

# Sisteme Încorporate

## Cursul 3

### Consumul de energie în Embedded

Facultatea de Automatică și Calculatoare  
Universitatea Politehnica București



OHM NEVER FORGOT HIS  
DYING UNCLE'S ADVICE.

<http://xkcd.com/643/>

- Embedded Design -> Constrângeri de resurse
- Constrângerile sunt specificate ca niște cerințe non-funcționale
- Cerinte non-funcționale
  - Preț, Dimensiuni, Greutate -> Puțină memorie
  - Consum baterie/caldură -> Timp/viteză de lucru
  - Deadline -> Timp minim de dezvoltare garantat

# De ce ne-ar preocupa consumul?



Durata de viață a bateriei

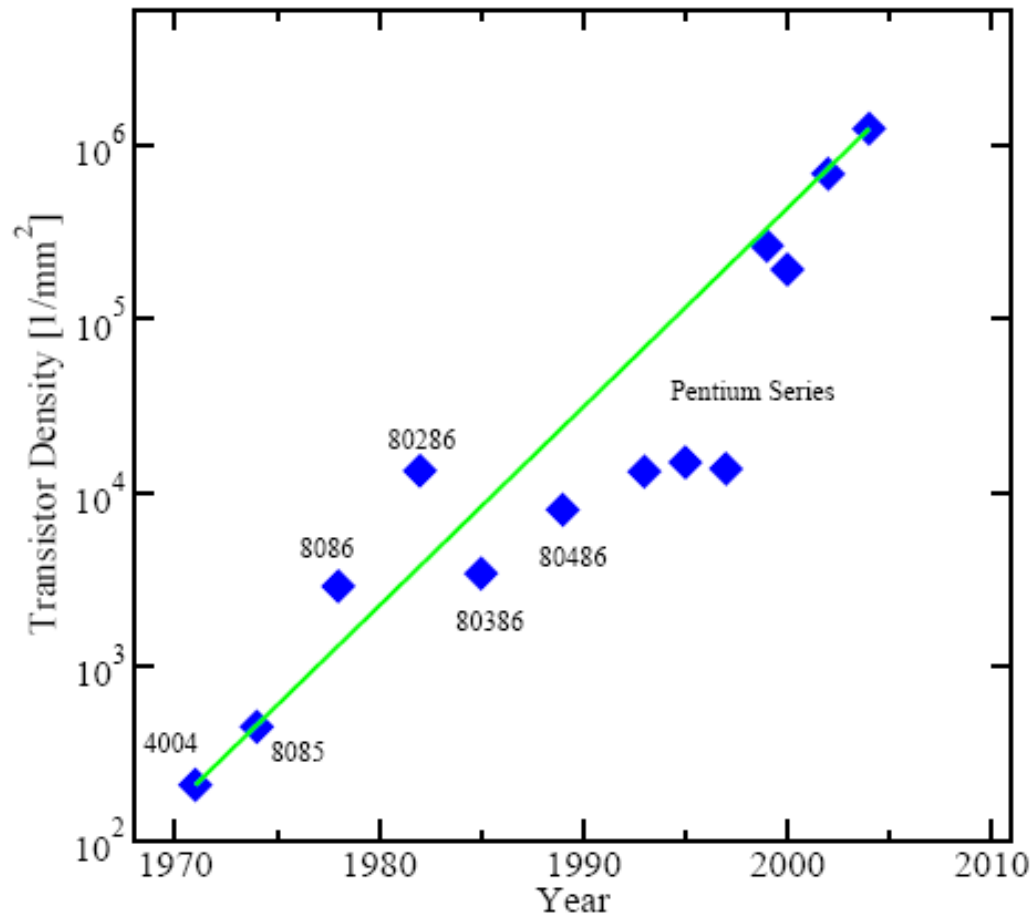


Mediul înconjurător

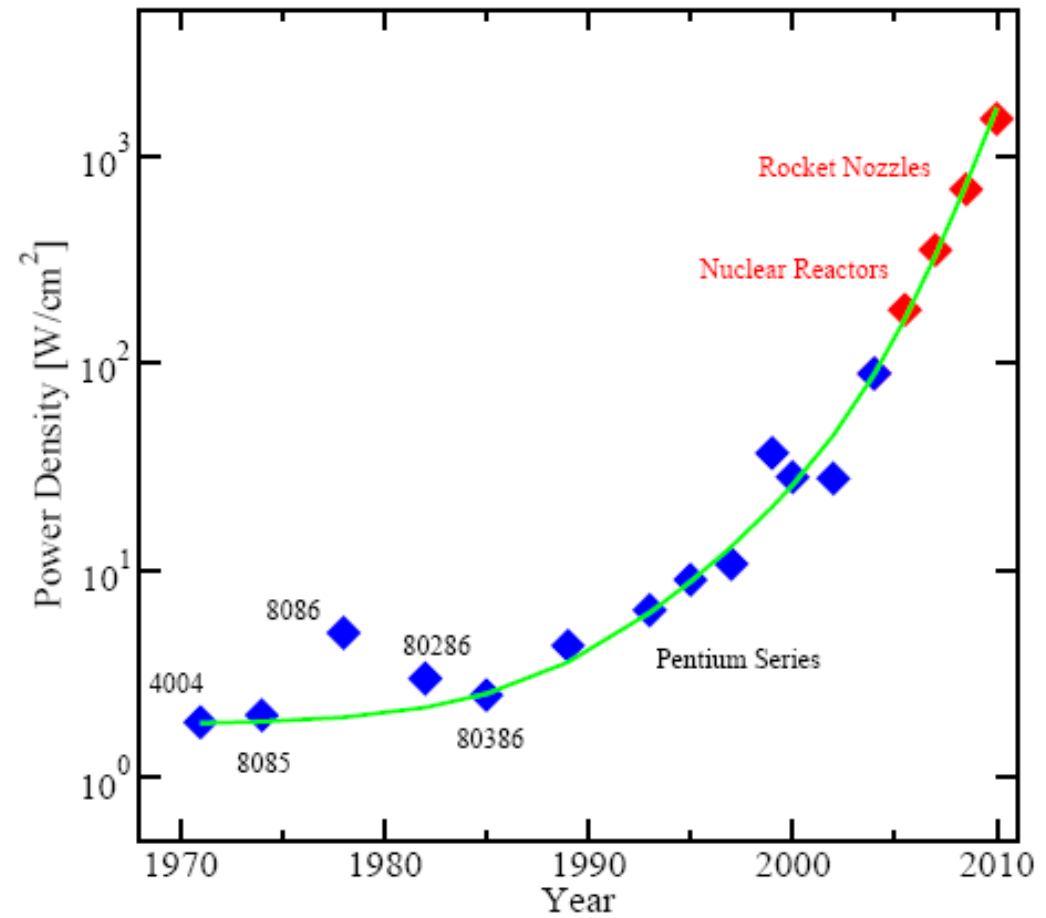


Probleme de disipare a căldurii:  
răcire, design carcasă, fiabilitate,  
viteza de execuție

