

Sisteme Incorporate

Cursul 3

Consumul de Energie in Embedded
Analiza din Perspectiva Hardware

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



OHM NEVER FORGOT HIS
DYING UNCLE'S ADVICE.

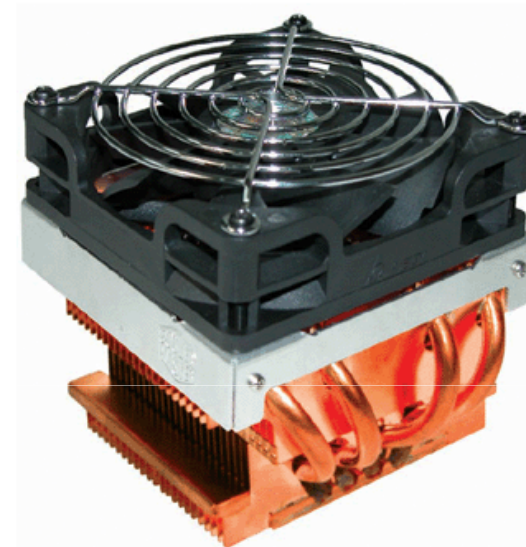
Design Constrans de Resurse

- Embedded Design -> Constrangeri de Resurse
- Constrangerile sunt specificate ca niste cerinte non-functionale
- Cerinte non-functionale
 - Pret, Dimensiuni, Greutate -> Putina memorie
 - Consum baterie/caldura -> Timp/viteza de lucru
 - Deadline -> Timp minim de dezvoltare garantat

De ce ne-ar preocupa consumul?



