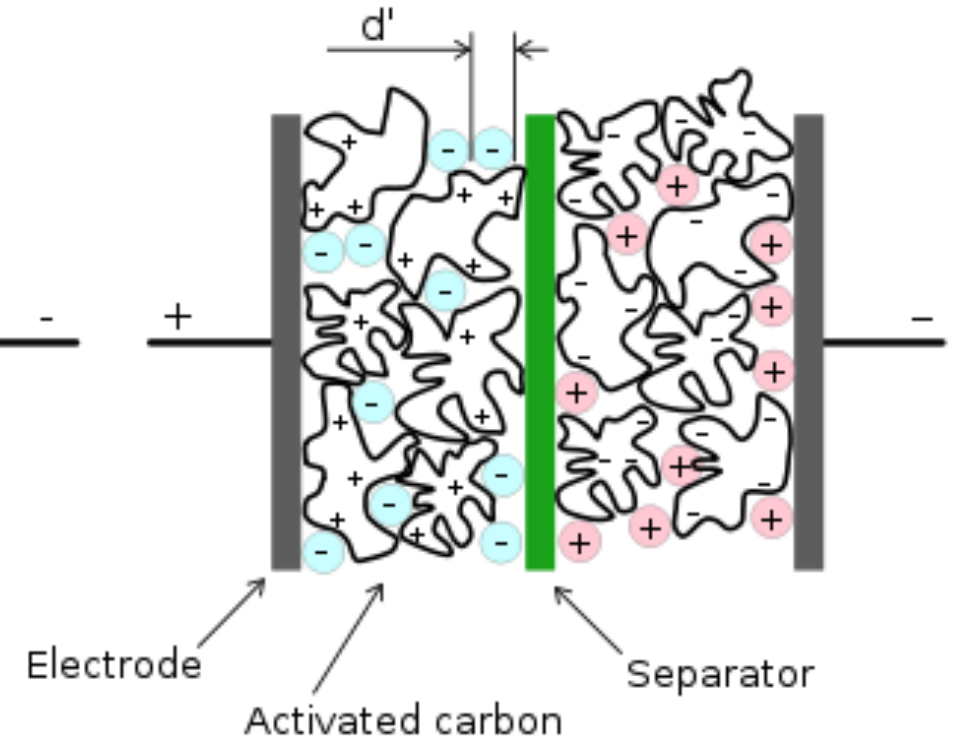
## Electrostatic



## Electrolytic

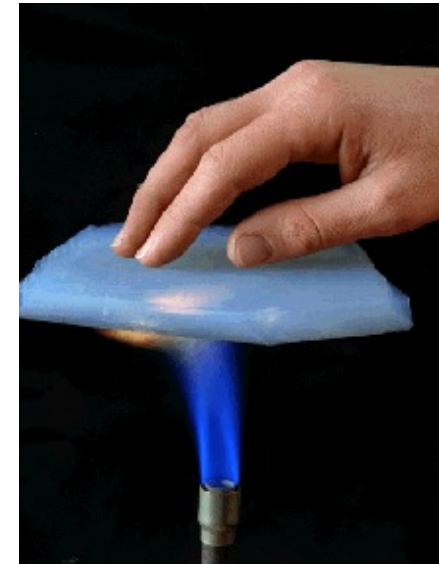
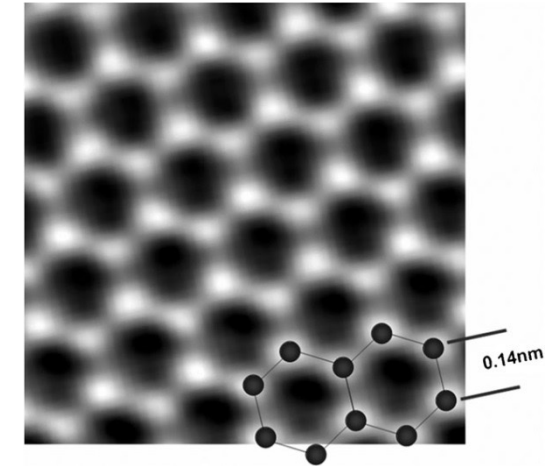
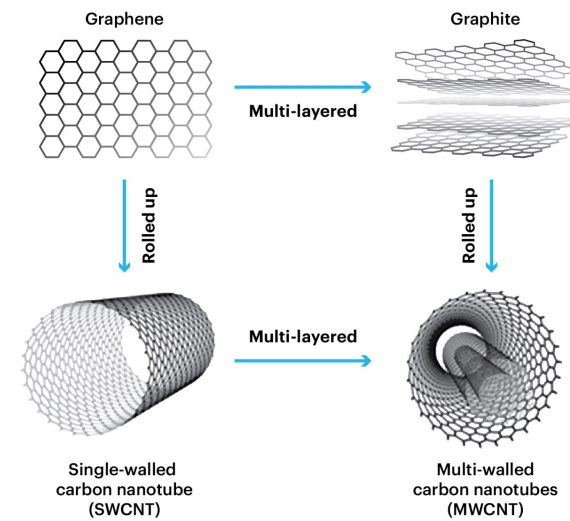