# Densitatea de energie a unui uP

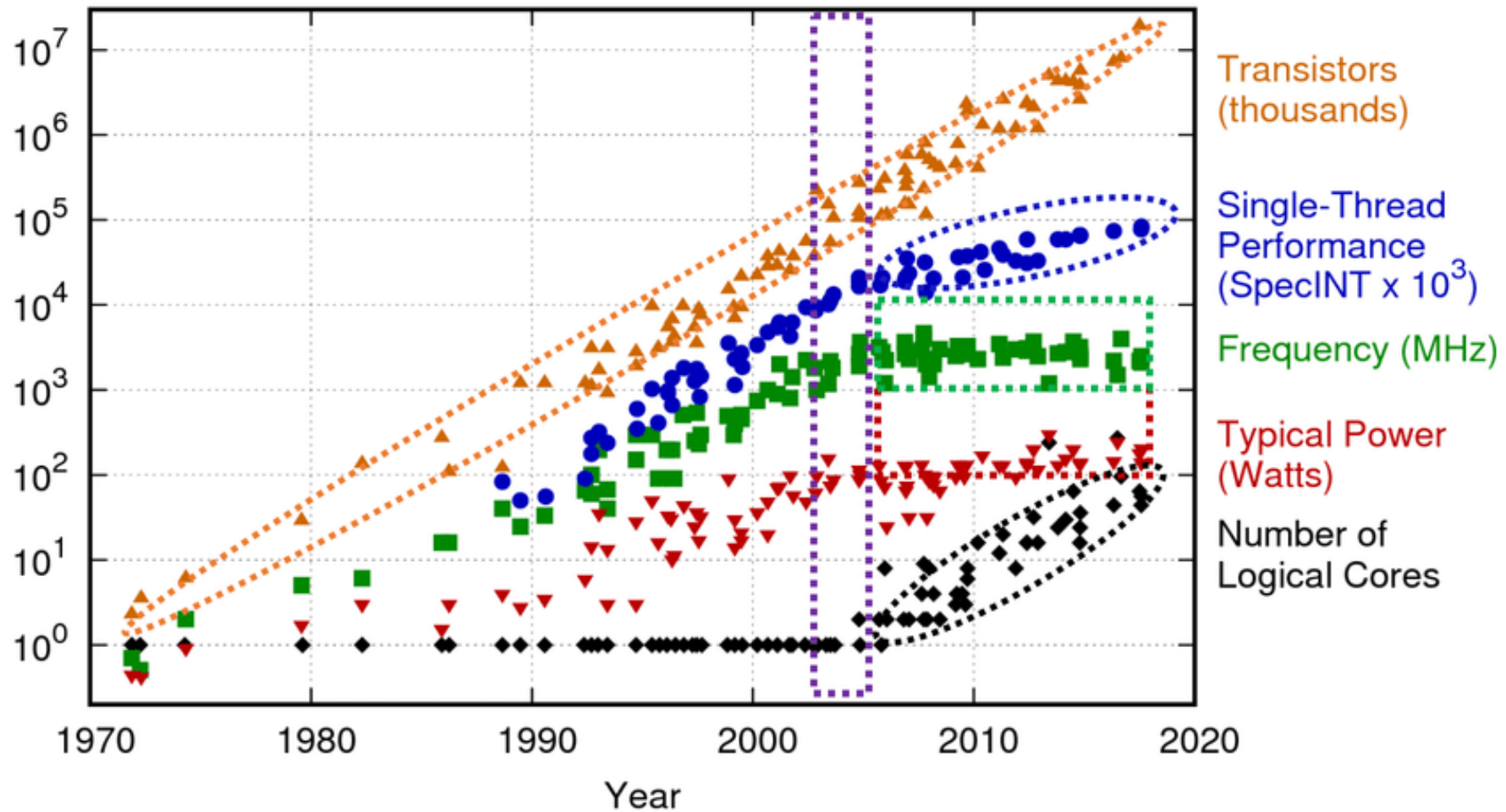


(a) Transistor integration density per die



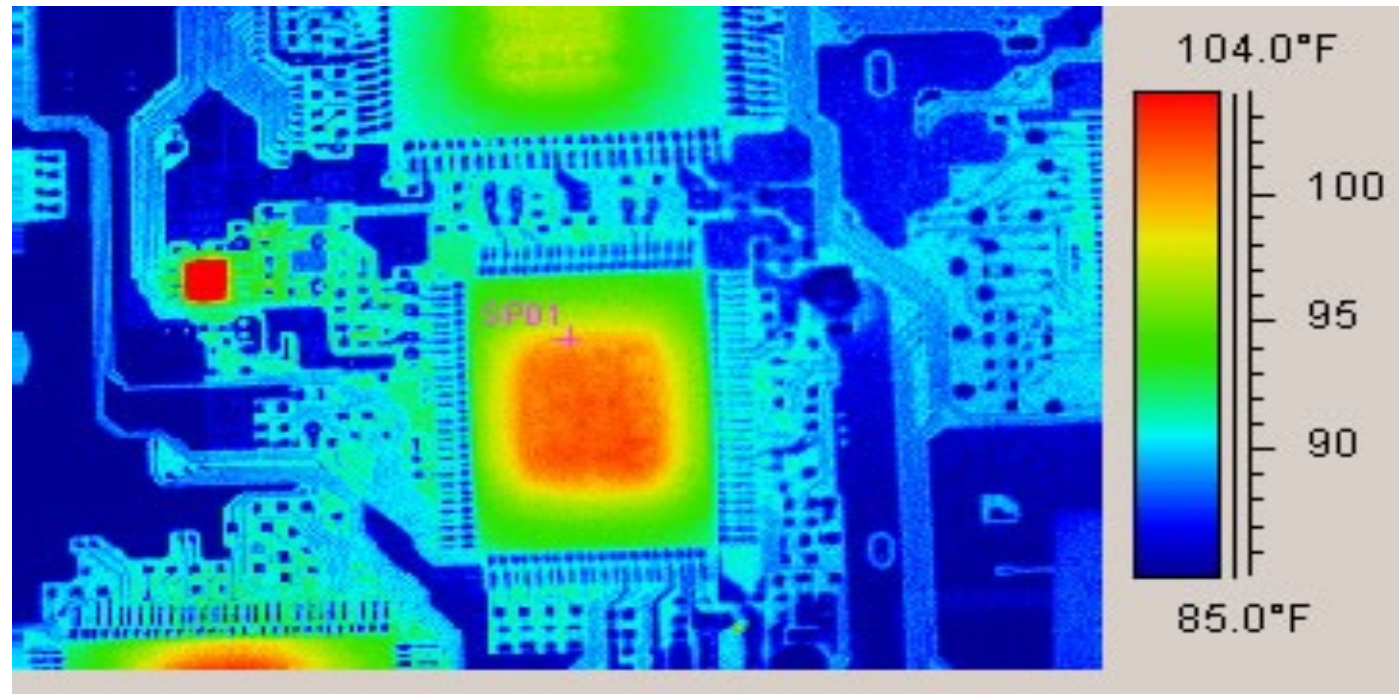
(a) Power loss density per die

# Densitatea de putere





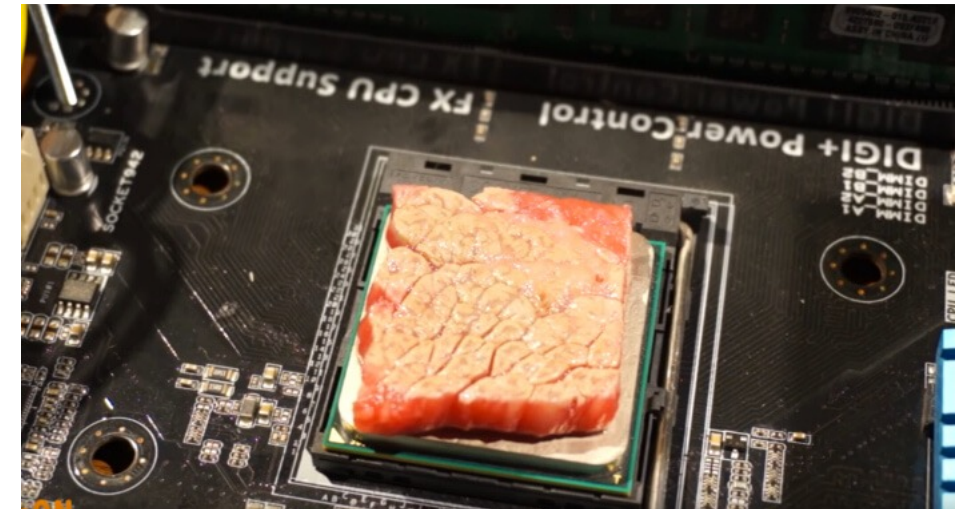
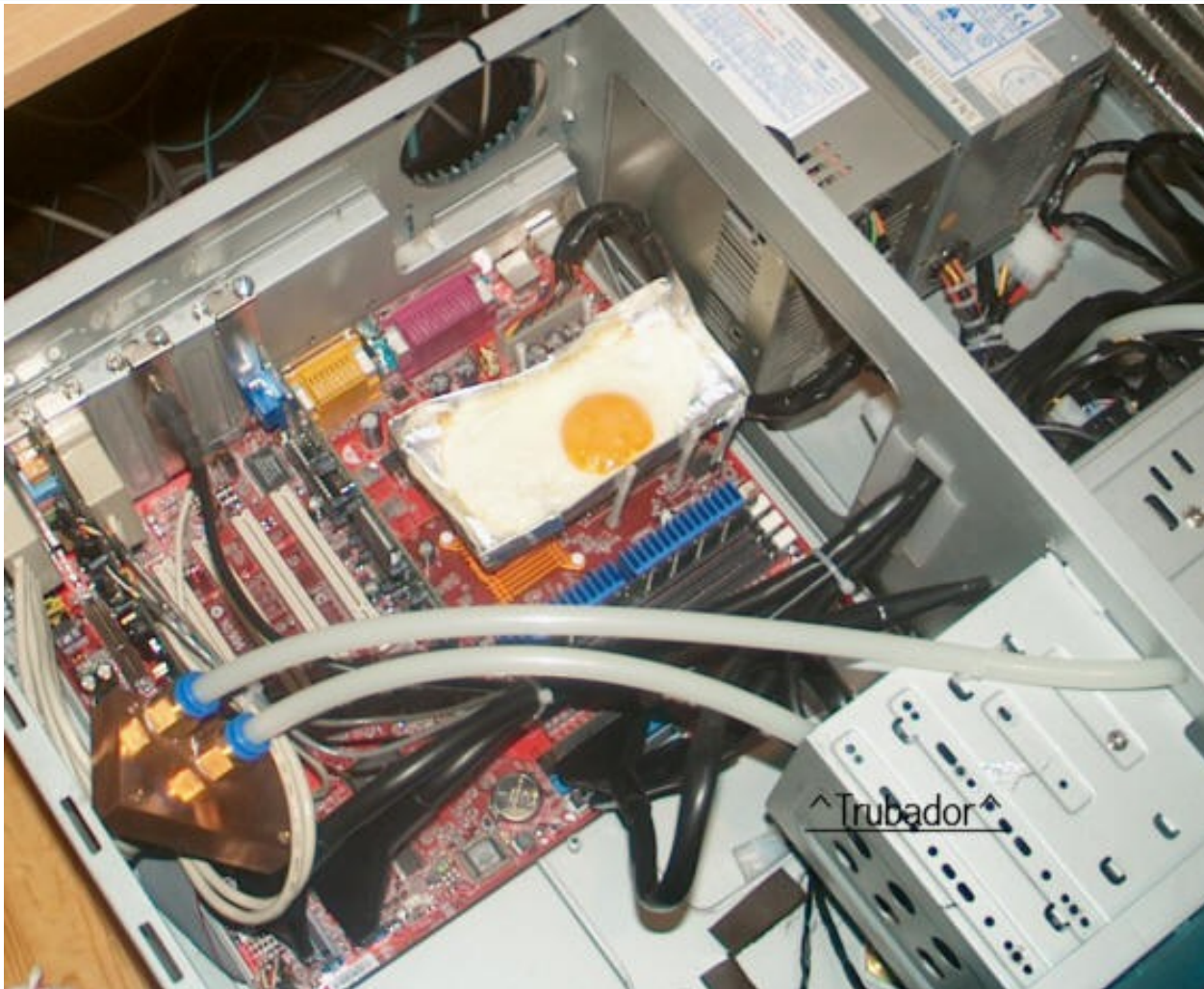
# Imaginea termică a unui circuit



