

Sisteme Încorporate

Cursul 3

Consumul de energie în Embedded

Facultatea de Automatică și Calculatoare
Universitatea Politehnica București

REMEMBER: WITH GREAT
POWER COMES GREAT
CURRENT SQUARED
TIMES RESISTANCE.



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

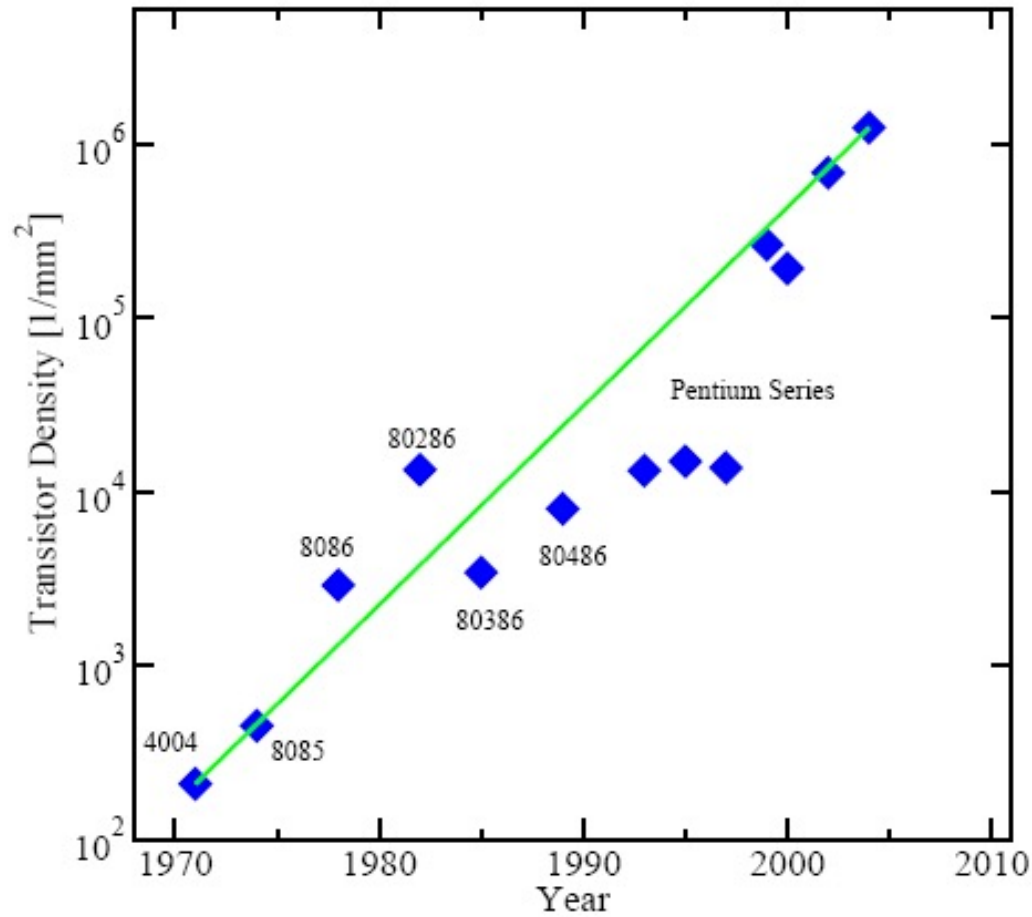


Mediul înconjurător

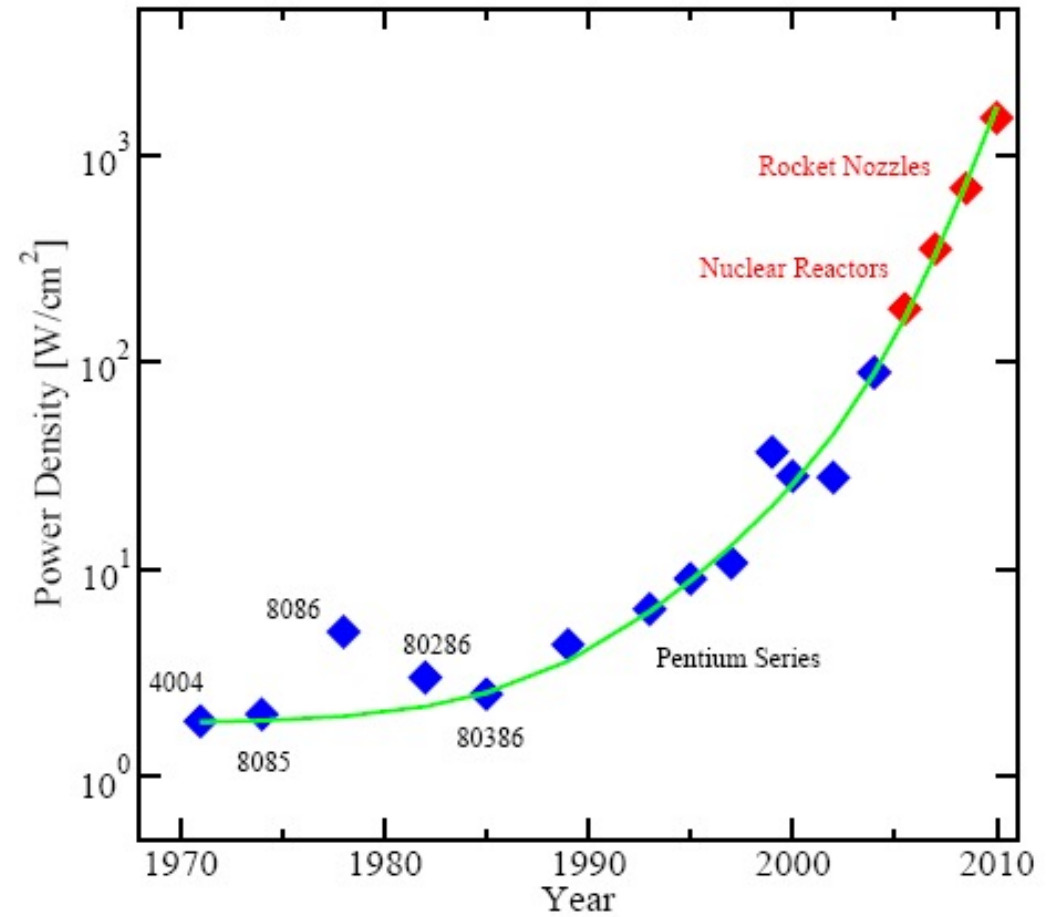


Probleme de disipare a căldurii:
răcire, design carcasă, fiabilitate,
viteza de execuție