## Electrochemical double-layer

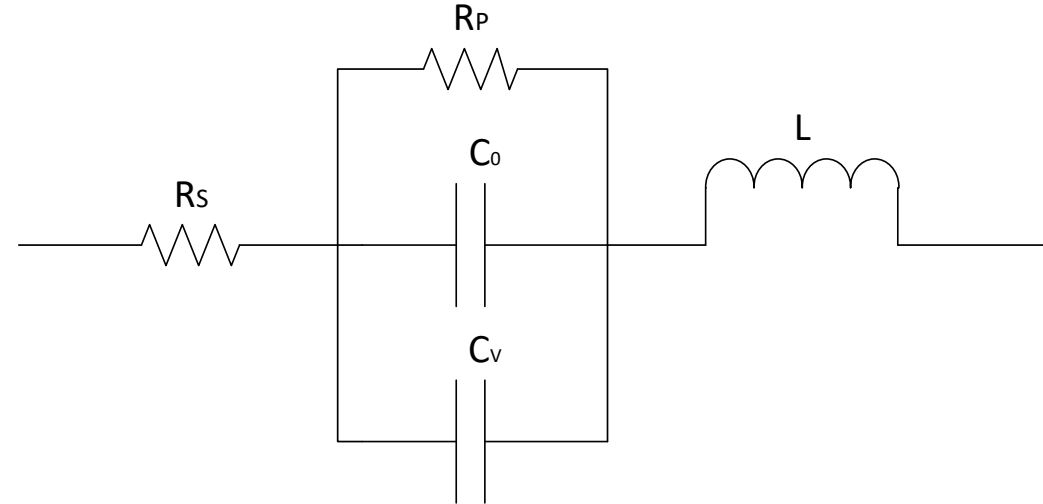




- Dielectric
  - Carbon activat
  - Grafen
  - Nanotuburi
  - Aerogel