Circuitele CMOS își micșorează viteza la creșterea temperaturii

- Probleme de eficiență
- Probleme de răcire

# Dacă tot nu v-ați convins



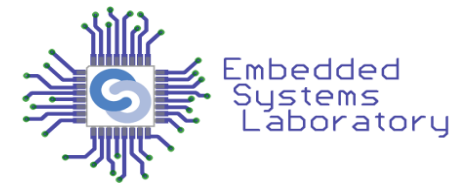
Cooking with microprocessors

<https://www.youtube.com/watch?v=Q2a5nj7wwdQ>

<https://www.youtube.com/watch?v=xL40UN5p6IY>

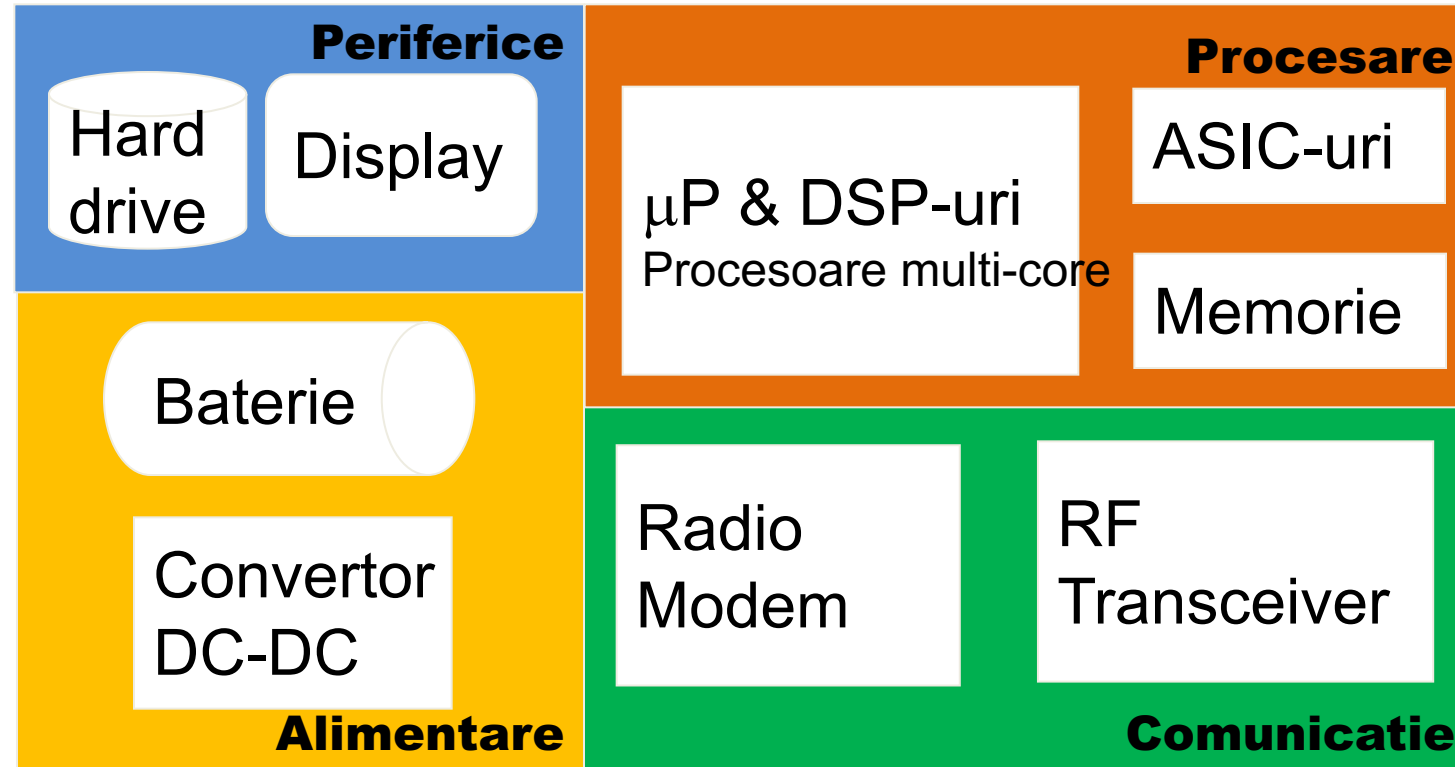


# Problema nu este doar în embedded

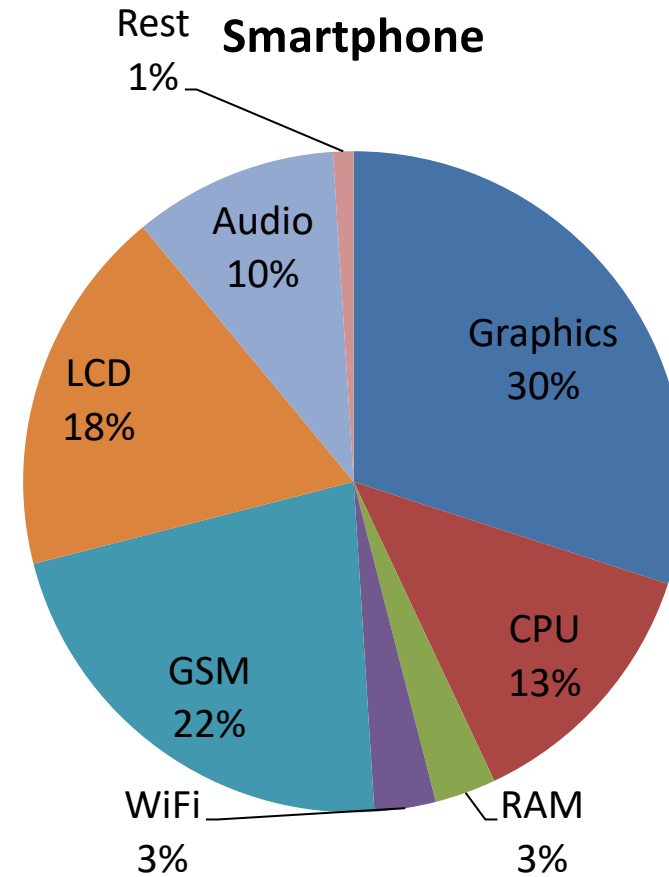
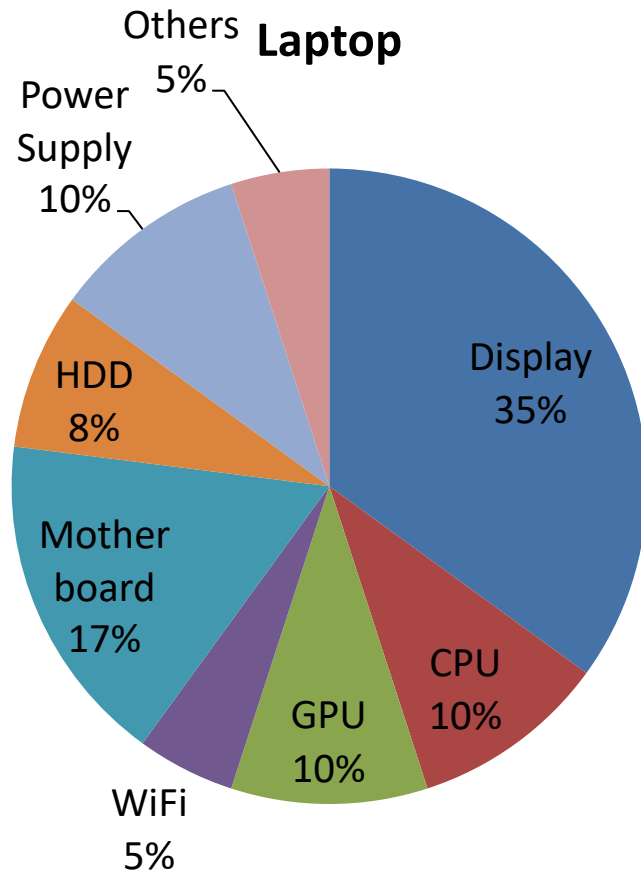


- Portabile (smartphone, laptop, tablete)
  - Durata de viață a bateriei e critică
- Desktop
  - ~2 miliarde de PC-uri în lume (2019)
  - ~350GW (GigaWatt =  $10^9$  Watt) putere disipată
  - Echivalentul a 350 reactoare nucleare
- Centre de calcul
  - 1 singur rack de server consumă între 5 și 20kW
  - Sute de rack-uri într-o singură cameră

# Care sunt marii consumatori de energie dintr-un sistem de calcul?

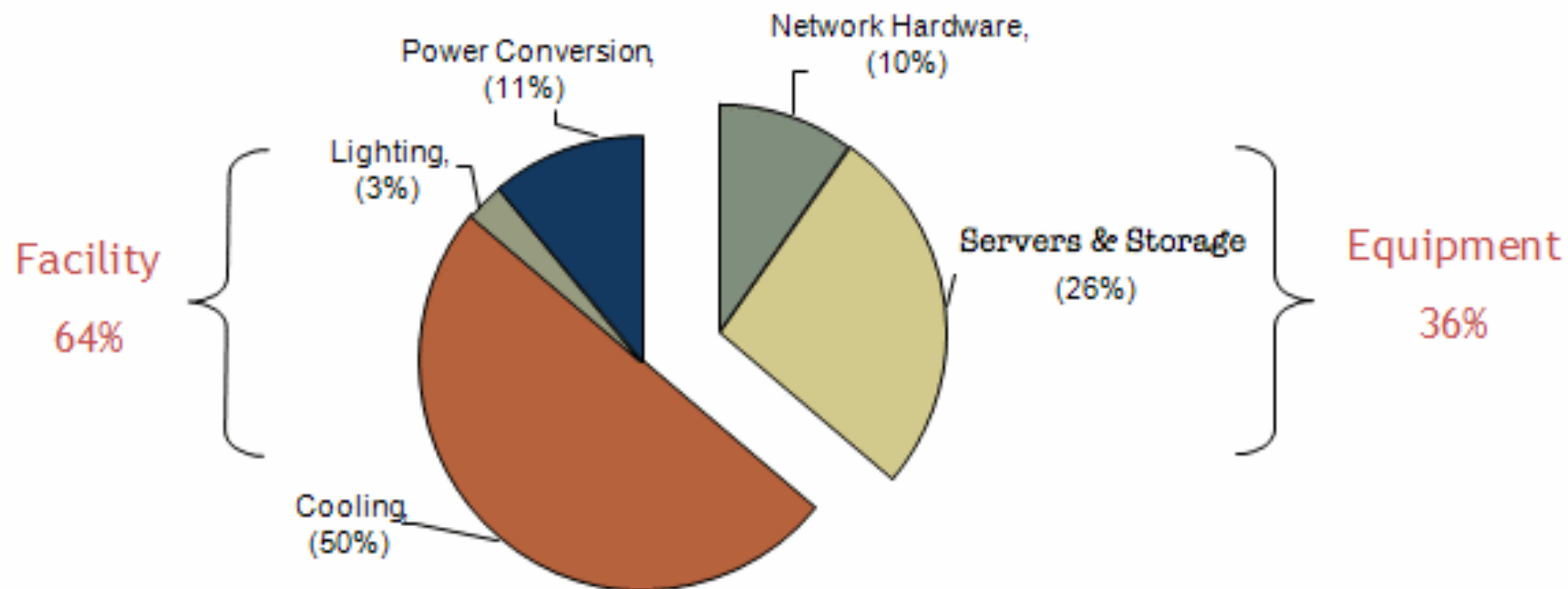


# Comparație: Consumul de energie PC - Embedded

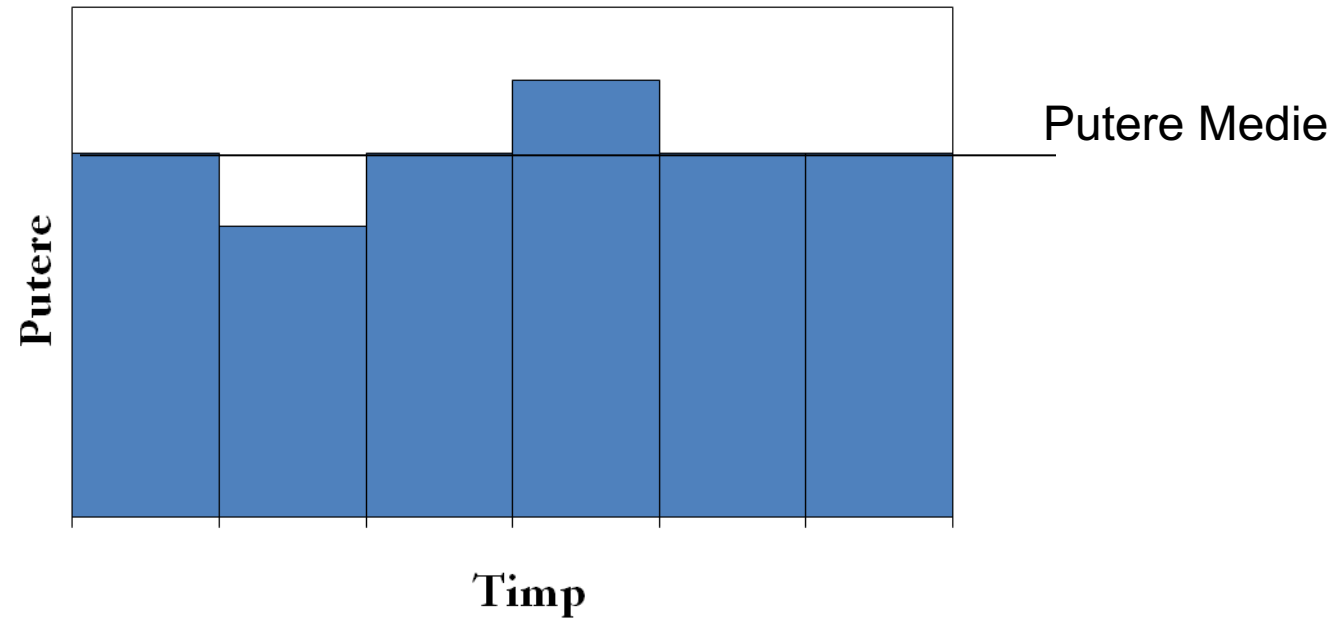


# Comparație: Bugetul energetic al unui data center

## Typical Data Center Energy Consumption



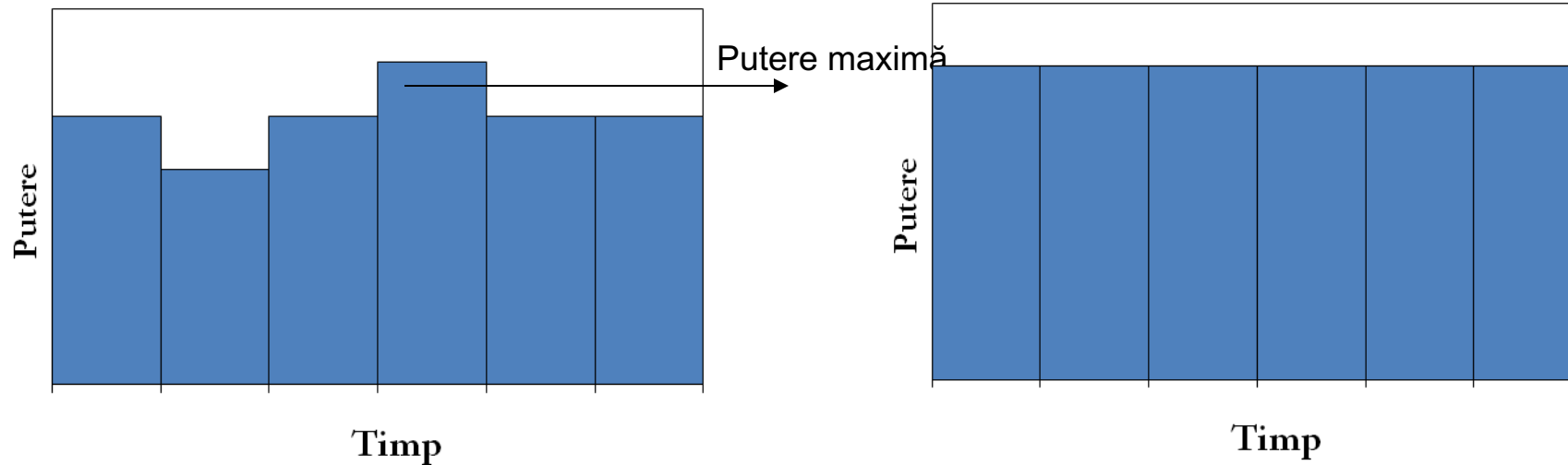
# Putere versus Energie



- Energia este un atribut scalar al obiectelor și se măsoară în Jouli
- Puterea = Rata de consum a energiei și se măsoară în Jouli/s (Watt)
- Puterea medie = (Energie / Timp de execuție)



- Reducerea puterii medii reduce energia dacă timpul de execuție rămâne neschimbat
- Energia este importantă pentru device-urile alimentate prin baterii
  - Viața unei baterii este influențată de energia consumată
- Puterea medie este importantă în reducerea încălzirii
  - Sistemele embedded au facilități rudimentare de răcire, de cele mai multe ori din cauza constrângerilor de mărime și greutate



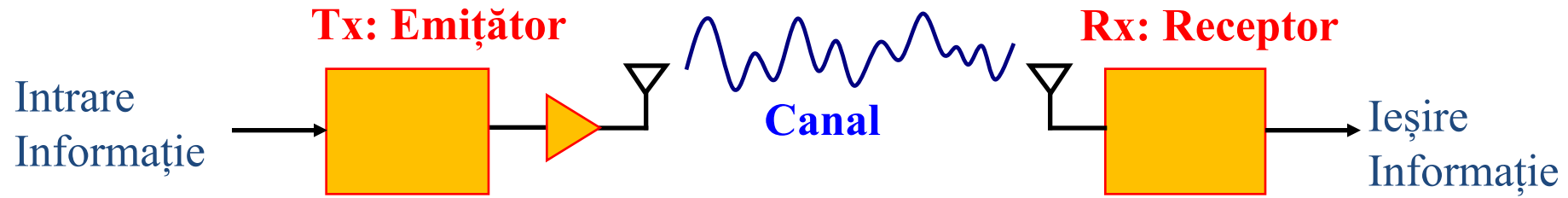
- Energia totală și puterea medie sunt la fel în ambele situații de mai sus
- Puterea maximă: Poate cauza defecțiuni dacă depășește o valoare de prag
- Profil temporal: Disiparea variabilă de putere poate reduce semnificativ timpul de viață al unei baterii. Schimbările bruște de putere disipată pot perturba nivelele logice provocând funcționarea defectuoasă a circuitului.