Densitatea de energie a unui uP

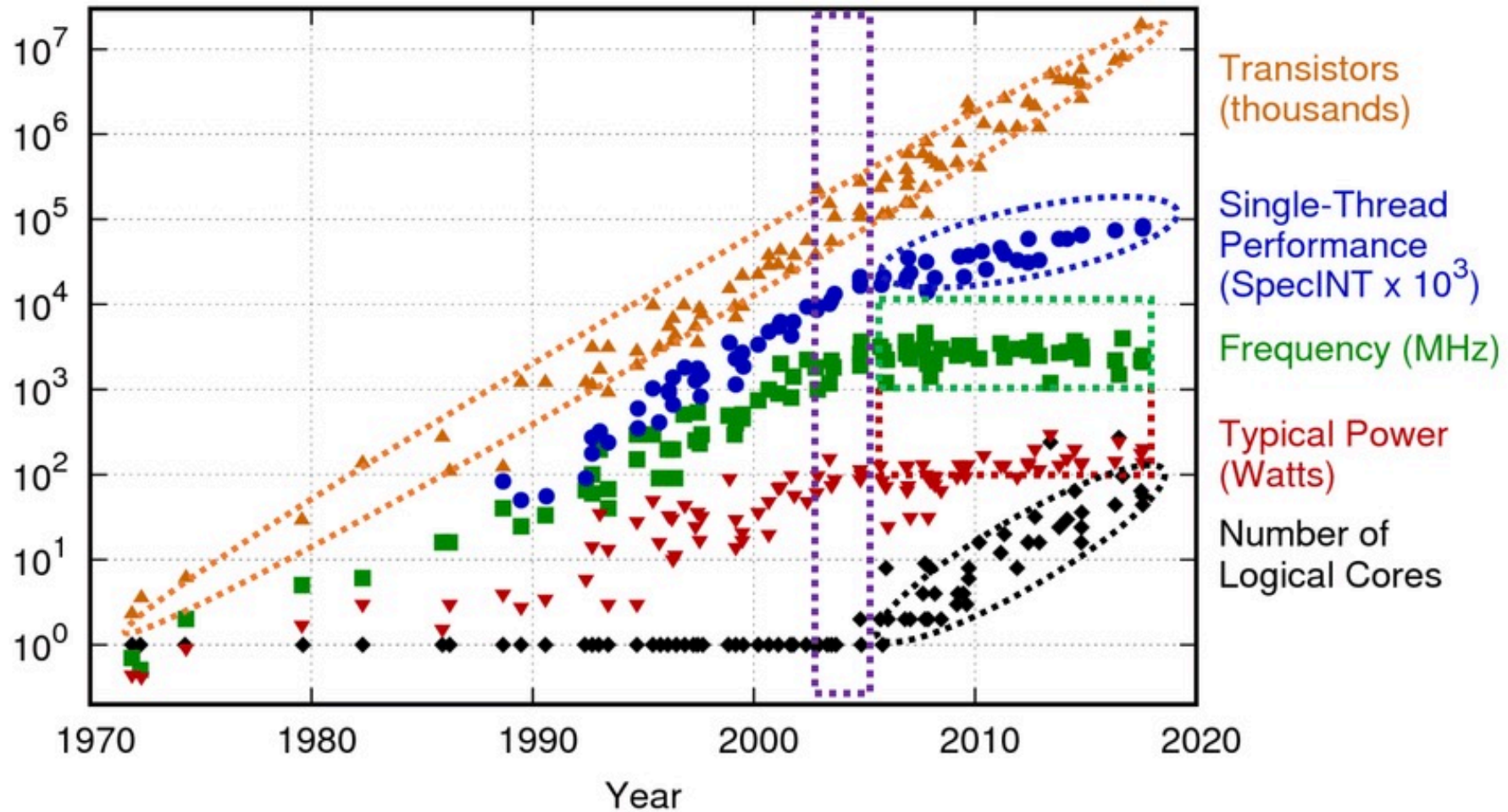


(a) Transistor integration density per die

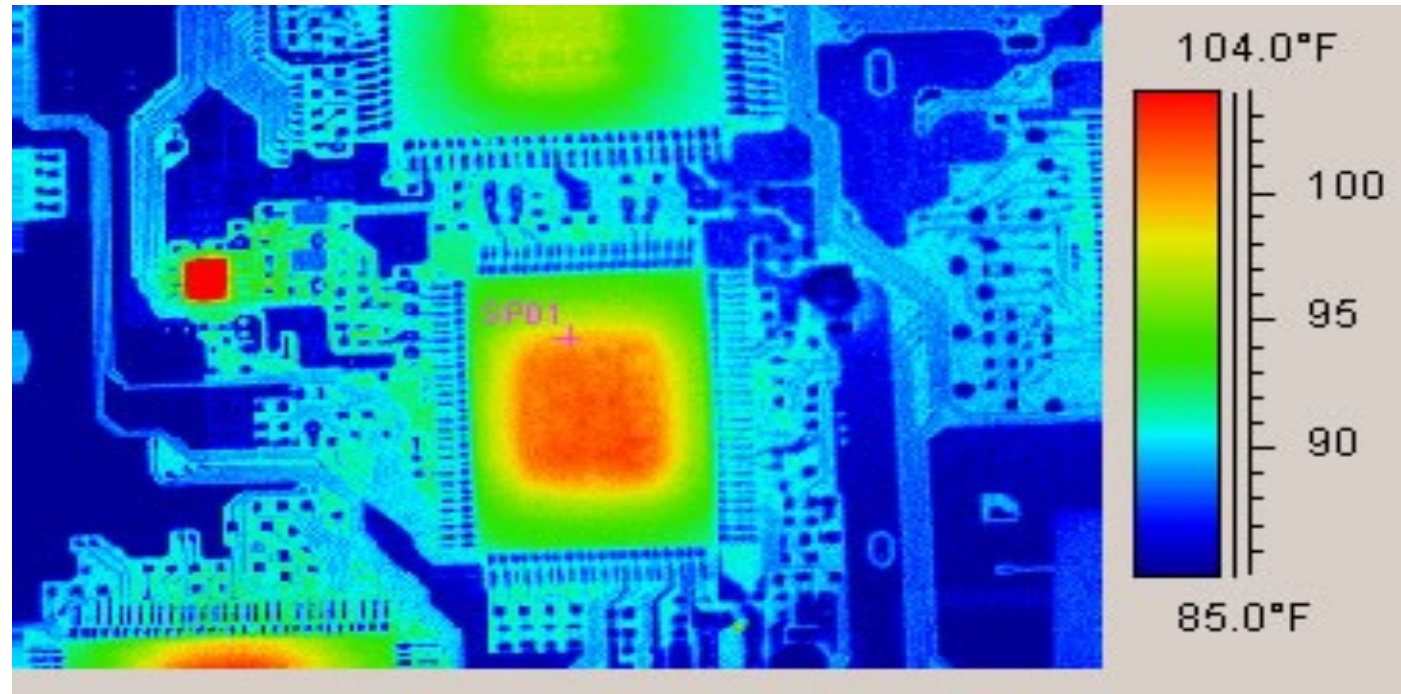


(a) Power loss density per die

Densitatea de putere



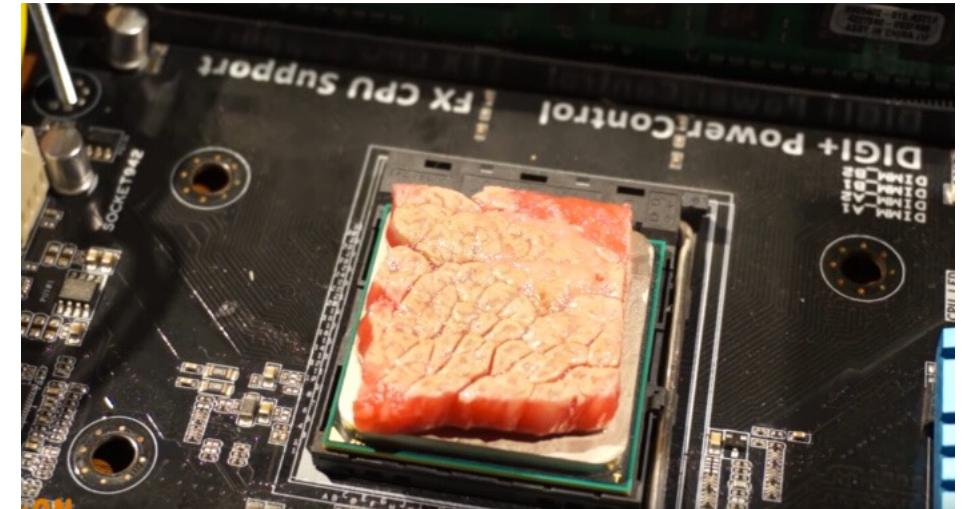
Imaginea termică a unui circuit



Circuitele CMOS își micșorează viteza la creșterea temperaturii

- Probleme de eficiență
- Probleme de răcire

Dacă tot nu v-ați convins



Cooking with microprocessors

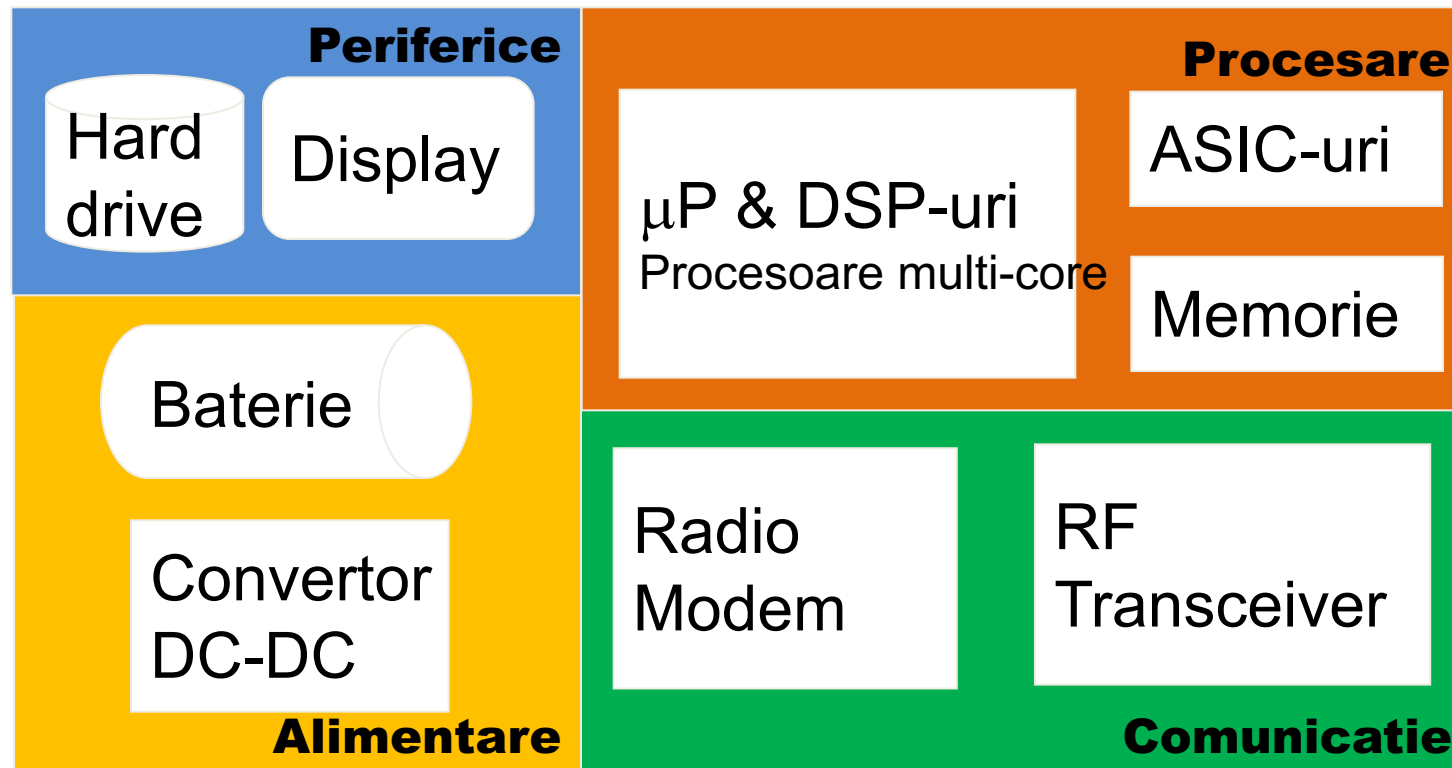
<https://www.youtube.com/watch?v=Q2a5nj7wwdQ>