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

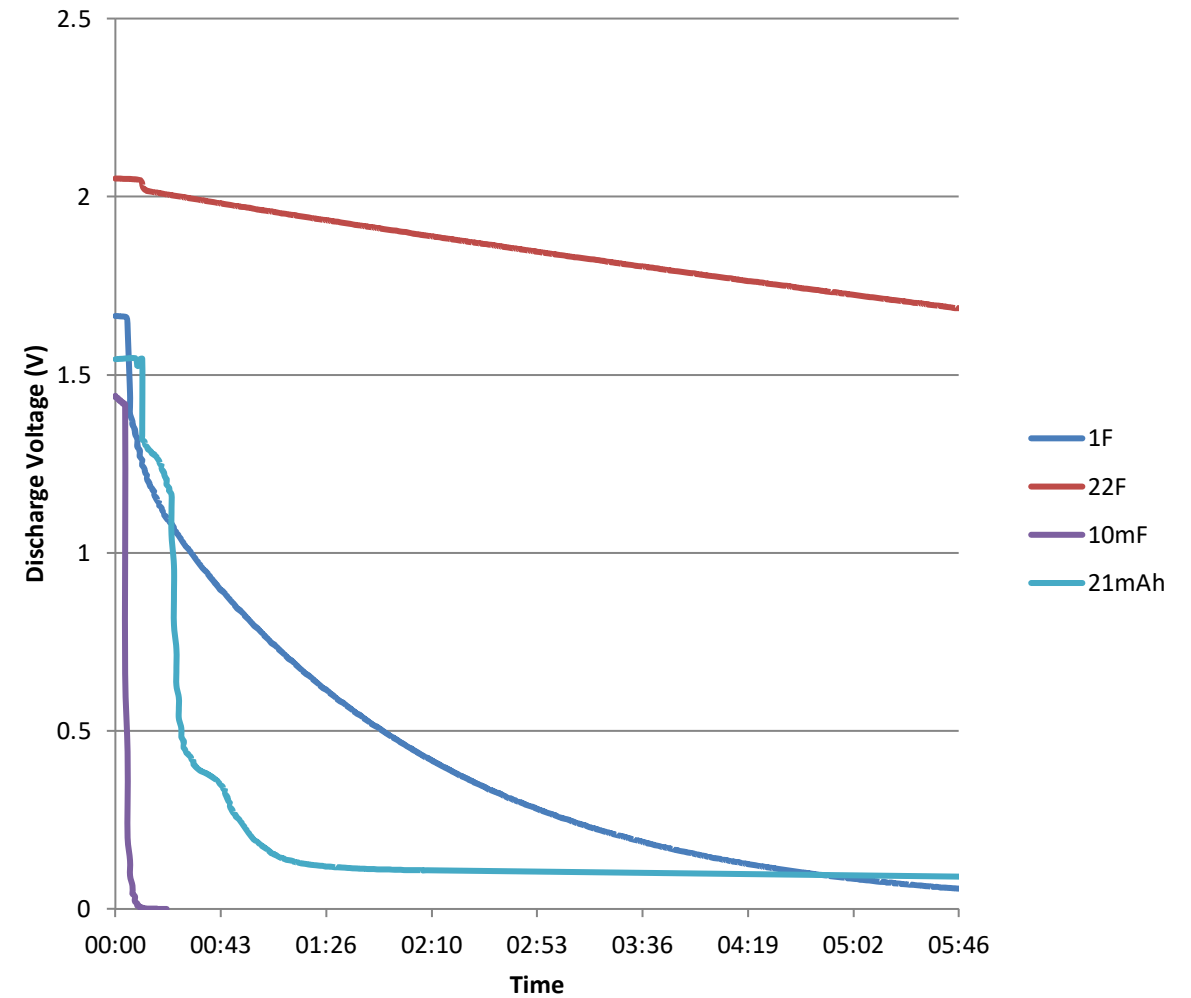
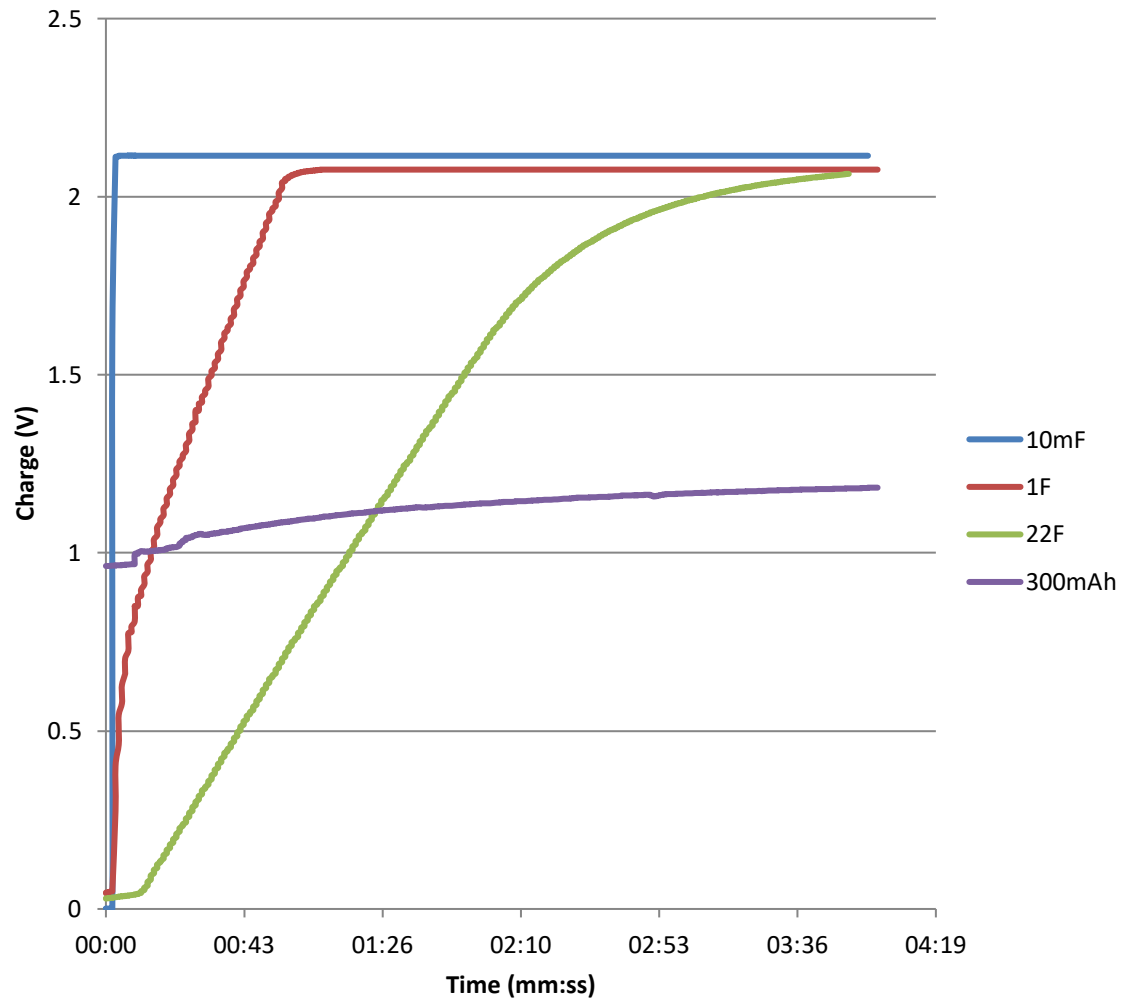