# Costul procesării pentru embedded uP

- Procesoare folosite frecvent în embedded:
  - Microchip AVR & PIC, Intel 8051, ARM Cortex M0, M4, Xtensa Tensilica, RISC-V
- Valori diferite pentru consumul de energie electrică.
  - 16.5 mW pentru ATmega128L @ 4MHz
  - 75 mW pentru ARM Thumb @ 40 MHz
- Low-power != energy-efficient
  - Exemplu
    - 242 MIPS/W for ATmega128L @ 4MHz (4nJ/Instrucțiune)
    - 480 MIPS/W for ARM Thumb @ 40 MHz (2.1 nJ/Instrucțiune)
  - Alte exemple:
    - 0.2 nJ/Instrucțiune pentru Cygnal C8051F300 @ 32KHz, 3.3V
    - 0.35 nJ/Instrucțiune pentru IBM 405LP @ 152 MHz, 1.0V
    - 0.5 nJ/Instrucțiune pentru Cygnal C8051F300 @ 25MHz, 3.3V
    - 0.8 nJ/Instrucțiune pentru TMS320VC5510 @ 200 MHz, 1.5V
    - 1.1 nJ/Instrucțiune pentru Xscale PXA250 @ 400 MHz, 1.3V
    - 1.3 nJ/Instrucțiune pentru IBM 405LP @ 380 MHz, 1.8V
    - 1.9 nJ/Instrucțiune pentru Xscale PXA250 @ 130 MHz, 0.85V
  - Sunt arhitecturi diferite pe 8, 16 sau 32 de biți!
- Pentru a fi cu adevărat eficient, un chip trebuie să aibă facilități de power-management
  - Idle, sleep mode sau să poată să opereze la frecvențe și tensiuni diferite.

- O metrică puternică în estimarea performanțelor într-un transceiver radio este energia consumată pentru un bit de informație
  - Depinde de modulația adoptată
    - Determină distanța de emisie și alți parametri (nivelul de zgomot, atenuarea)
- Diferite estimări ale consumului pentru transmisie, recepție, mod idle și sleep
- Modulație variabilă, codare
- Costul curent: în jur de 150 nJ/bit pentru short range (5-10m)

# Consumul de energie radio



$$E_{elec}^{Tx}$$

Electronica  
de  
transmisie

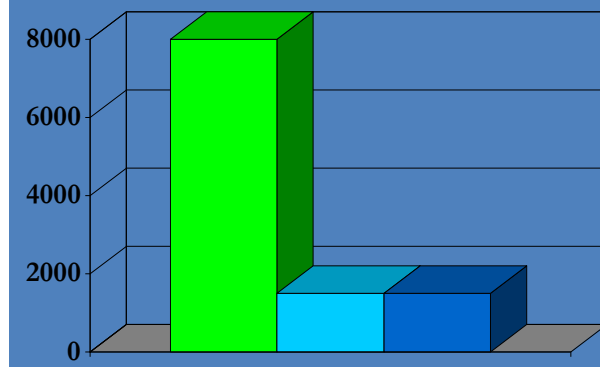
$$E_{RF}$$

Amplificare

$$E_{elec}^{Rx}$$

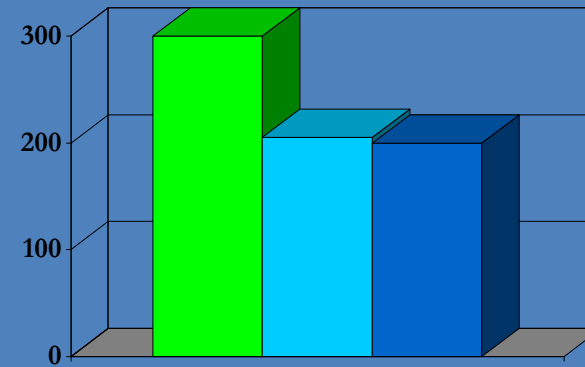
Electronica  
de recepție

nJ/bit



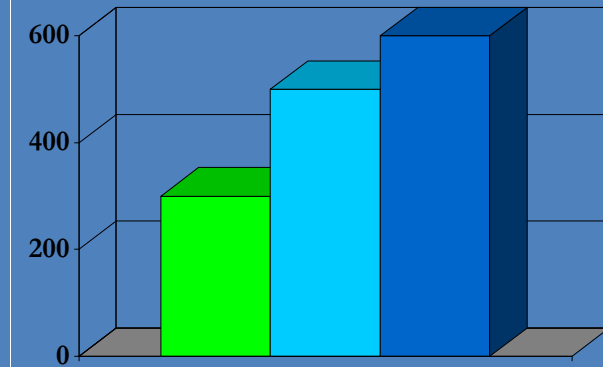
~ 1 km (GSM)

nJ/bit



~ 50 m (WLAN)

nJ/bit

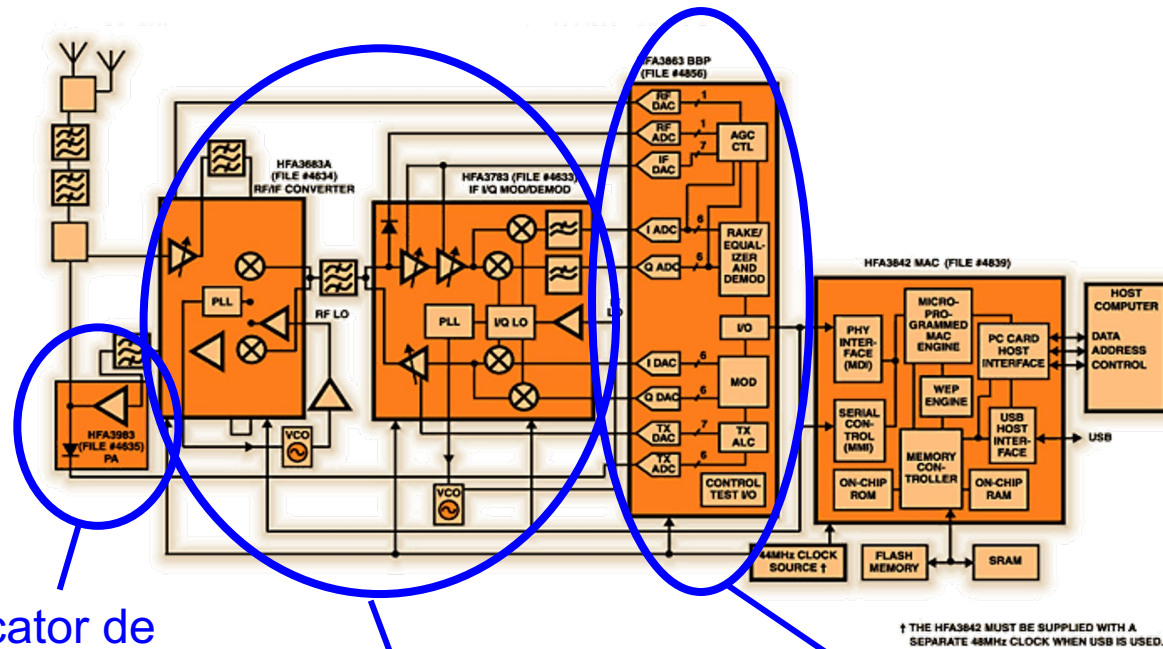


~ 10 m (Mote)



# Tendențe în electronica radio

Putere radiată  
63 mW (18 dBm)



Amplificator de  
putere 600 mW  
(eficiență ~11%)

Electronică  
analogică  
240 mW

Electronică  
digitală  
170 mW

## ➤ Tendențe

- Mută funcționalitatea din partea analogică în cea digitală
- Electronica digitală beneficiază cel mai mult de pe urma îmbunătățirilor tehnologice

- Sunt câteva surse importante de consum
  - Transducer
  - Procesare de semnal
    - analogic, digital
  - Conversie ADC
    - Consum foarte mare de energie
    - Depinde de viteza și rezoluția la care e făcută o conversie
    - Este important să se aleagă o precizie suficientă pentru aplicația respectivă
- Sunt foarte multe tipuri de senzori pe piață
  - Low-power
    - Temperatură, lumină, accelerometru
  - Medium-power
    - Acustic, magnetic
  - High-power
    - Foto, video, scanner laser

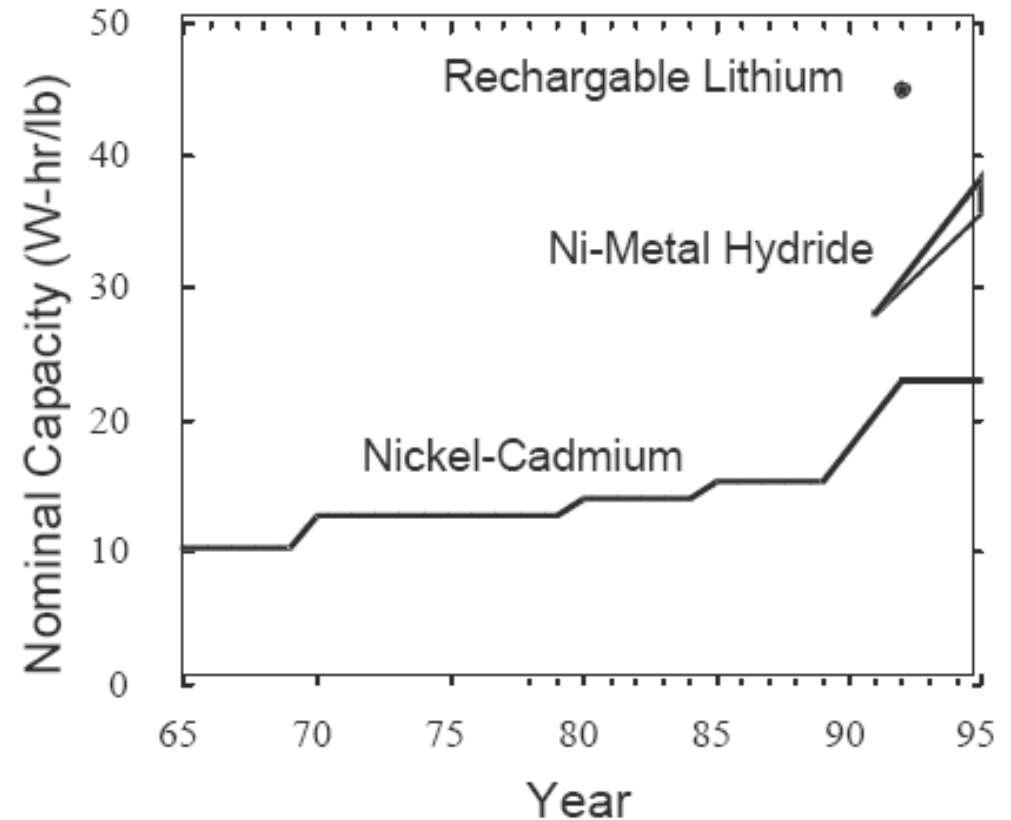
- Platforme de acționare, propulsie și interacțiune cu mediul
  - Montate pe roboți mobili
  - Antene sau senzori care pot fi acționați
- Eficiența energetică variază și nu este încă bine studiată
- Câțeva considerente:
  - Acționarea este făcută de obicei prin arderea unui combustibil, care are o densitate energetică mult superioară unei baterii
    - Unele UAV-uri au un timp de zbor mult mai mare decât timpul de viață al camerei wireless instalate pe ele
  - O acționare făcută atunci când este necesar poate avea avantaje considerabile
    - Repoziționarea mecanică a antenei poate permite recepționarea mai bună și reduce costul comunicației
    - Mișcarea unor noduri într-un WSN poate duce la o distribuție mai uniformă și un timp de viață mai mare al rețelei per ansamblu