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

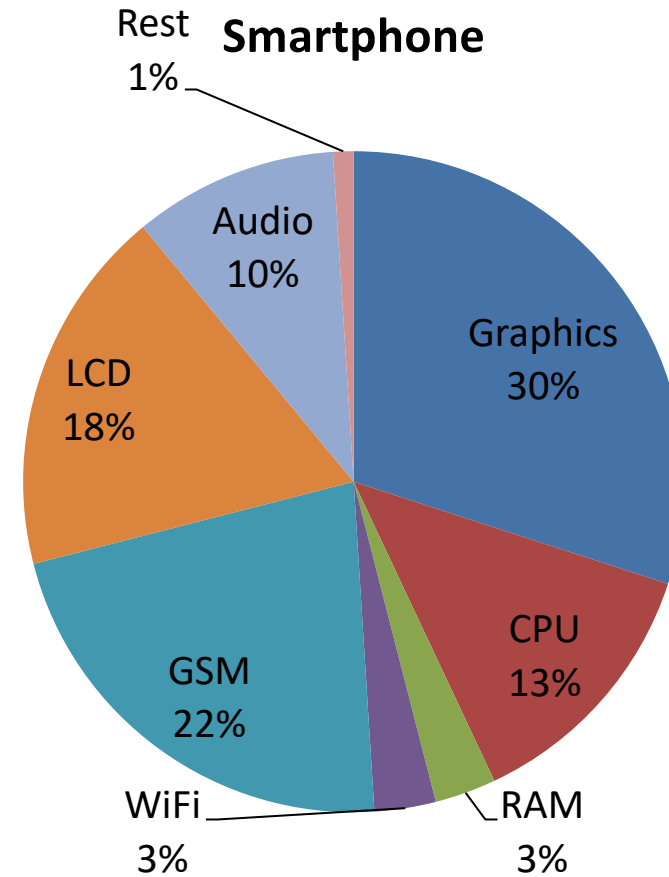
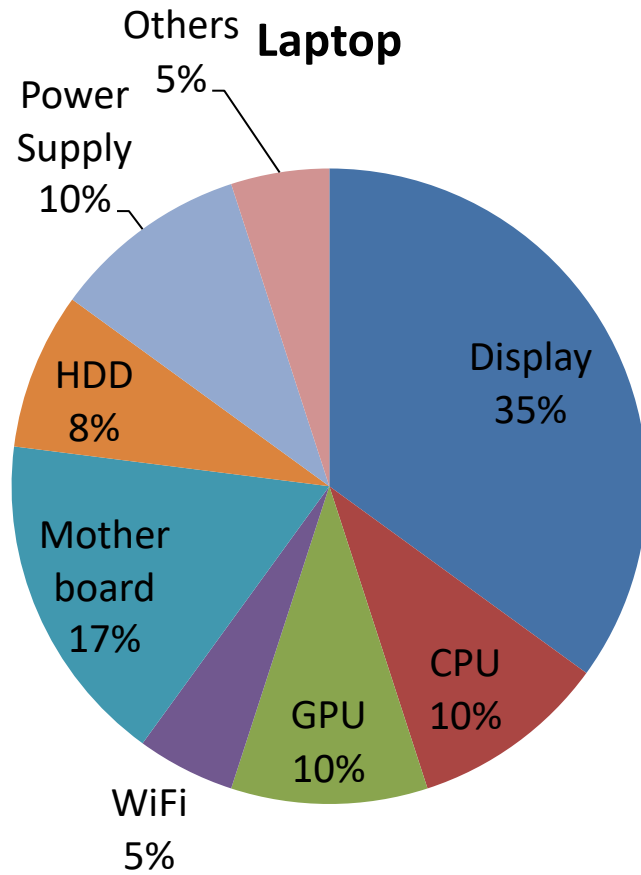
Problema nu este doar în embedded

- Portabile (smartphone, laptop, tablete)
 - Durata de viața 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?

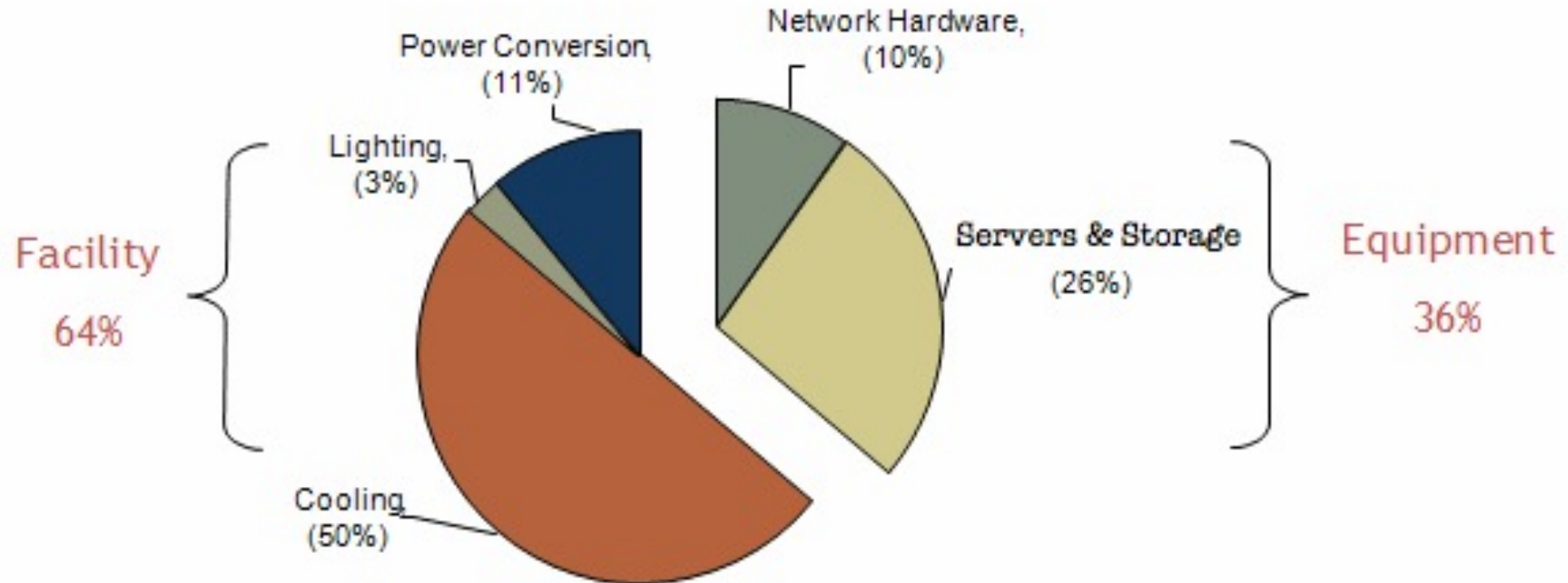


Comparație: Consumul de energie PC - Embedded

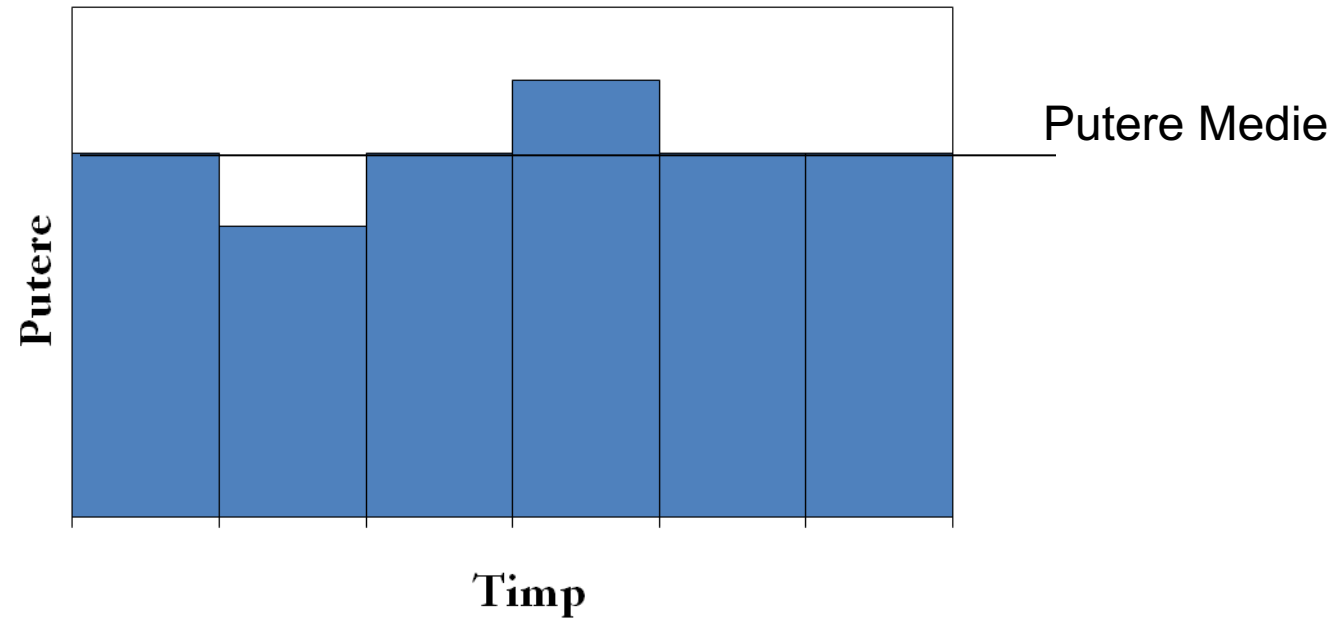


Comparație: Bugetul energetic al unui data center

Typical Data Center Energy Consumption



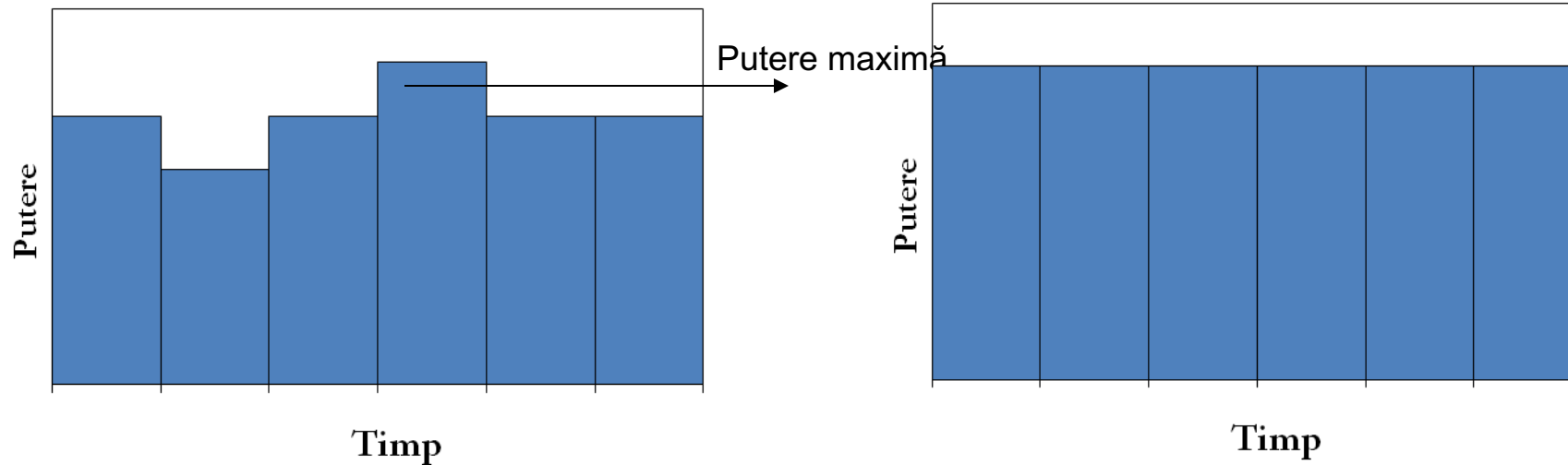
Putere versus Energie



- Energia este un atribut scalar al obiectelor și se măsoară în Jouli
- Puterea = Rata de consum a energiei și se măsoara 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

Alte metrice importante



- 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.