Durata de viata a bateriei

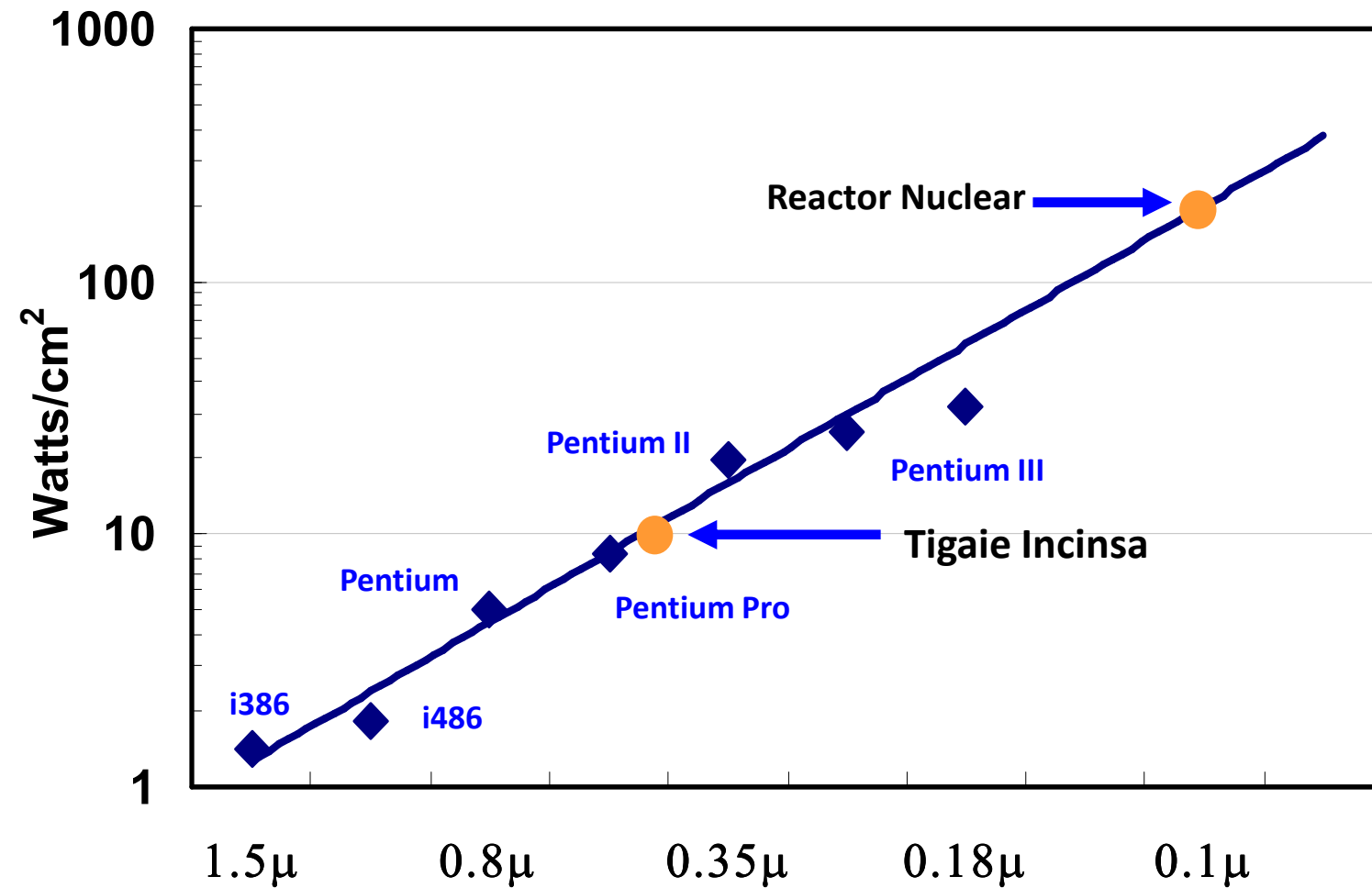


Probleme de disipare a caldurii: racire,
design carcasa, fiabilitate, viteza de executie