# Portabilitate: Capacitatea bateriilor este o problemă

Capacitatea bateriilor se dublează o dată la fiecare zece ani



Primul telefon mobil



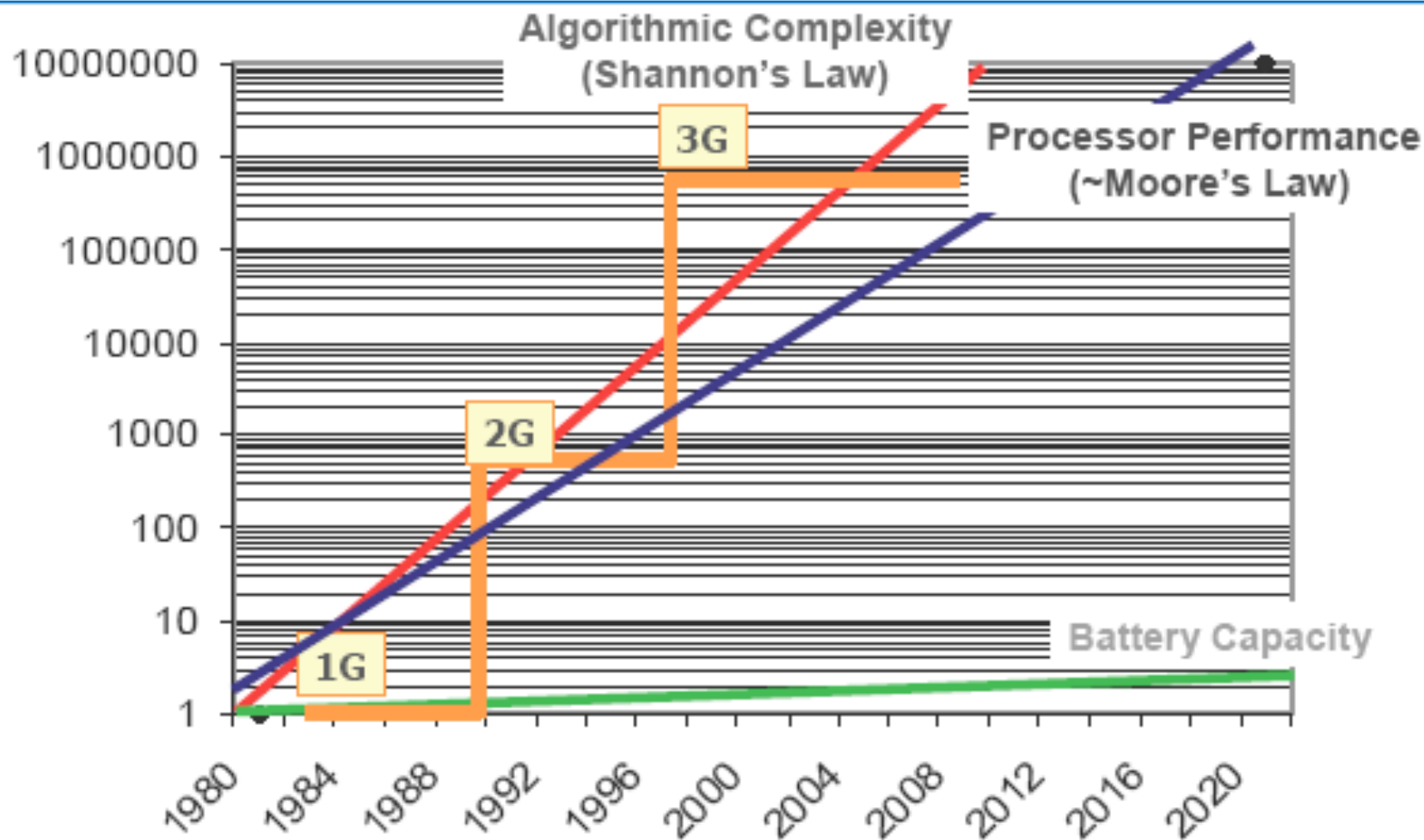
# Batteries are hard stuff



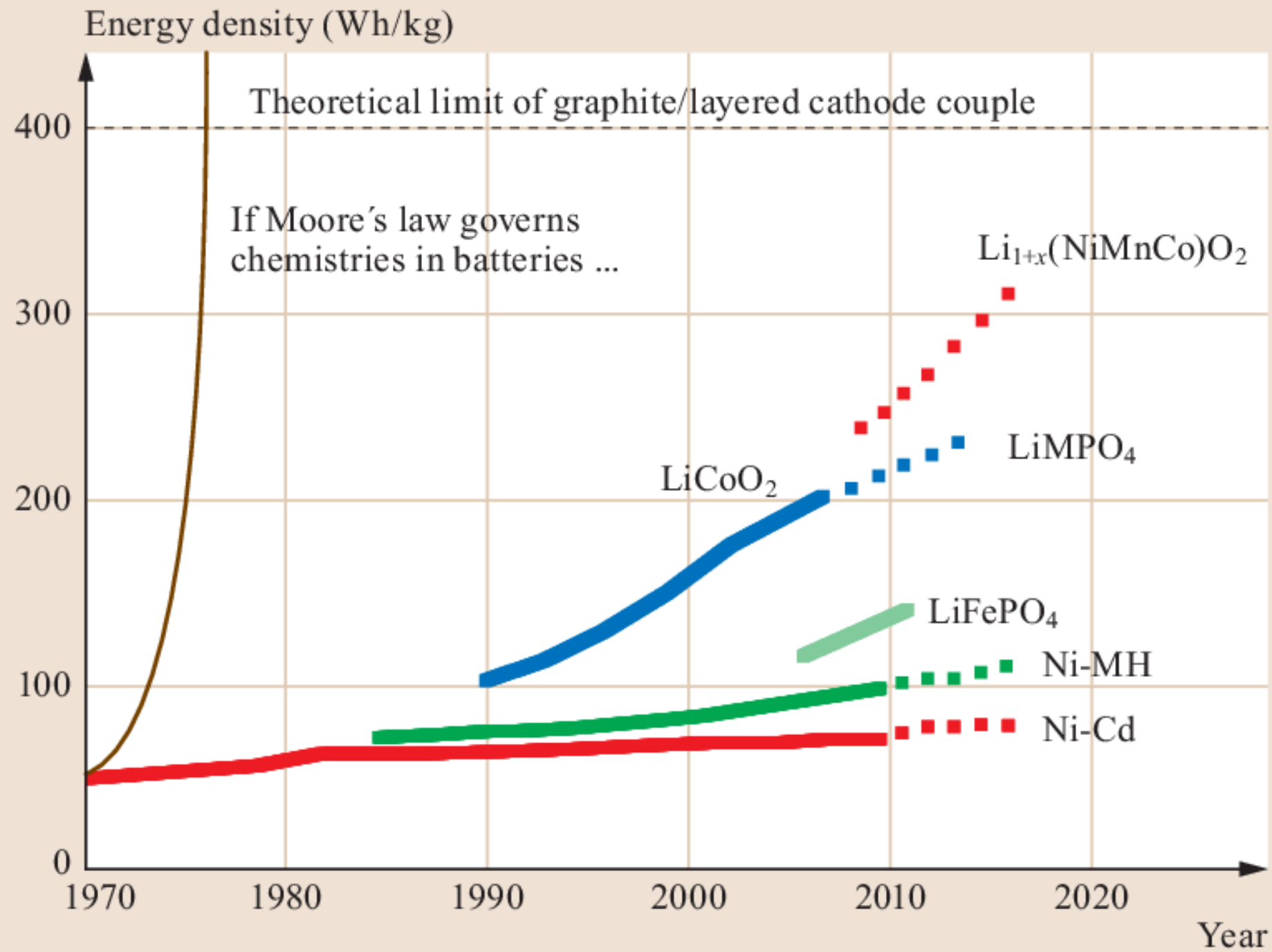
<http://dilbert.com/strips/comic/2001-05-31/>



# Legea lui Moore și capacitatea bateriilor (sau Intel vs. Duracell)

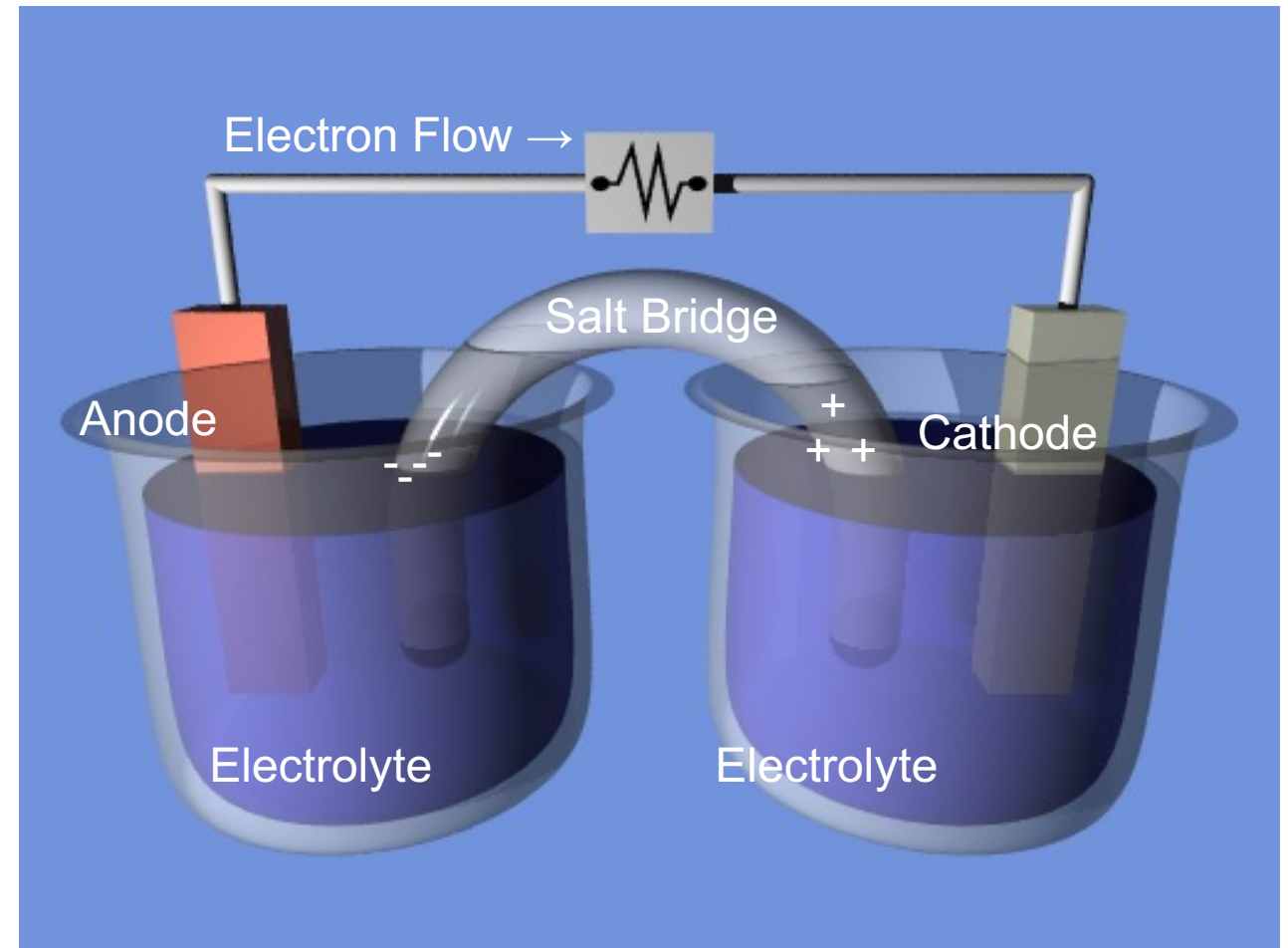


**Bateriile nu respectă legea lui Moore!!!**



# Cum funcționează bateriile electrochimice

- Reacție REDOX
  - Oxidare – anodul pierde electroni.
  - Reducere – catodul câștigă electroni.