- Capacitate suplimentară ce depinde de tensiunea de alimentare

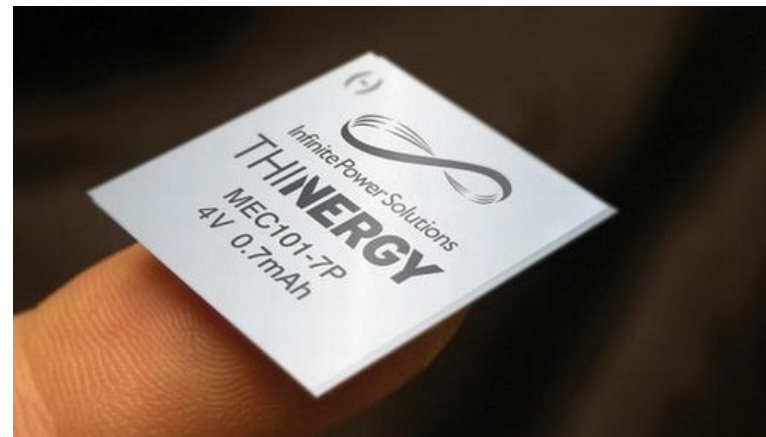
$$i(t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(CV)}{dt} = \frac{d(C_0V + K_VV^2)}{dt} = (C_0 + 2K_VV) \frac{dV}{dt}$$