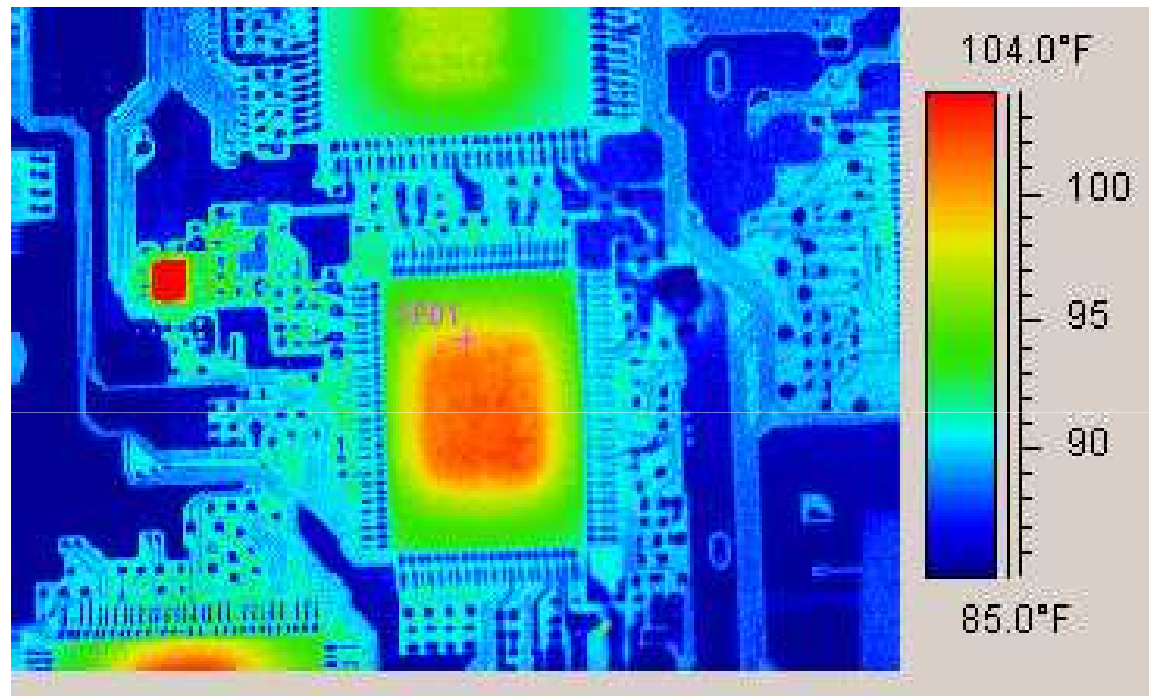


Mediul inconjurator

Densitatea de energie a unui uP



Imaginea termica a unui circuit



Circuitele CMOS isi micsoreaza viteza la cresterea temperaturii

- Probleme de eficienta
- Probleme de racire

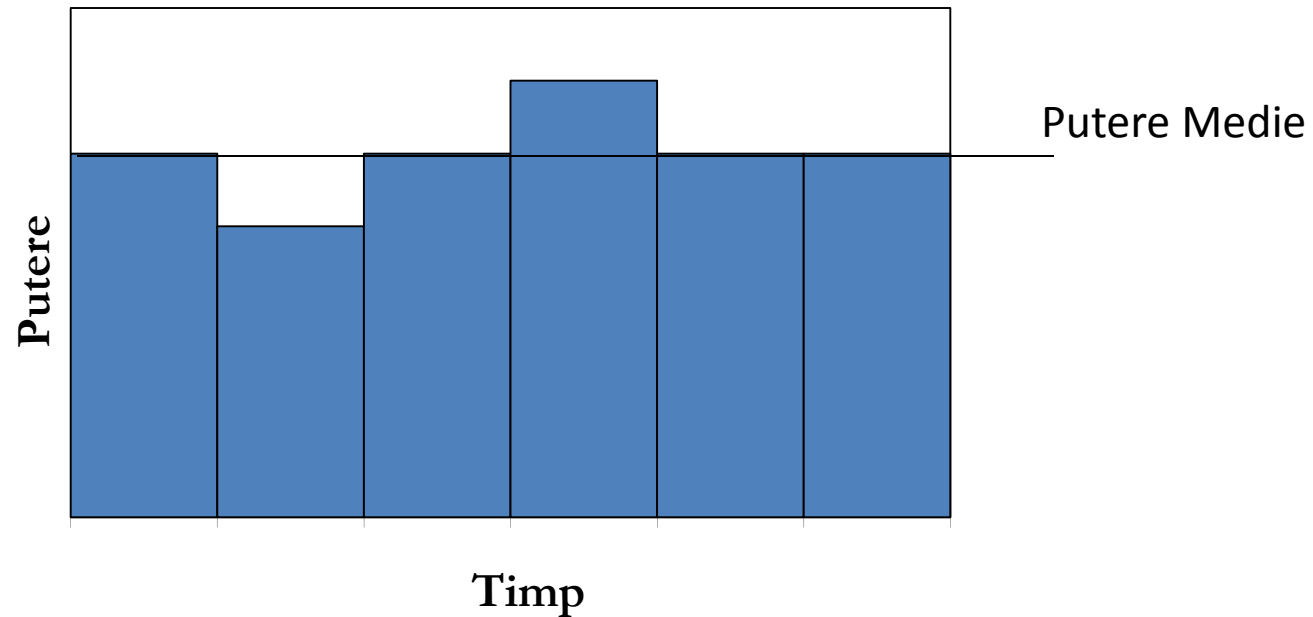
Daca tot nu v-ati convins



Problema nu este doar in embedded

- Portabile (telefoane celulare, laptop, PDA)
 - Durata de viata a bateriei e critica
- Desktop
 - 400 milioane de PC-uri in lume
 - 0.16PW (PetaWatt = 10^{15} Watt) putere disipata
 - Echivalentul a 26 reactoare nucleare
- Centre de calcul
 - 1 singur rack de server consuma intre 5 si 20kW
 - Sute de rack-uri intr-o singura camera