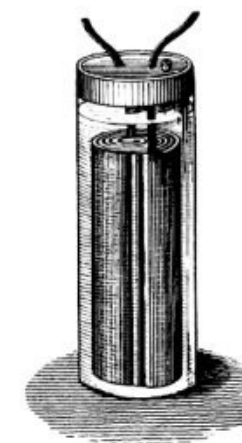
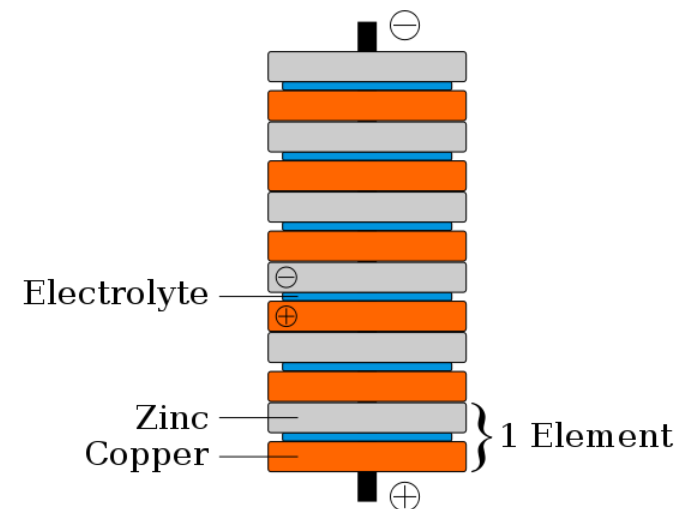
# Istoria bateriilor electrochimice

- “Bateriile de la Bagdad”
  - Vechi de ~1000-2000 ani.
  - Borcane de teracotă ce conțin un cilindru de cupru separat de o tijă de fier printr-un dop de bitum izolator și umplute cu un electrolit acid.
  - Utilizate probabil la electroplacarea cu aur a bijuteriilor, experiențe supranaturale etc. (sau poate nu erau deloc baterii)



# Istoria bateriilor electrochimice

- Pila Voltaică
  - Inventată de Alessandro Volta în 1800
  - Zinc și Cupru separate printr-o pânză umezită în saramură
  - Probleme tehnice:
    - Comprimarea pânzei crea scurt-circuite
    - Timp de viață limitat
- Celula Daniell
  - Inventată în 1836 de John Daniell
- Bateria plumb-acid
  - Inventată în 1859 de Gaston Planté
  - Prima baterie reîncărcabilă
- Bateria zinc-carbon
  - Inventată în 1887 de Carl Gassner



- Bateria Nichel-Cadmium (NiCd)
  - Inventată în 1899 de Waldmar Jungner.
- Bateria Alcalină
  - Inventată în 1955 de Lewis Urry
- Bateria Nichel Metal-Hydrid (NiMH)
  - NiMH au apărut pe piață începând din 1989.
- Bateriile Litiu și Litiu-ion
  - Primele baterii cu litiu apar pe piață în anii '70
  - Primele baterii litiu-ion vândute în '91
  - Primele baterii litiu-ion polimer apar pe piață în 1996



# Sumar rapid al celorlalte tipuri de baterii

- Bateriile cu mercur
  - Shelf life de până la 10 ani.
- Baterii cu oxid de argint
  - Costuri prohibitive dar densitate de energie imensă.
- Baterii atomice
  - Convertor termionic
  - Celule termofotovoltaice
- Betavoltaics
  - Energia rezultată din descompunerea atomilor de tritriu ce emit radiații beta
  - Folosite în zone inaccesibile sau pentru durate mari de misiune (ex. nave spațiale)





- Baterii primare – Bateriile obișnuite
- Baterii secundare – Reîncărcabile (Acumulatori)
- emf – Electromotive force, tensiune
- Ampere·hour (Ah) = 3600 coulombi, măsură a sarcinii electrice
- Watt ·hour (Wh) = 3600 joules, măsură a energiei
- $Ah = (Wh) / emf$

- Lead Acid
- Nickel-Cadmium
- Nickel-Metal Hydride
- Li-ion

	Lead-Acid	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
Cell voltage (V)	2	1.2	1.2	3.6
Specific energy (Wh/kg)	1-60	20-55	1-80	3-100
Specific power (W/kg)	< 300	150 – 300	< 200	100 – 1000
Energy density (kWh/m <sup>3</sup> )	25-60	25	70-100	80-200
Power density (MW/m <sup>3</sup> )	< 0.6	0.125	1.5 – 4	0.4 – 2
Maximum cycles	200-700	500-1000	600-1000	3000
Discharge time range	> 1 min	1 min-8 hr	> 1 min	10 s-1 h
Cost (\$/kWh)	125	600	540	600
Cost (\$/kW)	200	600	1000	1100
Efficiency (%)	75 - 90	75	81	99

# Baterii primare alcaline

- Pierd 8 – 20% din sarcină/an chiar și la temperatura camerei.
- Performanța scade drastic la scăderea temperaturii.

	AAA	AA	9V	C	D
Capacity (Ah)	1.250	2.890	0.625	8.350	20.500
Voltage	1.5	1.5	9	1.5	1.5
Energy (Wh)	1.875	4.275	5.625	12.525	30.75



# Baterii alcaline secundare

- Auto-descărcare mai rapidă decât bateriile primare

	Low-Capacity NiMH (1700-2000 mAh)	High-Capacity NiMH (2500+ mAh)	NiCd
Charge Cycles	1000	500	1000

- Nu trebuie supra-încărcate și nici încărcate prea rapid – deteriorează ireversibil celula.
- Nu trebuie descărcate excesiv.
- NiCd are “memory effect.”
- NiCd este potrivit pentru aplicații în care curentul în sarcină este mai mic decât cel de auto-descărcare.
- NiMH au o capacitate mai mare, sunt mai ieftine și mai puțin toxice decât NiCd.

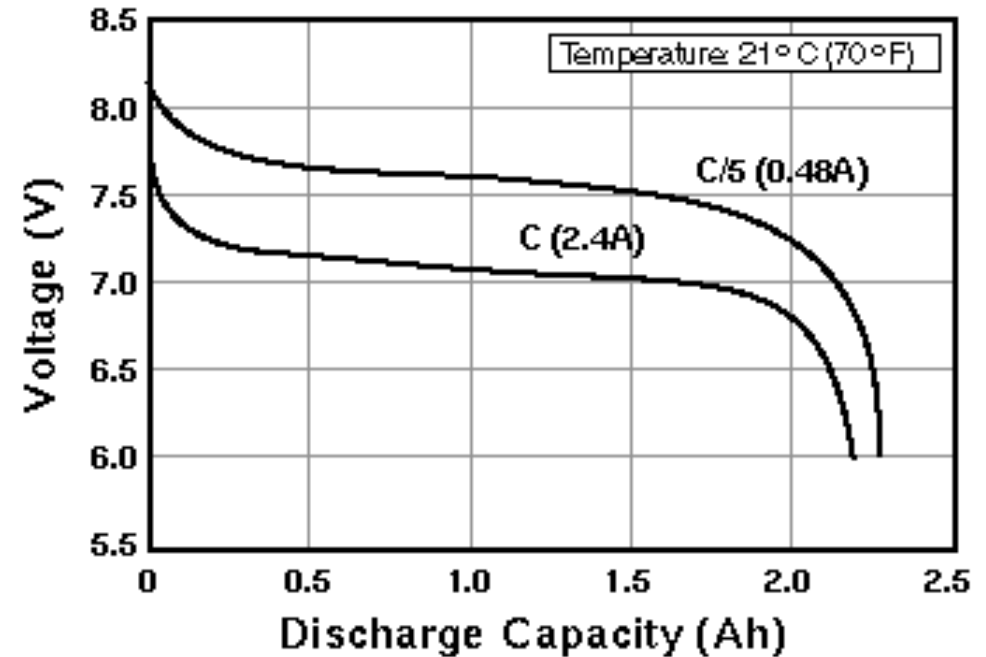
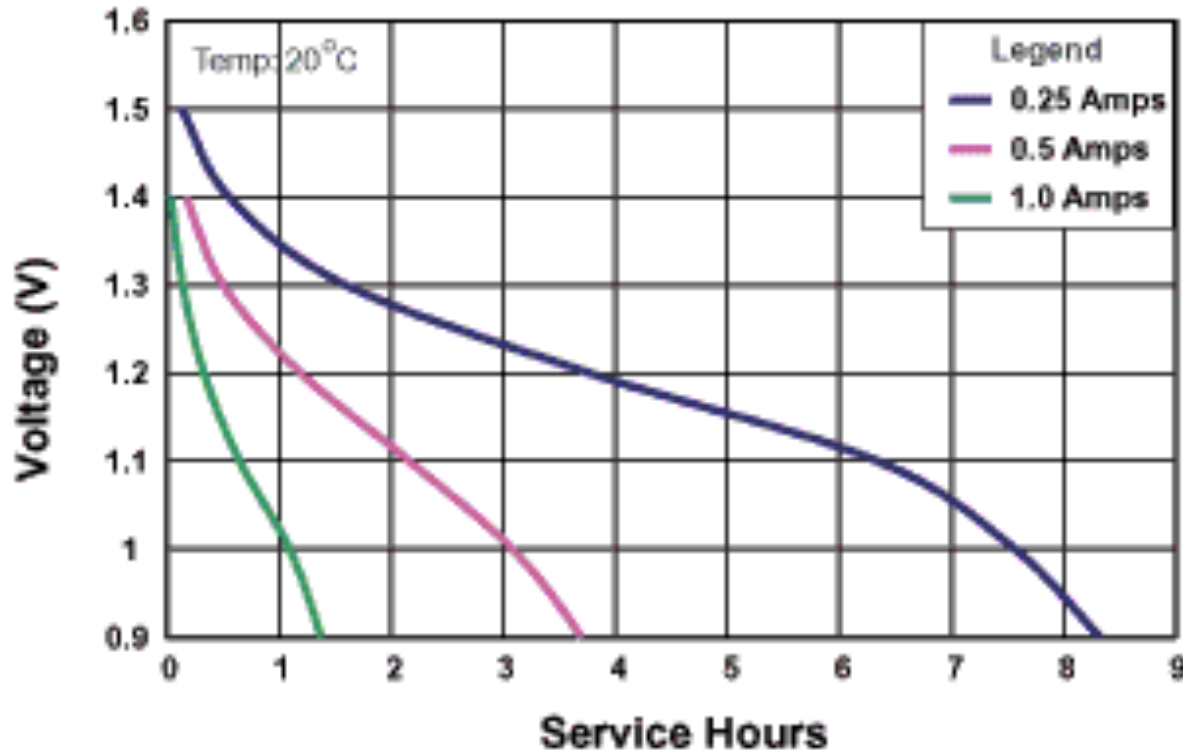
# Baterii Lithium-Ion și Lithium-Ion Polymer

- Raport foarte bun energie/masă (~160 Wh/kg comparat cu 30-80 Wh/kg la NiMH)
- Nu au memory effect.
- Curent mic de auto-descărcare.
- Bateria se degradează din momentul fabricației.
- Circuite speciale de protecție pentru fiecare celulă.
- Bateriile Li-Ion Polymer sunt superioare.
  - Densitate mare de energie.
  - Costuri mici de fabricație
  - Rezistență mare la abuzuri fizice
  - Poate fi modelată ușor în mai multe forme