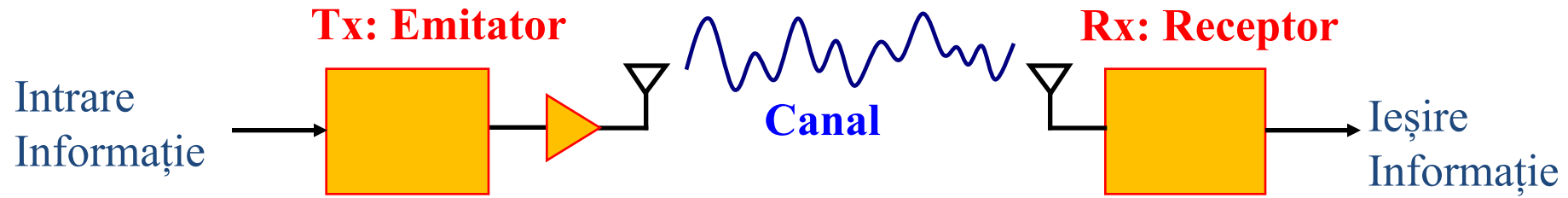
Costul procesării pentru embedded uP

- Procesoare folosite frecvent în embedded:
 - Atmel AVR, Intel 8051, StrongARM, XScale, ARM Thumb
- 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.

Transmisia Radio

- 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

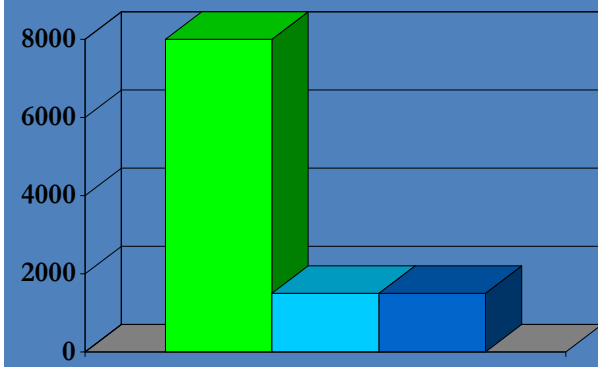
$$E_{RF}$$

Amplificare

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

Electronica
de recepție

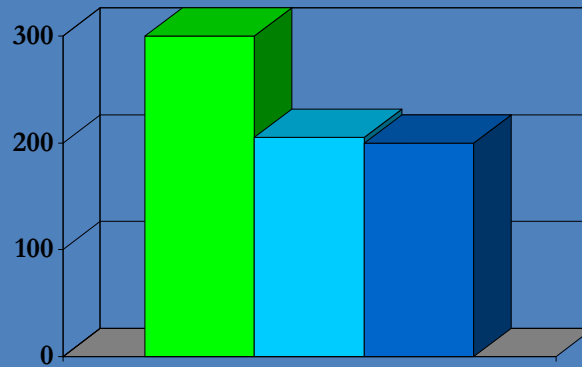
nJ/bit



E_{RF} E_{elec}^{Tx} E_{elec}^{Rx}

~ 1 km (GSM)

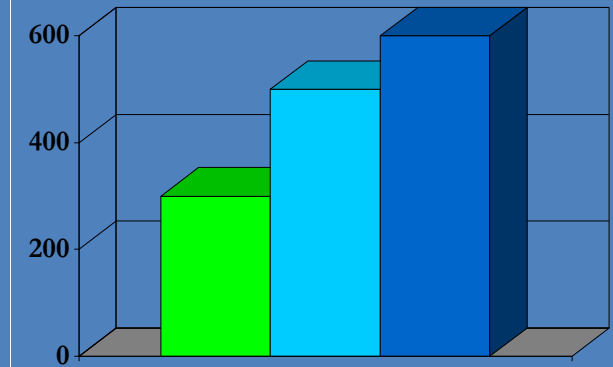
nJ/bit



E_{RF} E_{elec}^{Tx} E_{elec}^{Rx}

~ 50 m (WLAN)

nJ/bit

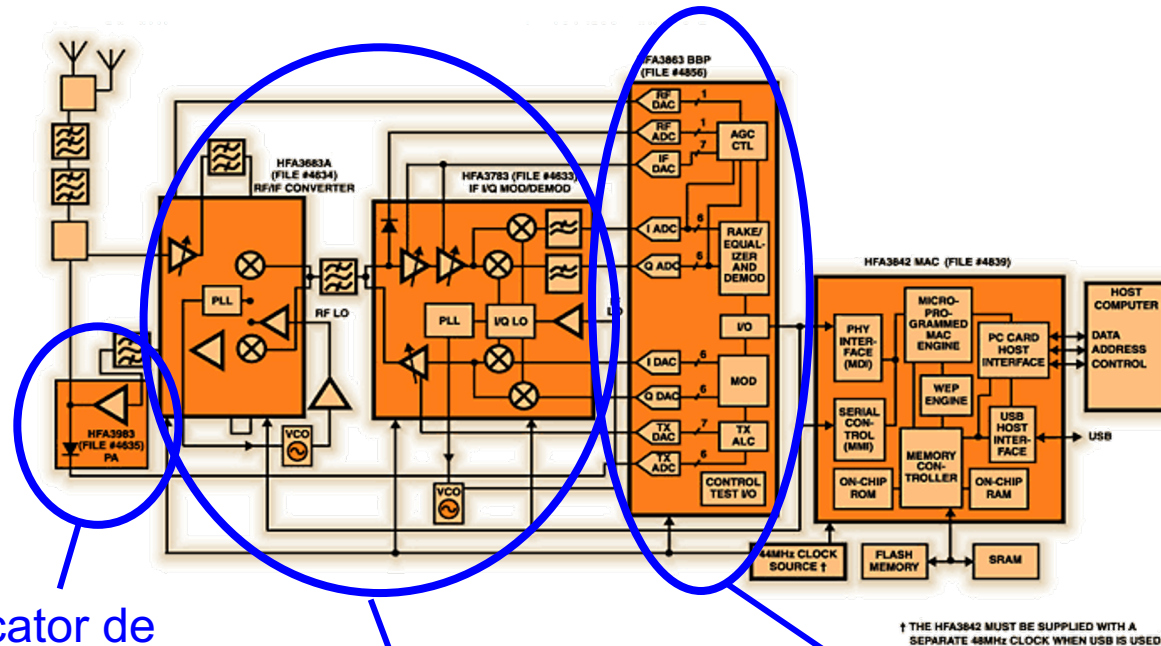


E_{RF} E_{elec}^{Tx} E_{elec}^{Rx}

~ 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

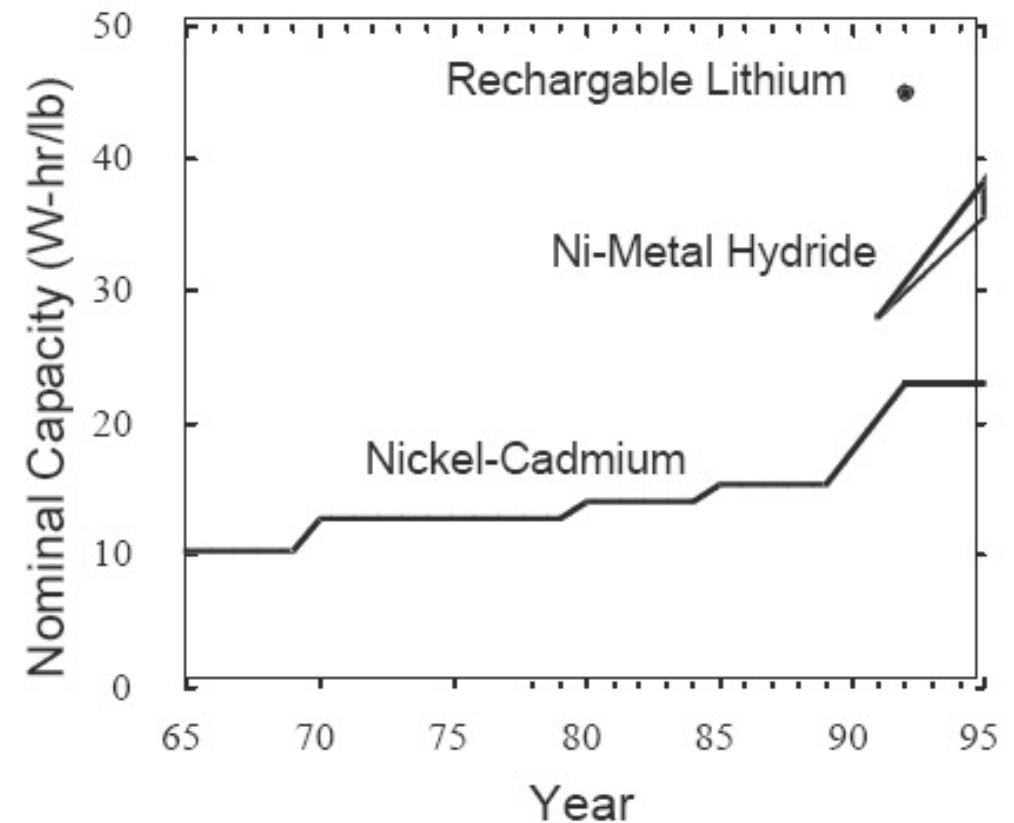
- Platforme de acționare, propulsie și interacțiune cu mediul
 - Montate pe roboți mobili
 - Antene sau senzori care pot fi acționați
- Eficiența energetică variază și nu este încă bine studiată
- Câteva considerente:
 - Acționarea este făcută de obicei prin arderea unui combustibil, care are o densitate 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 odată la zece ani