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

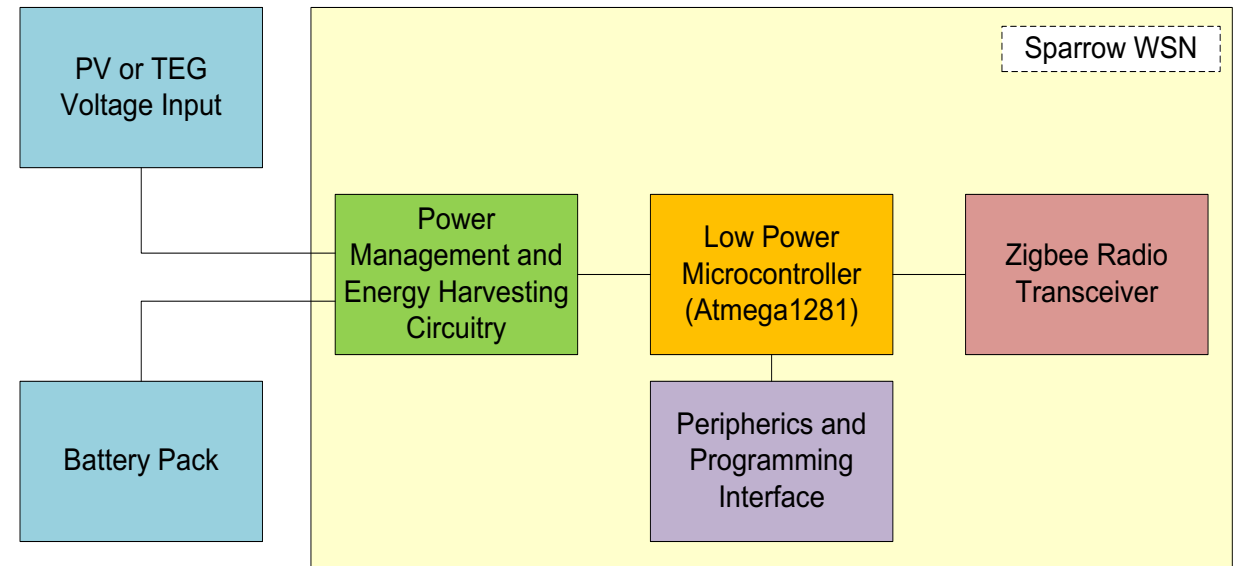
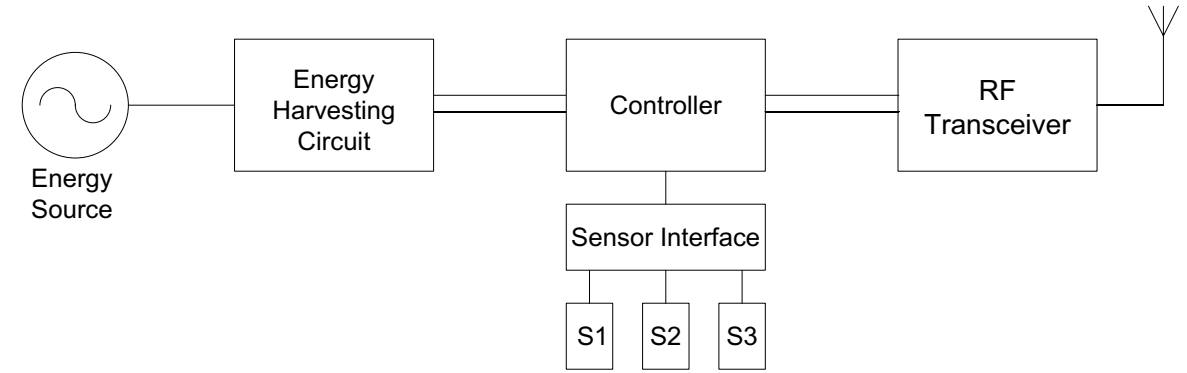
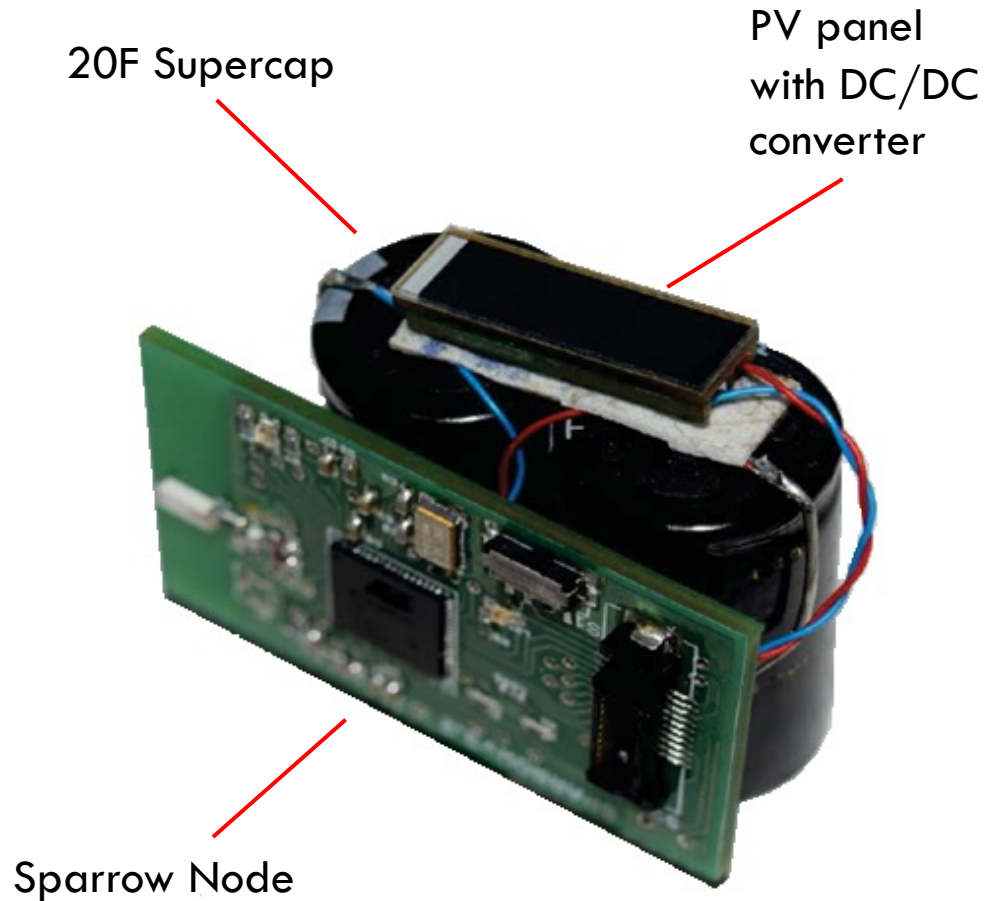
# Supercondensatoare



- 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
- Hibrizi 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