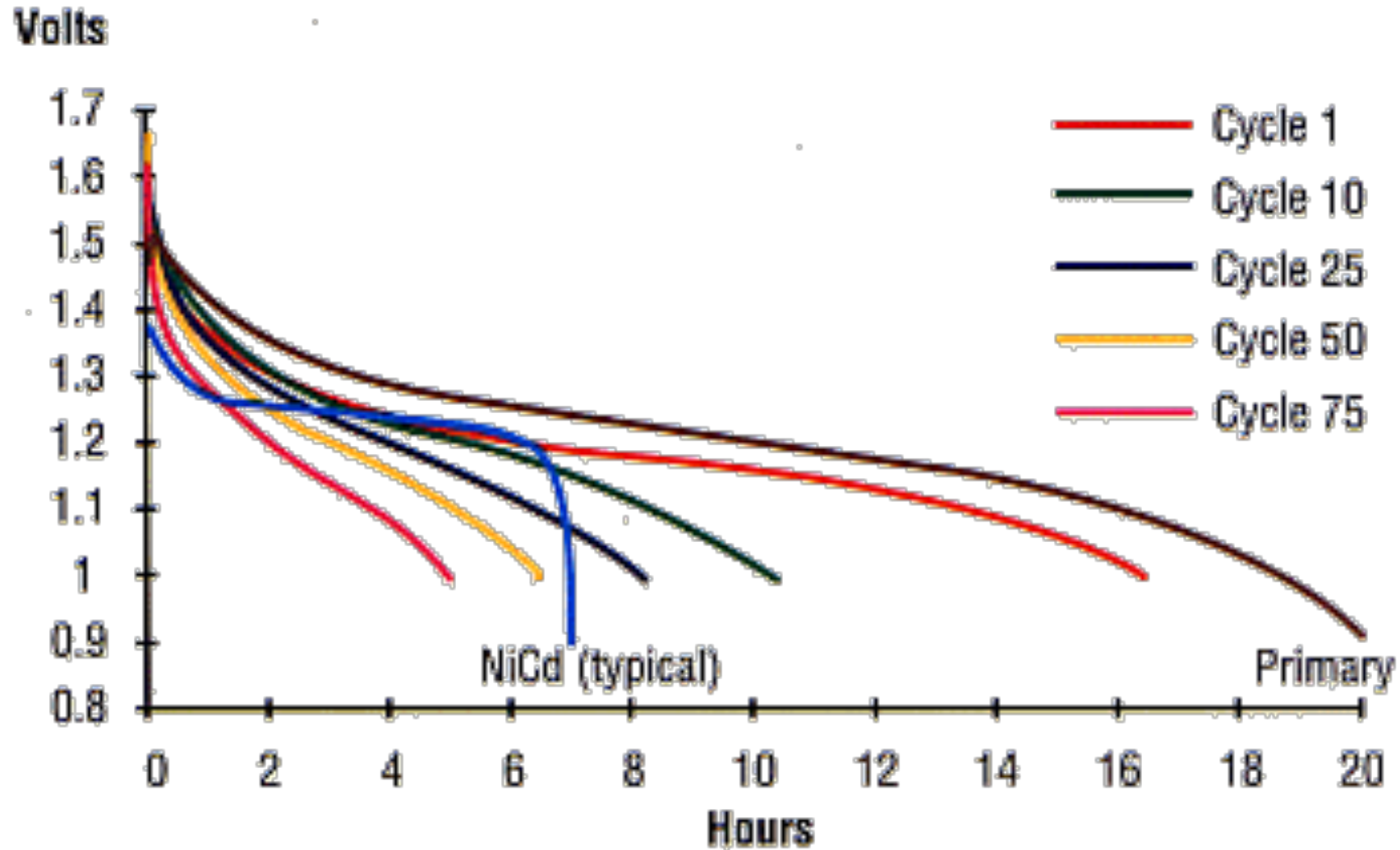
# Curbe de descărcare

### Typical Ultra AA Discharge Characteristic



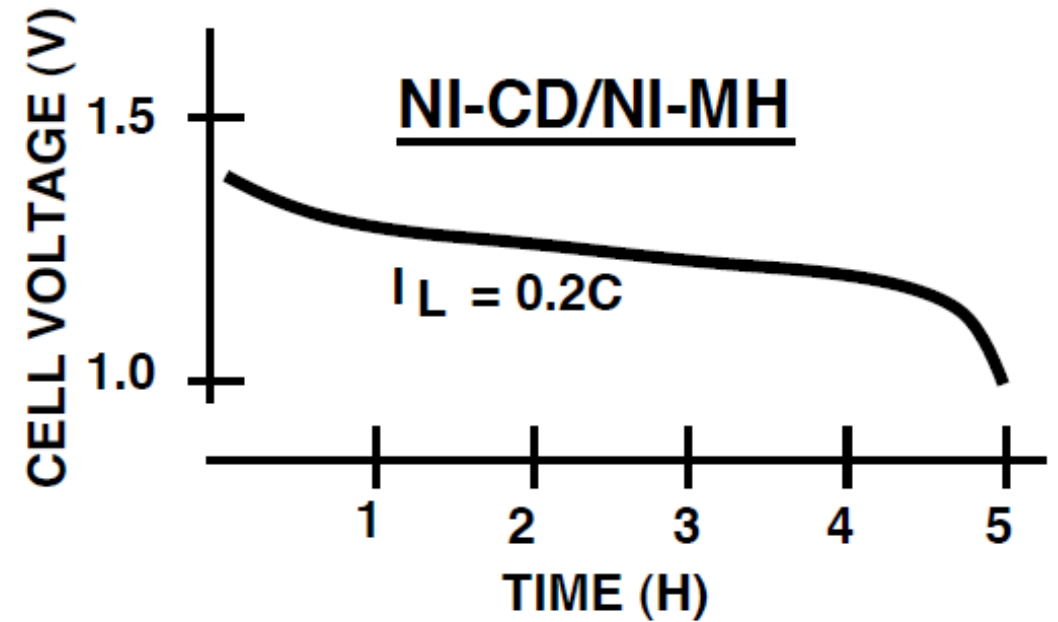
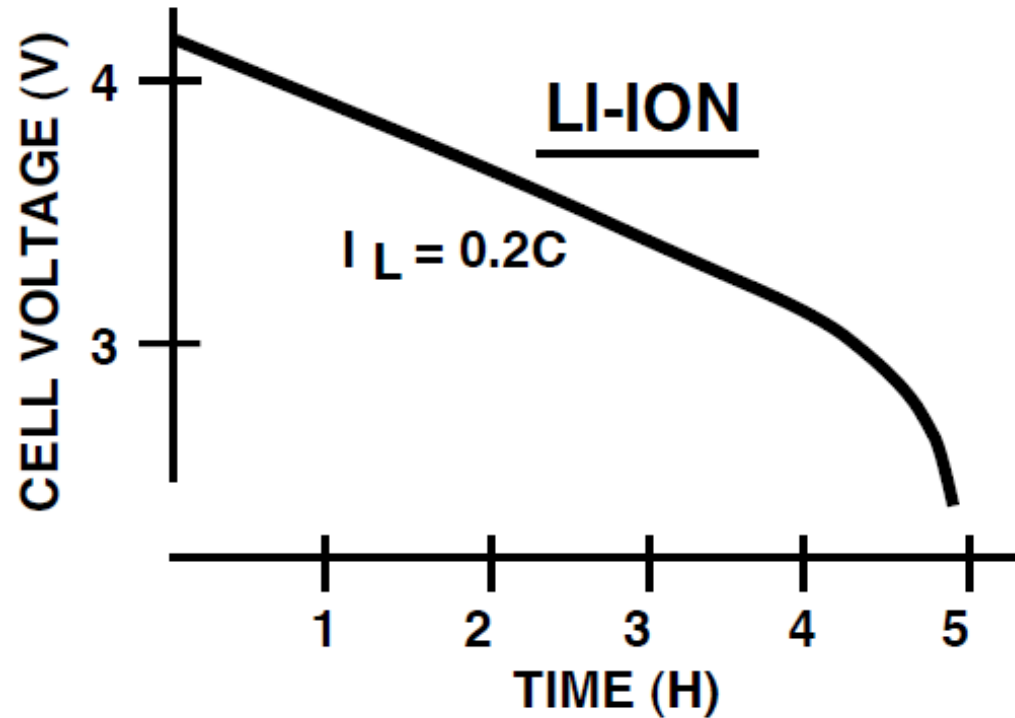
Voltage and capacity of DURACELL DR30 Ni-MH batteries at various discharge temperatures and rates.  
[Conditions: Charge: 1C to  $-\Delta V = 60\text{mV}$  @ 21°C (70°F)]

# Descărcare acumulatori. Alcaline vs. NiCd





# Curbe descărcare Li-ion vs. NiMH



# Tehnologiile curente de fabricație a bateriilor nu sunt adecvate

Tehnologie	Reincarcabil?	Wh/litru
Alkaline MnO <sub>2</sub>	NU	347
Silver Oxide	NU	500
Li/MnO <sub>2</sub>	NU	550
Zinc Air	NU	1150
NiCd	DA	125
Li-Polymer	DA	300-415

- Exemplu: baterie de 20W
  - NiCd: pentru 0.5 kg are un timp de viață de 1h și costă 20\$
  - **Aceeași cantitate** de Li-Ion durează 3 h, dar costă > 30\$

# Surse de energie: Comparație

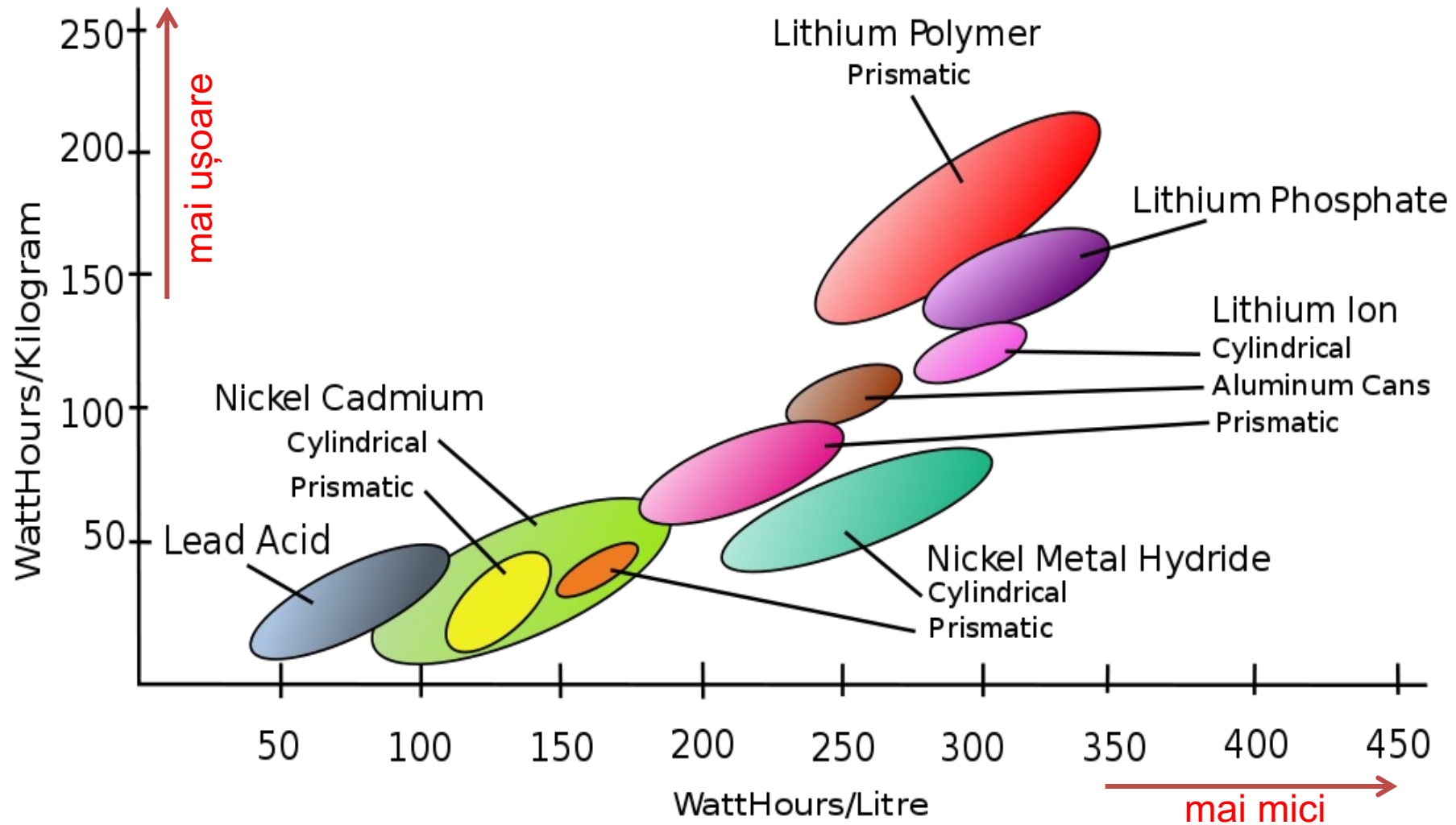
	Densitate de Energie	Sursa Estimarii
Baterie (Zinc-Aer)	1050 -1560 mWh/cm <sup>3</sup> (1.4 V)	Date producator
Baterie(Lithium ion)	300 mWh/cm <sup>3</sup> (3 - 4 V)	Date producator
Solar (Exterior)	15 mW/cm <sup>2</sup> - direct in soare 0.15mW/cm <sup>2</sup> - inorat.	Date producator si teste
Solar (Interior)	.006 mW/cm <sup>2</sup> - pe birou 0.57 mW/cm <sup>2</sup> - 12 in. sub bec de 60W	Teste
Vibratii	0.001 - 0.1 mW/cm <sup>3</sup>	Simulare si Testare
Zgomot Acustic	3E-6 mW/cm <sup>2</sup> @ 75 Db    9.6E-4 mW/cm <sup>2</sup> @ 100 Db	Simulare
Alimentare Parazita Umana	1.8 mW (insertii pantofi >> 1 cm <sup>2</sup> )	Studiu Publicat
Conversie Termica	0.0018 mW - 10 deg. C gradient	Studiu Publicat
Reactie Nucleara	80 mW/cm <sup>3</sup> 1E6 mWh/cm <sup>3</sup>	Date Publicate
Celule de Hidrogen	300 - 500 mW/cm <sup>3</sup> ~4000 mWh/cm <sup>3</sup>	Date Publicate