Primul telefon mobil

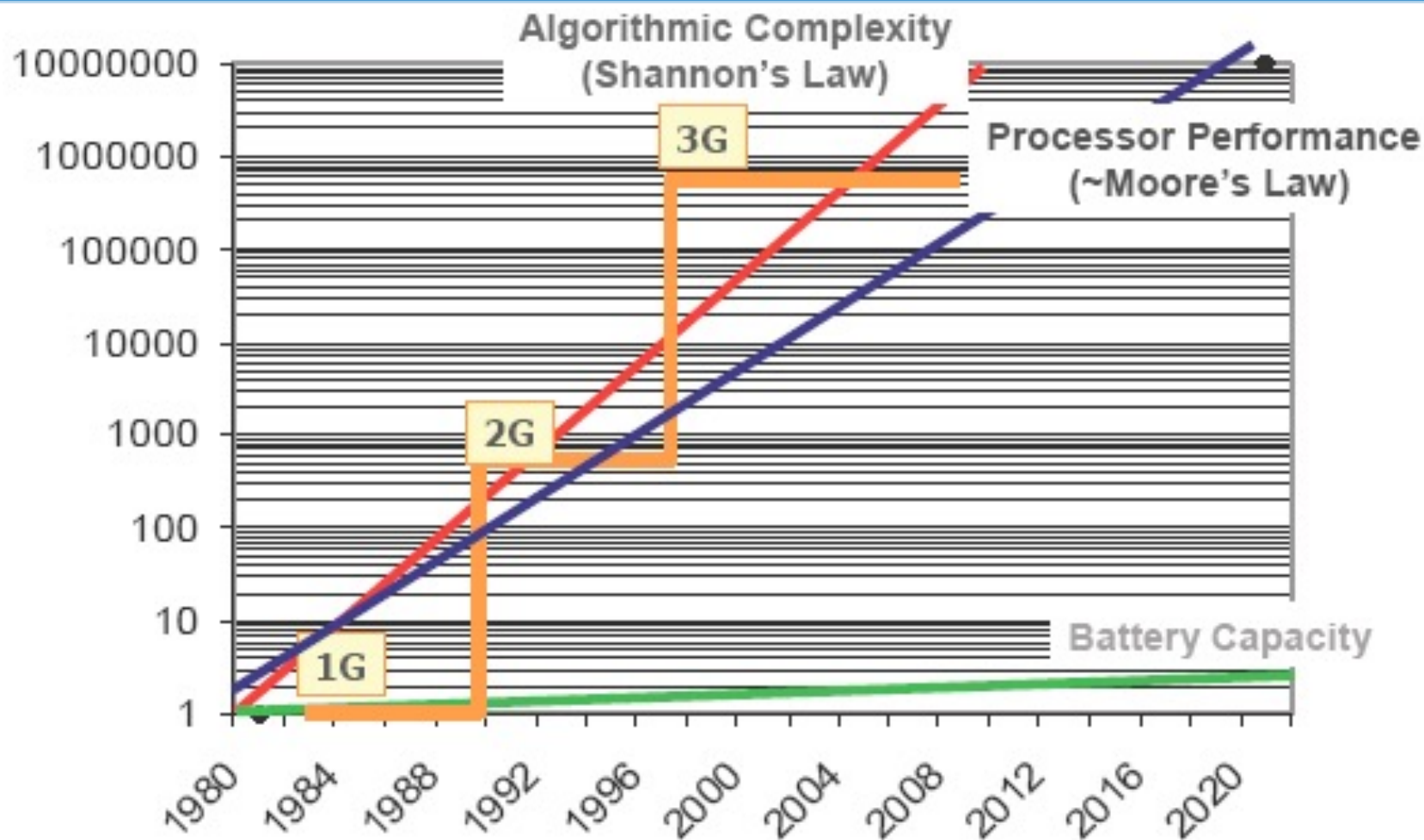


Batteries are hard stuff

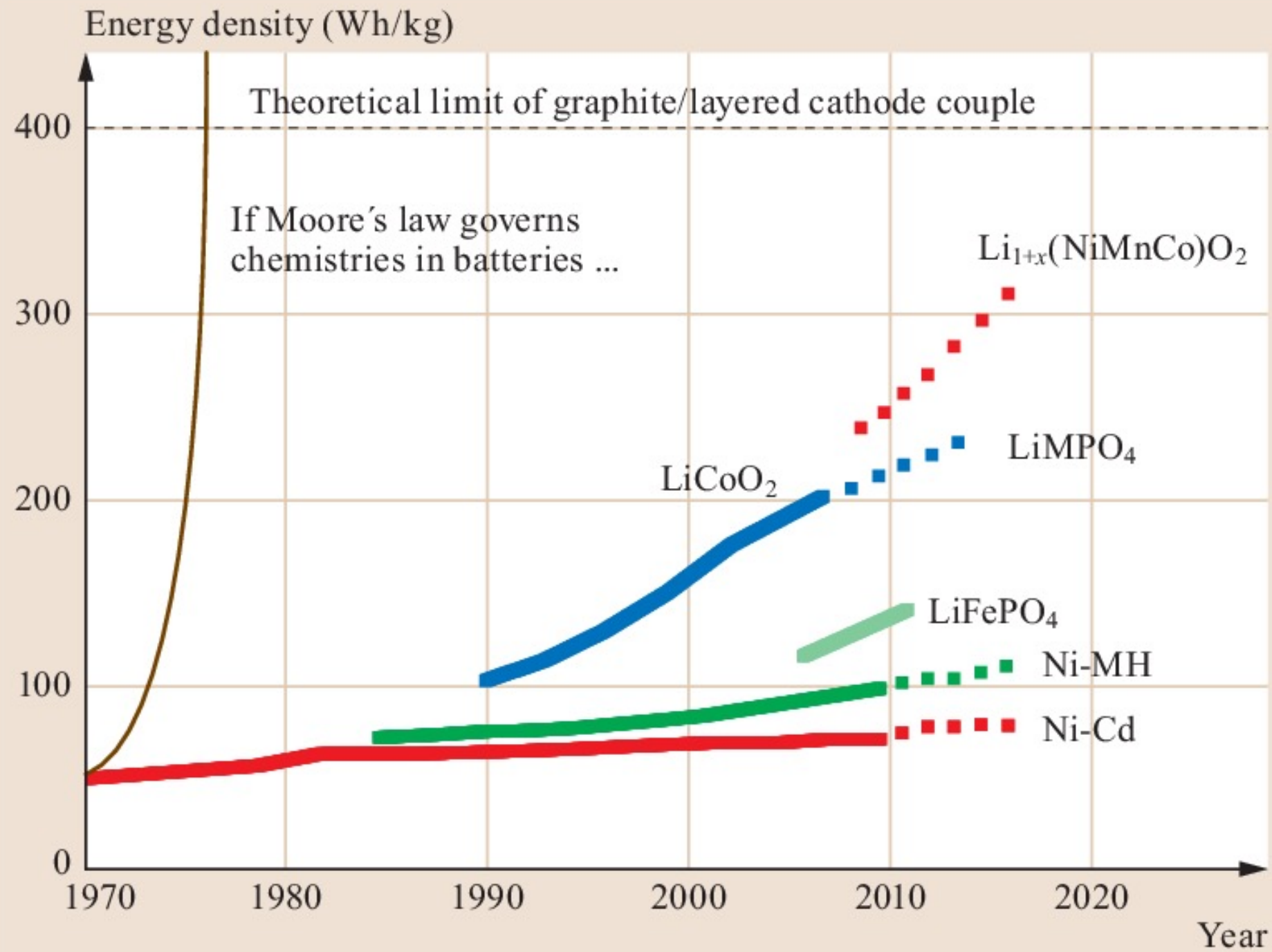


<http://dilbert.com/strips/comic/2001-05-31/>

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

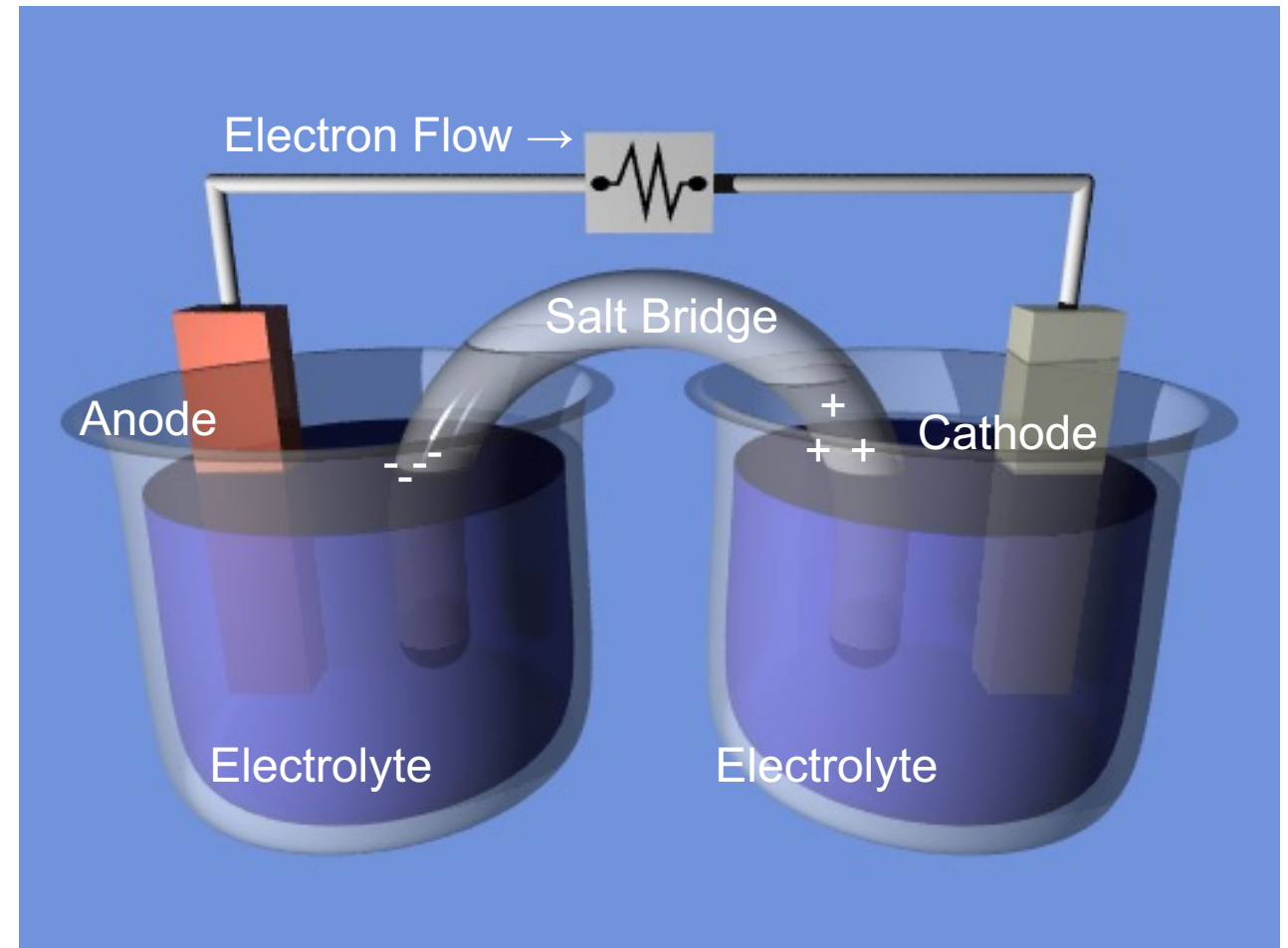


Bateriile nu respectă legea lui Moore!!!



Cum funcționează bateriile electrochimice

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



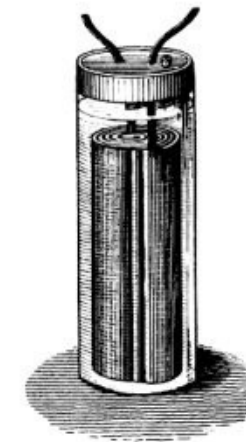
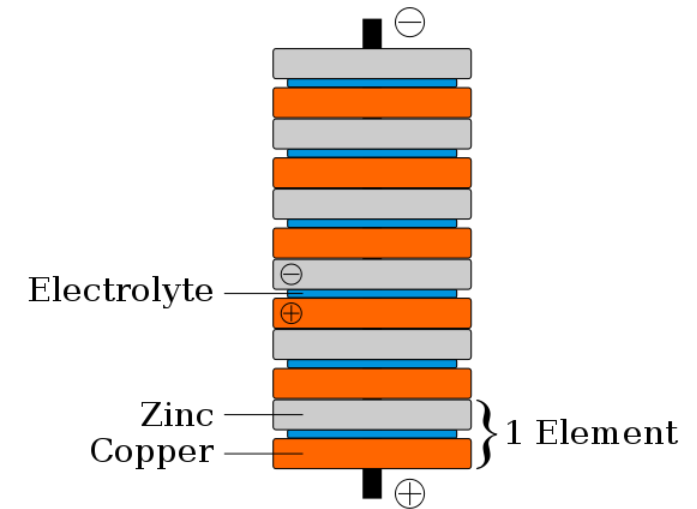
Istoria bateriilor electrochimice