Putere versus Energie

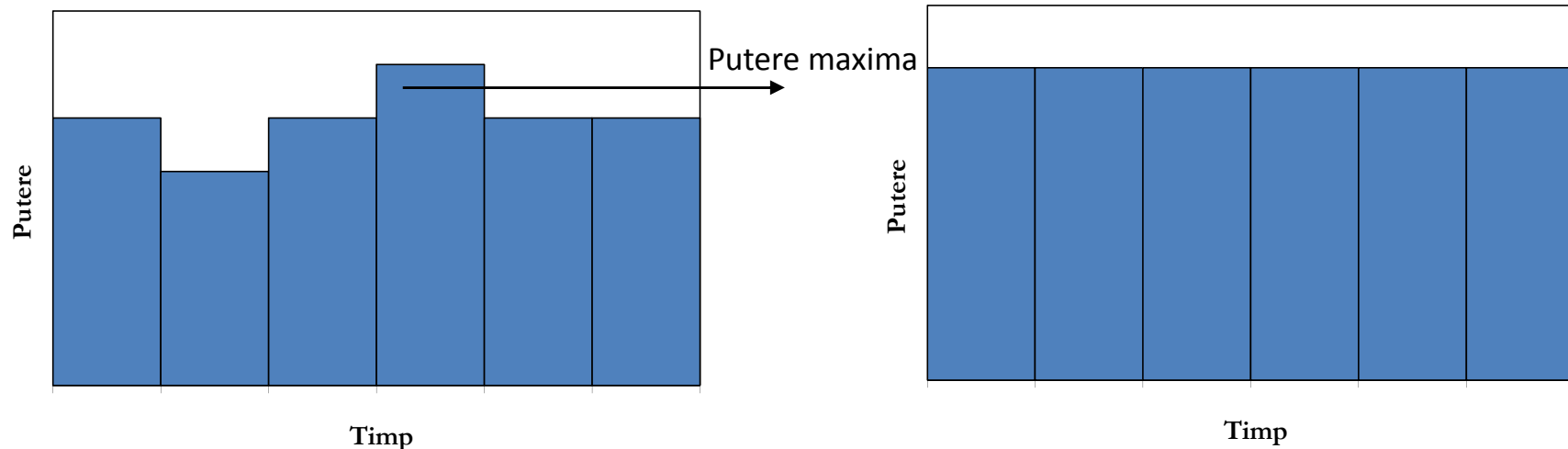


- Energia este un atribut scalar al obiectelor si se masoara in Jouli
- Puterea = Rata de consum a energiei si se masoara in Jouli/s (Watt)
- Puterea medie = (Energie / Timp de executie)

Putere si Energie

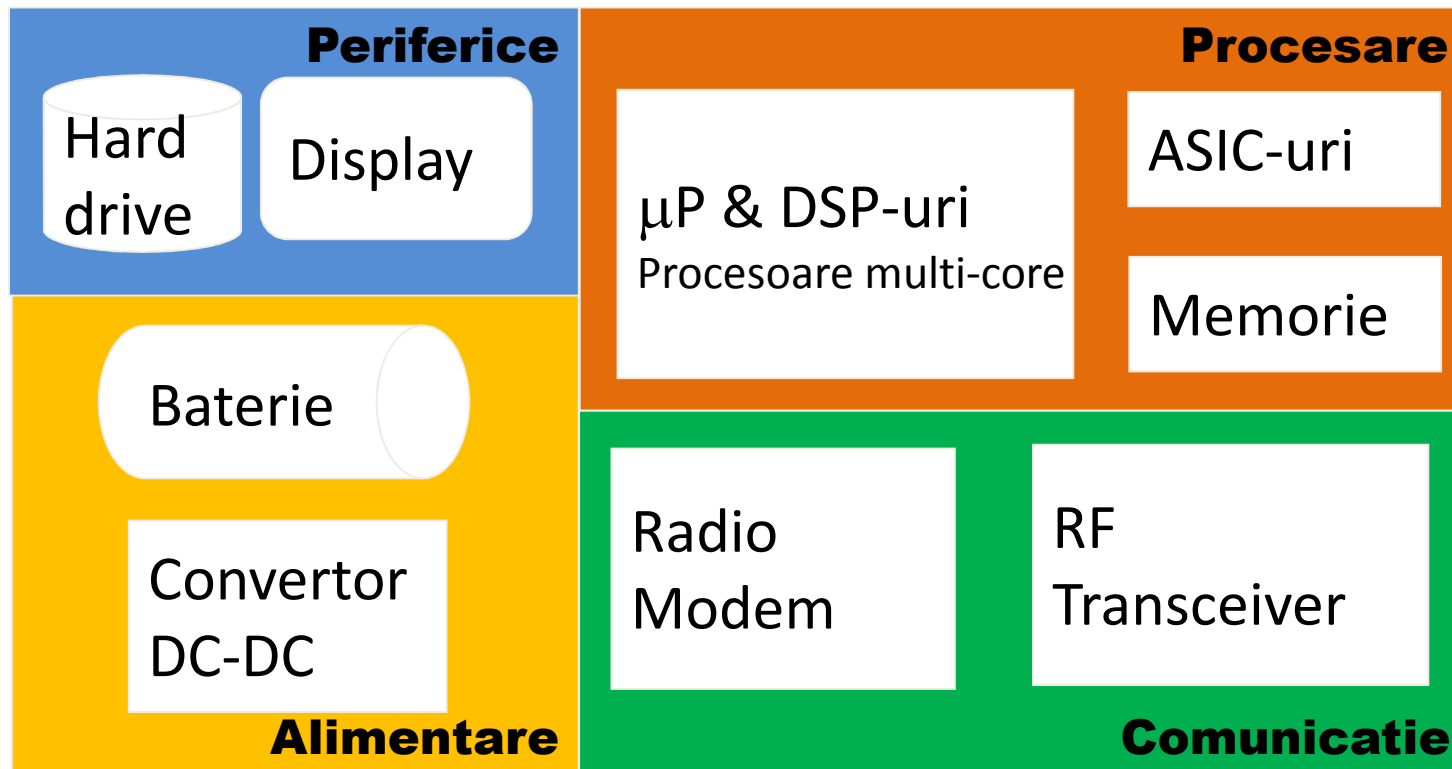
- Reducerea puterii medii reduce energia daca timpul de executie ramane neschimbat
- Energia este importanta pentru device-urile alimentate prin baterii
 - Viata unei baterii este influentata de energia consumata
- Puterea medie este importanta in reducerea incalzirii
 - Sistemele embedded au facilitati rudimentare de racire, de cele mai multe ori din cauza constrangerilor de marime si greutate