- Caracteristici importante:
  - Densitatea de energie (Wh/litru)
  - Energia specifică (Wh/kg)
  - Densitatea de putere (W/litru)
  - Puterea specifică (W/kg)
  - Tensiunea de operare, tensiunea de mers în gol
  - Tensiunea de prag (pentru care bateria este descarcată)
  - Timpul de stocare (shelf life)
  - Numărul de cicli
- Toți parametrii de mai sus sunt determinați de chimia bateriei respective
  - Avansul tehnologic a permis îmbunătățirea randamentului pentru sistemele existente
    - » carbon-zinc, alcaline, NiCd, plumb-acid
  - Sisteme noi
    - » Li-ion, Li-polimer
    - » zinc-aer, Ni - metal hydride

- Teoretic, capacitatea unei baterii este determinată de cantitatea de material activ din celulele ei
  - Bateriile sunt modelate ca niște surse constante de energie
- În realitate, capacitatea nominală depinde de modul în care bateria este descărcată
  - Rata de descarcare (curentul dat în sarcină)
  - Profilul de încărcare/descarcare
  - Tensiunea de operare

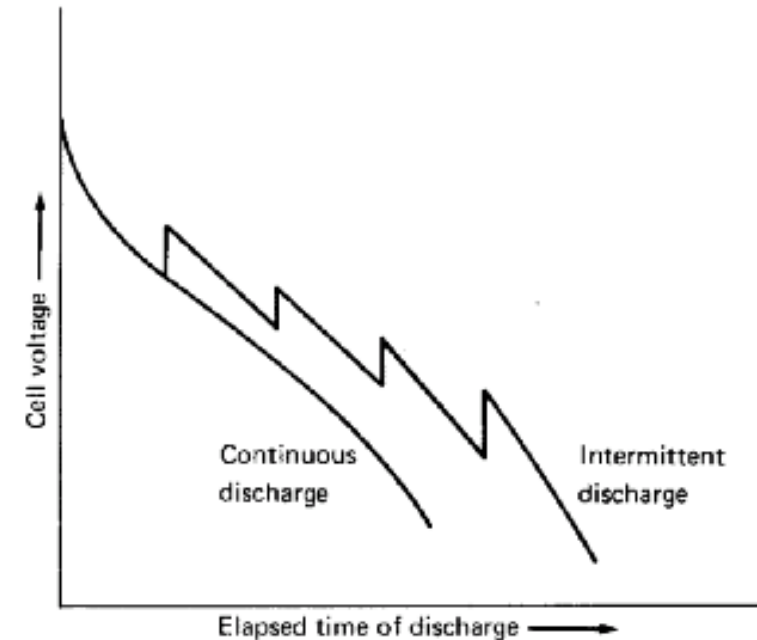
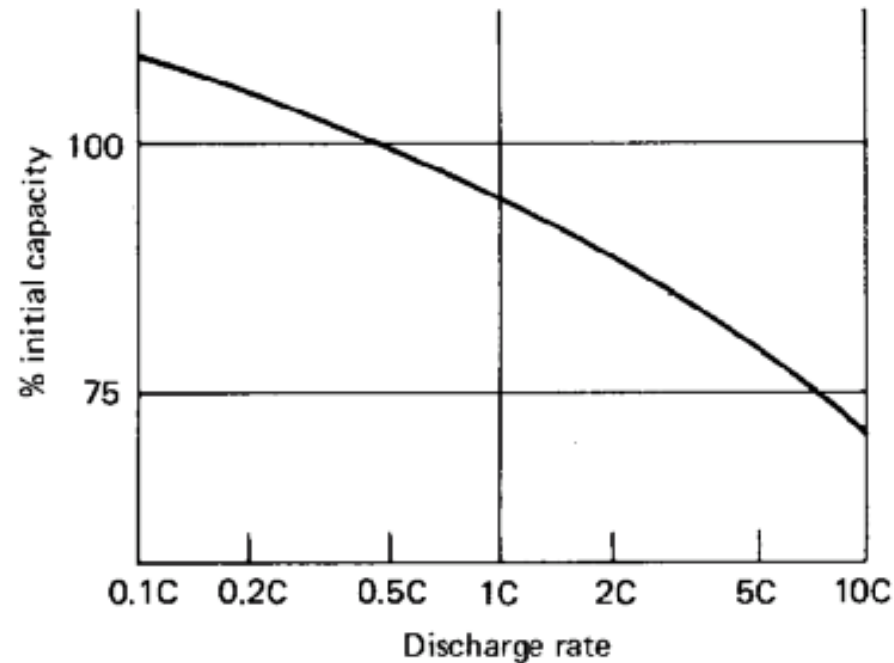
- Cantitatea de energie livrată scade odată cu mărirea sarcinii în circuit
  - Măsurată în amperi oră (Ah) sau watt oră (Wh) atunci când bateria este descărcată într-un anumit regim și până la o tensiune de prag
- La curenți mari procesul de difuzie care mișcă materialul activ din electrolit către electrod nu este suficient de rapid
  - Concentrația materialului activ din jurul electrozilor scade la zero și tensiunea celulei scade dramatic
  - Chiar dacă bateria încă mai are material activ!

# Tehnologii curente





# Capacitatea Bateriilor



- Curentul exprimat în unități “C”: curentul în sarcină relativ la capacitatea bateriei
  - e.g. un curent de descărcare de 1C pentru o capacitate a bateriei de 500mAh este 500mA

# Formula lui Peukert

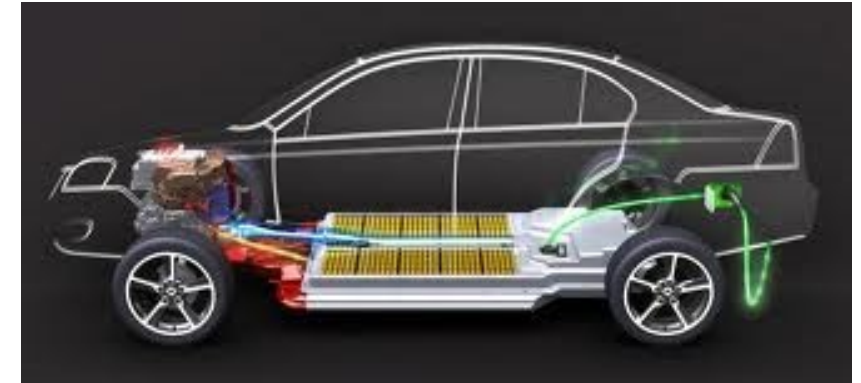
$$C = I^k T$$

$$T = H \left( \frac{C}{IH} \right)^k$$

- C - capacitatea bateriei (Ah)
- k - constantă ce depinde de chimia bateriei (adimensională)
- T - timpul de descărcare (ore)
- I - curentul de descărcare (A)
- H - timpul nominal de descărcare (ore)

# Studiu de caz: Tesla Model S

- Versiunea cu baterie 85 kWh
  - 7,104 celule litiu-ion
  - 16 module legate în serie
  - 14 în zona de jos și 2 în față
  - Fiecare modul are șase grupuri de câte 74 celule legate în paralel
  - Cele șase grupuri sunt legate în serie pentru a face un modul
- Cât de multe baterii AA ar înlocui bateria Model S?  
~35,417!
- Greutate aprox. 320 kg
- Garanție de 8 ani a bateriei
- De la 350 la 400 VDC @ ~200A Supercharging Station
- Încărcare la 110 VAC sau 240 VAC
- <http://www.teslamotors.com/goelectric#charging>



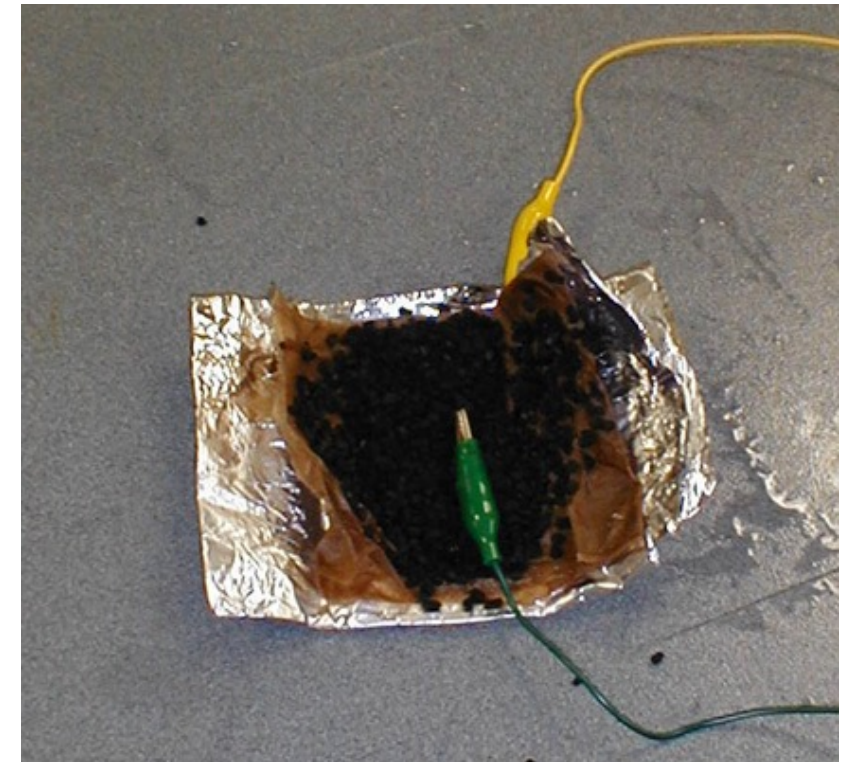
- Bateria aluminiu-aer
  - Folosește reacția de oxidare a aluminiului pentru a genera electricitate
  - Are o densitate de energie foarte mare (  $\sim 1V, 100mA$  )
- Home made!

<https://www.youtube.com/watch?v=ngicpx0adY4>

<https://www.youtube.com/watch?v=r-YZeOkllRg>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium\\_battery](http://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_battery)

<http://exo.net/~pauld/activities/AlAirBattery/alairbattery.html>

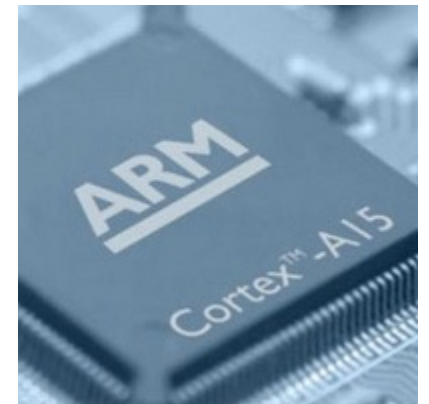


O lămâie poate genera o tensiune de 1V și un curent mediu de 0.1mA pentru aproximativ o oră.

a. De câte lămâi este nevoie pentru a aprinde un bec de 100W?

b. Un procesor ARM Cortex A15 (Samsung Galaxy S5) are un consum de energie de aproximativ 0.6nJ/instrucțiune la 1.5GHz.

Câte instrucțiuni pot fi executate de procesor din energia unei singure "baterii-lămâie"?



# Ce poate să facă un proiectant embedded?

1. Să înțeleagă unde și de ce se disipă energia într-un circuit.
2. Să se gândească cum să reducă consumul la toate nivelurile din ierarhia de design.
  - În trecut era destul de greu de implementat o astfel de abordare
  - Toate eforturile erau depuse în reducerea consumului la nivel de circuit