- “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.



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
- $Ah = (Wh) / emf$

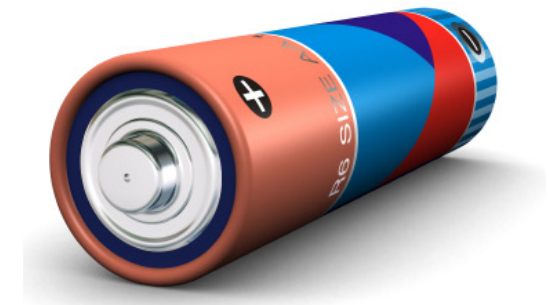
- Lead Acid
- Nickel-Cadmium
- Nickel-Metal Hydride
- Li-ion

	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 ³)	25-60	25	70-100	80-200
Power density (MW/m ³)	< 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.

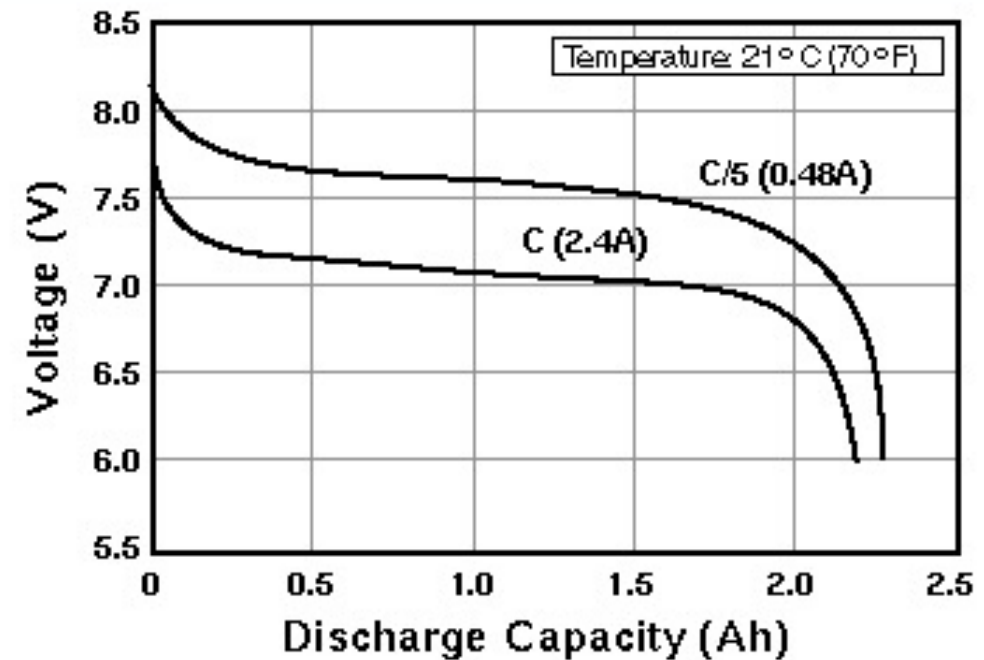
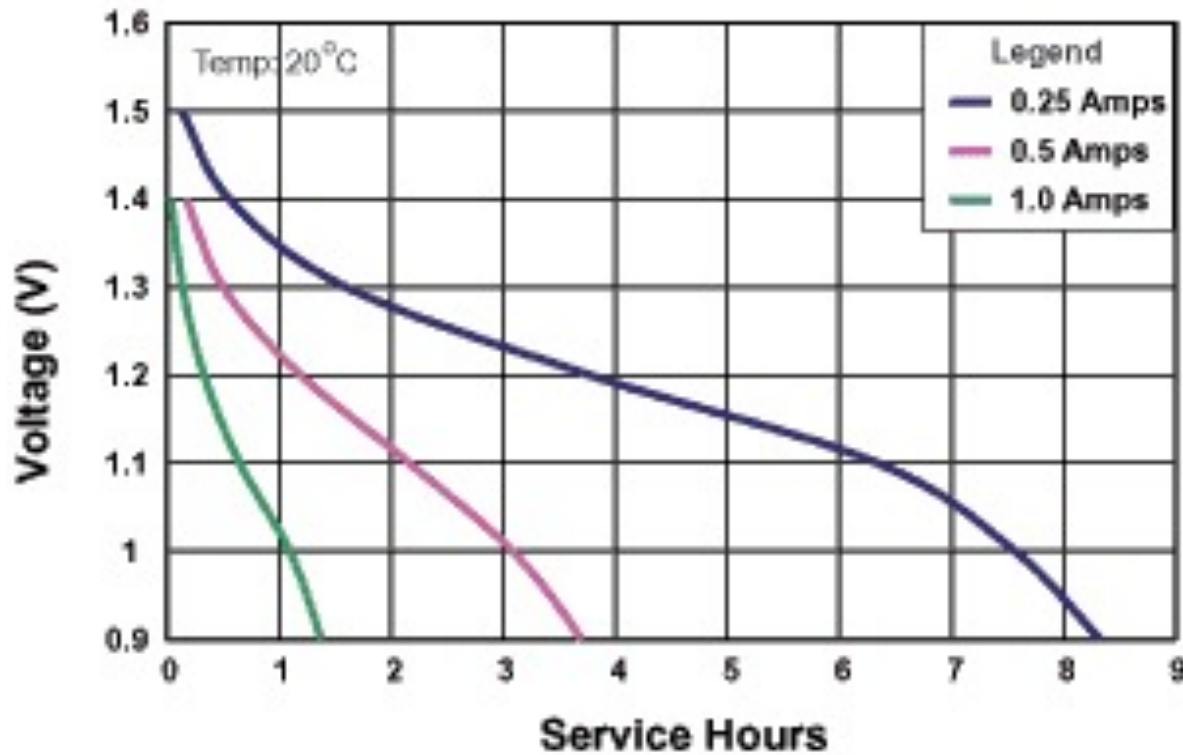
Baterii Lithium-Ion și Lithium-Ion Polymer