Alte metrice importante

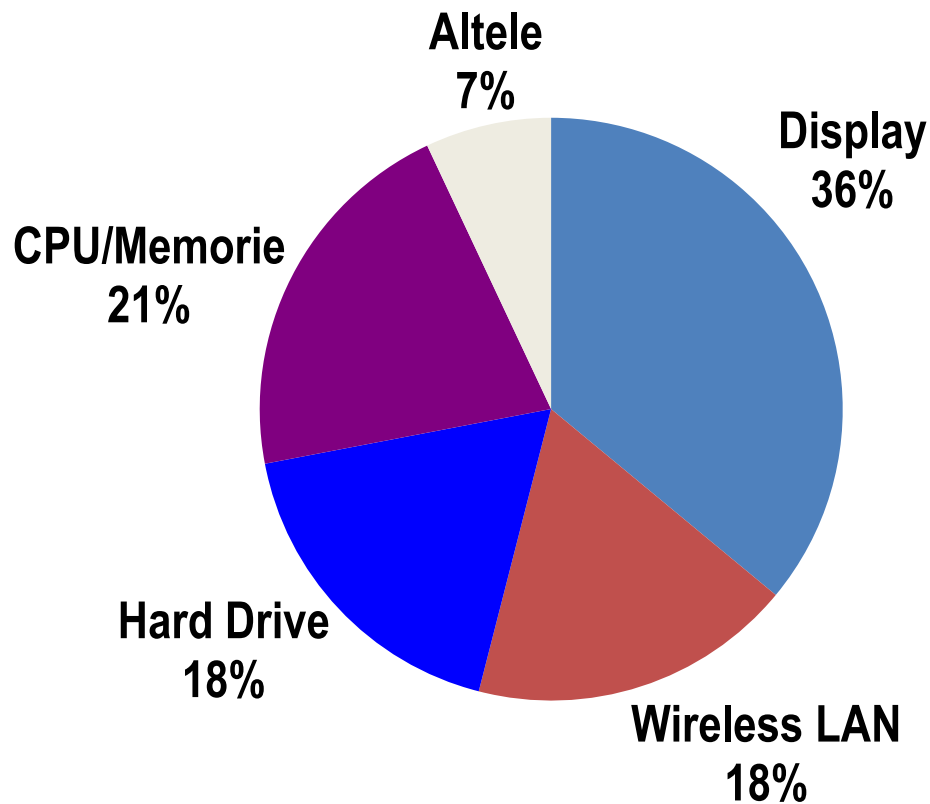


- Energia totala si puterea medie sunt la fel in ambele situatii de mai sus
 - Puterea maxima: Poate cauza defectiuni daca depaseste o valoare de prag
 - Profil temporal: Disiparea variabila de putere poate reduce semnificativ timpul de viata al unei baterii
- Schimbarile bruste de putere disipata pot perturba nivelele logice provocand functionarea defectuoasa a circuitului.