- 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



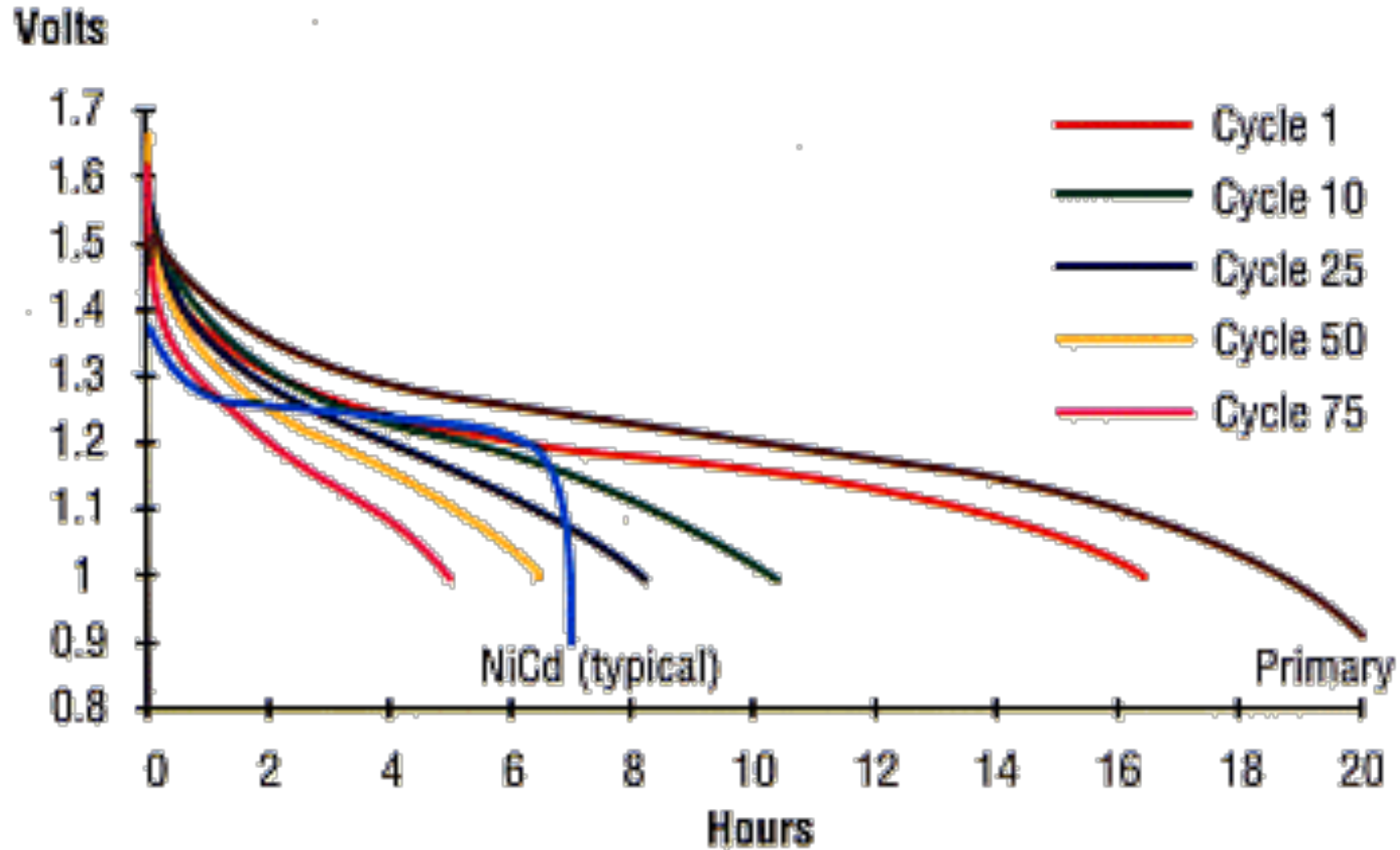
Curbe de descărcare

Typical Ultra AA Discharge Characteristic

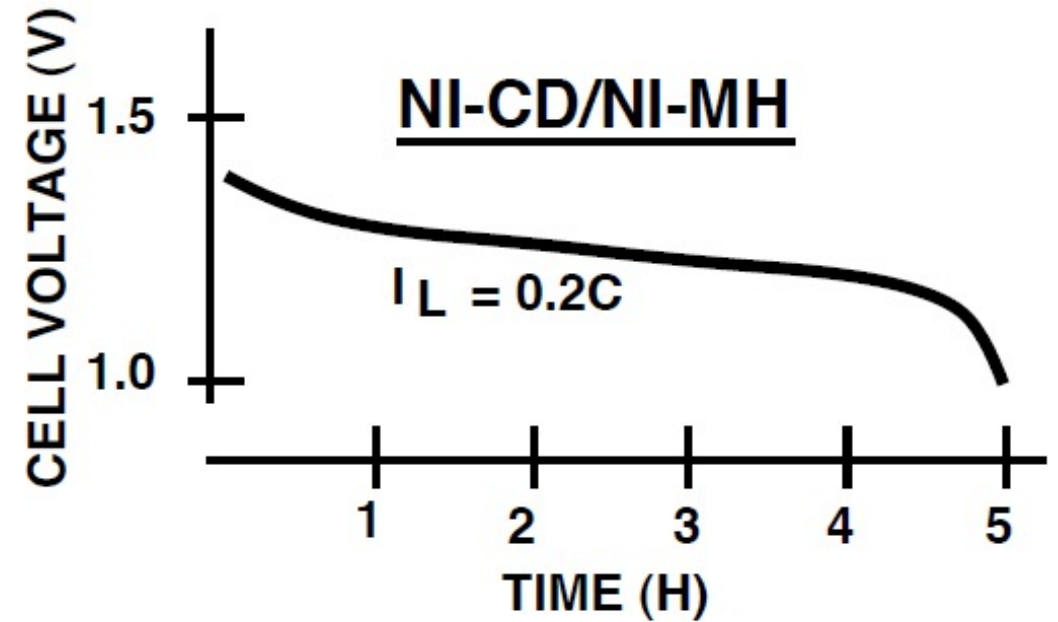
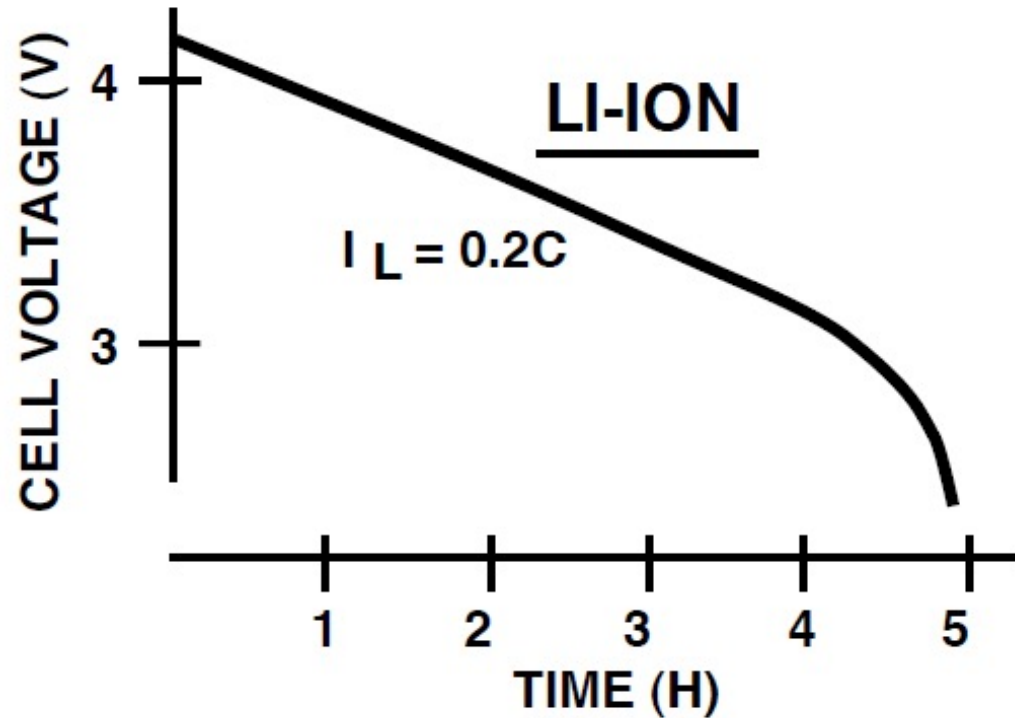


Voltage and capacity of DURACELL DR30 Ni-MH batteries at various discharge temperatures and rates.
[Conditions: Charge: 1C to $-\Delta V = 60\text{mV}$ @ 21°C (70°F)]

Descărcare acumulatori. Alcaline vs. NiCd



Curbe descărcare Li-ion vs. NiMH



Tehnologiile actuale de fabricație a bateriilor nu sunt adecvate

Tehnologie	Reincarcabil?	Wh/litru
Alkaline MnO ₂	NU	347
Silver Oxide	NU	500
Li/MnO ₂	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\$
 - **Aceași cantitate** de Li-Ion durează 3 h, dar costă > 40\$

Surse de energie: Comparație

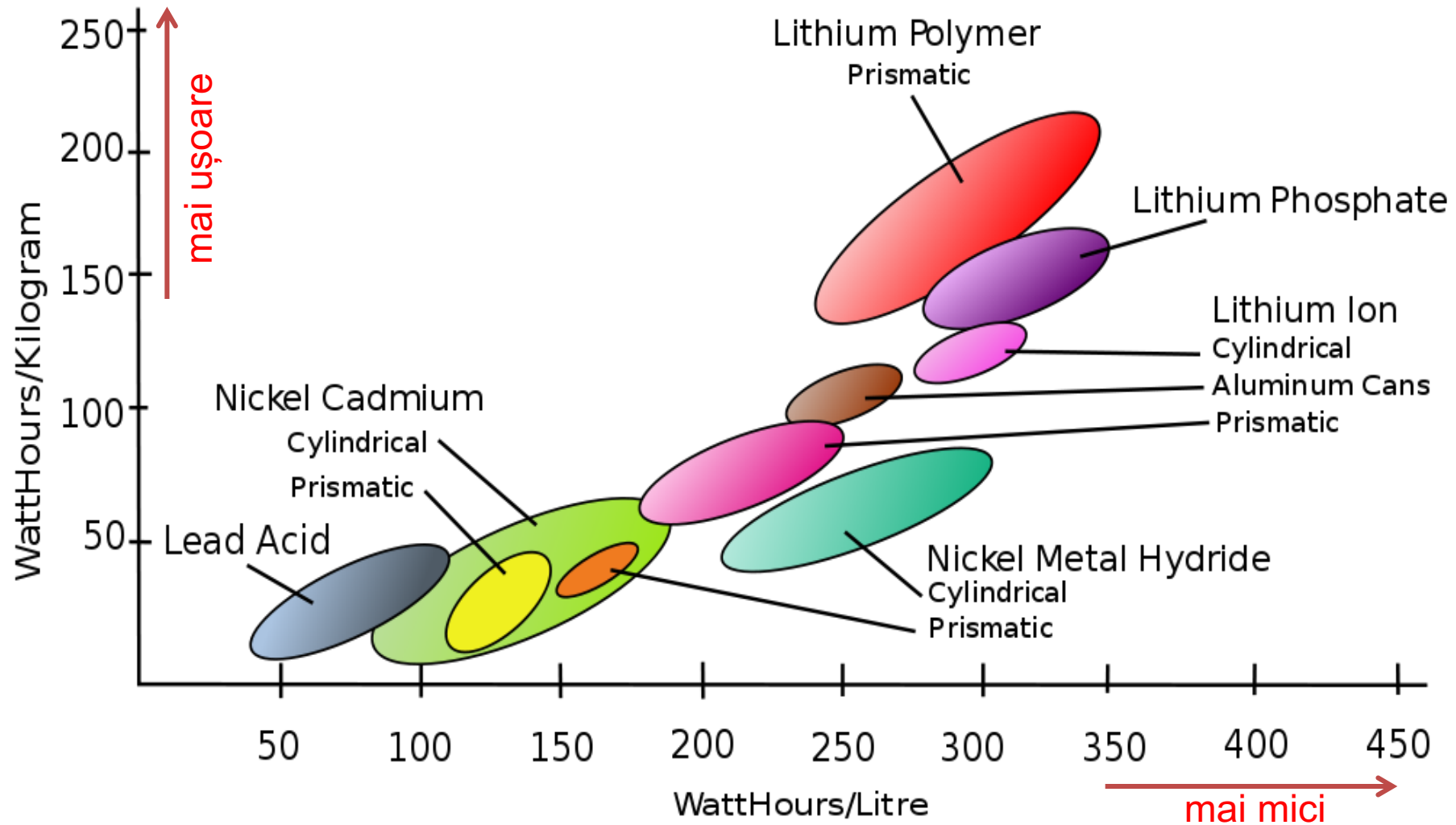
	Densitate de Energie	Sursa Estimarii
Baterie (Zinc-Aer)	1050 -1560 mWh/cm ³ (1.4 V)	Date producator
Baterie(Lithium ion)	300 mWh/cm ³ (3 - 4 V)	Date producator
Solar (Exterior)	15 mW/cm ² - direct in soare 0.15mW/cm ² - inorat.	Date producator si teste
Solar (Interior)	.006 mW/cm ² - pe birou 0.57 mW/cm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

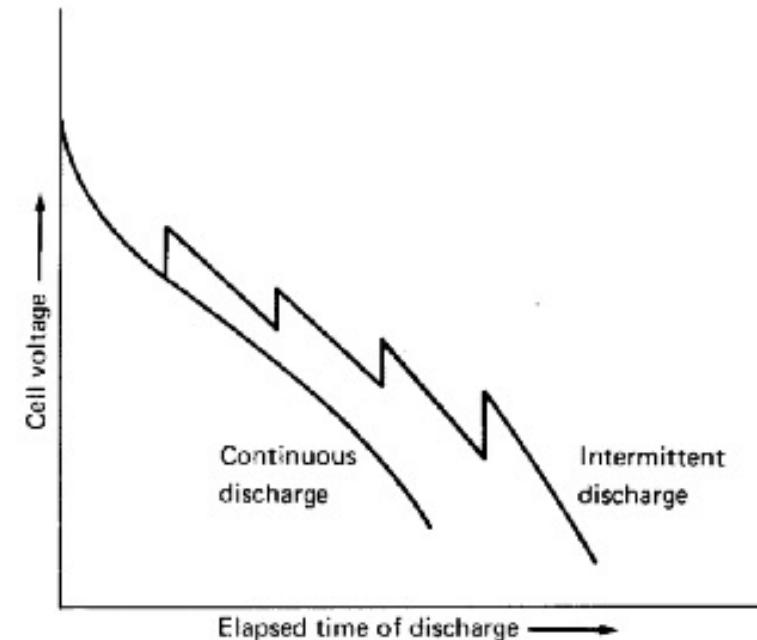
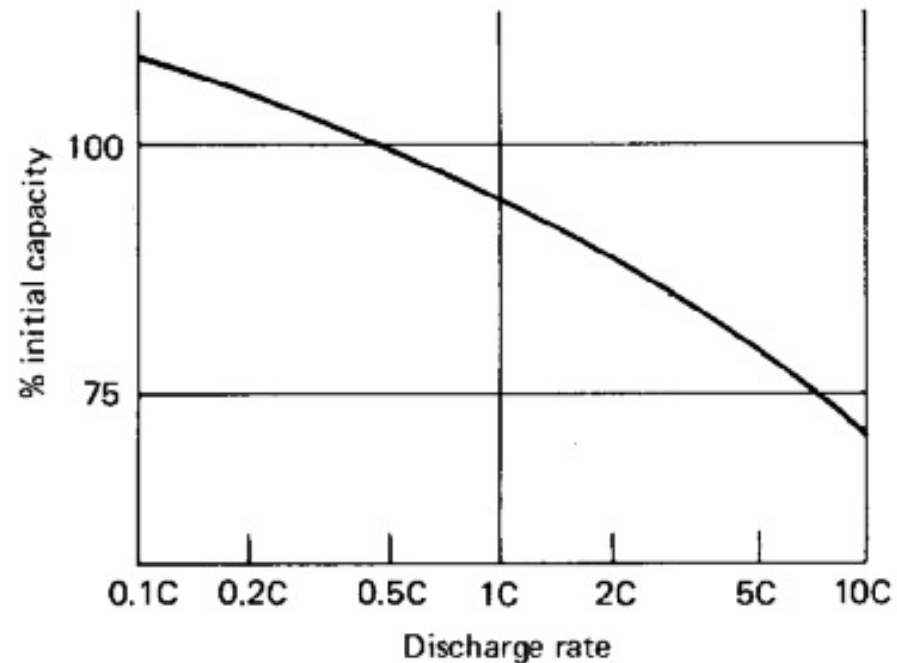
- Teoretic, capacitatea unei baterii este determinată de cantitatea de material activ din celulele ei
 - Bateriile sunt modelate ca niște surse constante de energie
- În realitate, capacitatea nominală depinde de modul în care bateria este descărcată
 - Rata de descarcare (curentul dat în sarcină)
 -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



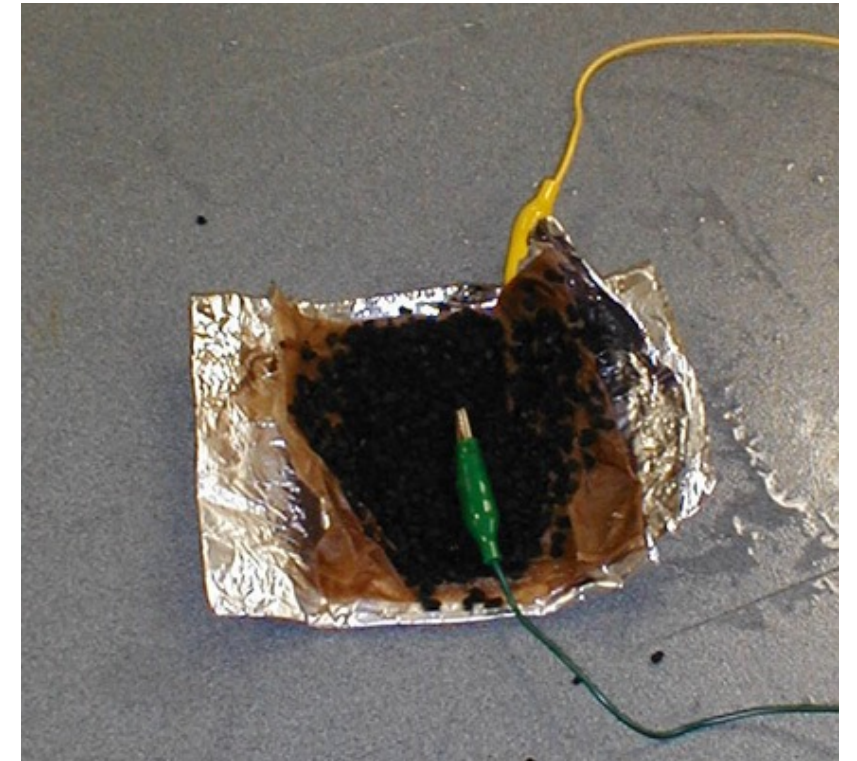
- Bateria aluminiu-aer
 - Folosește reacția de oxidare a aluminiului pentru a genera electricitate
 - Are o densitate de energie foarte mare ($\sim 1V, 100mA$)
- Home made!

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

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

http://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_battery

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

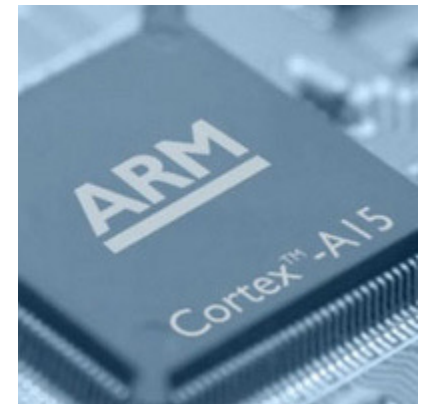
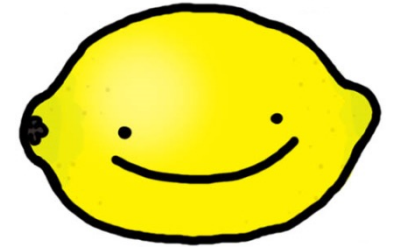


O lămâie poate genera o tensiune de 1V și un curent mediu de 0.1mA pentru aproximativ o oră.

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