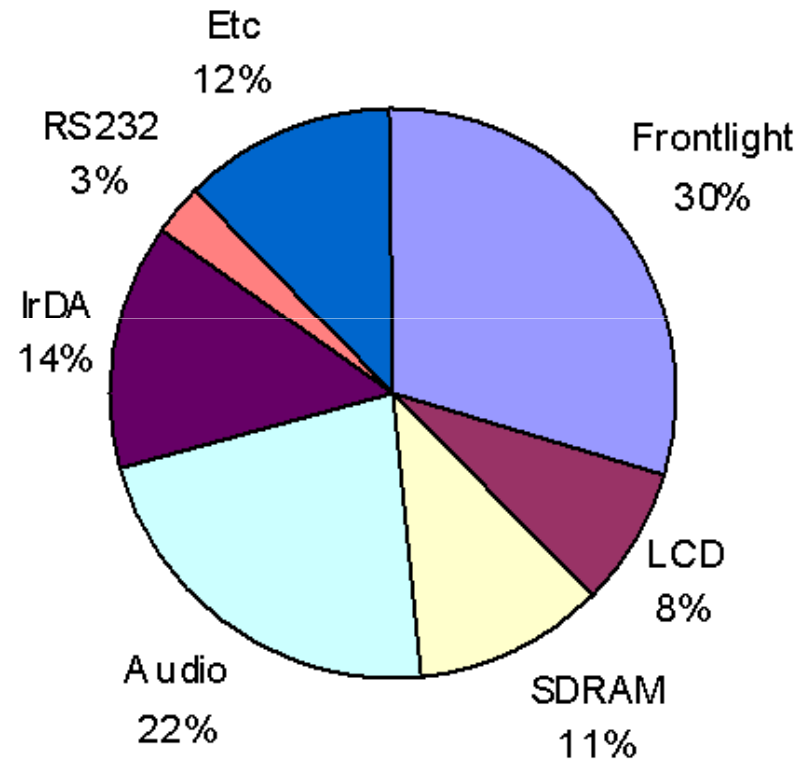
Care sunt marii consumatori de energie dintr-un sistem de calcul?



Comparatie: Consumul de energie PC - Embedded



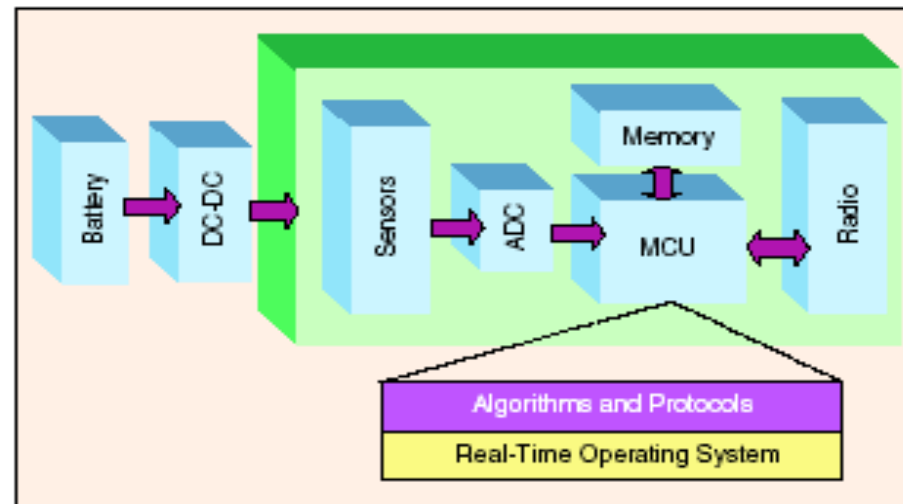
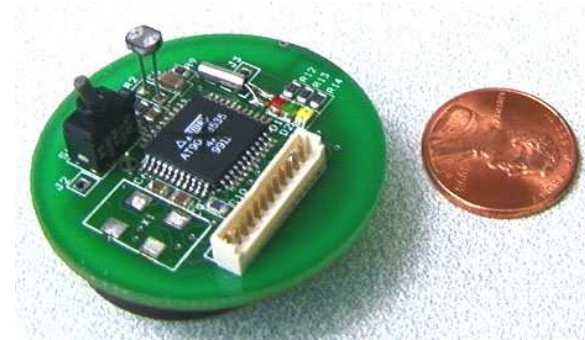
Laptop PC



PDA (Compaq iPaq)

Consumul de energie in WSN

- Procesare
- Radio
- Senzori
- Electro-mecanice
- Sursa de alimentare



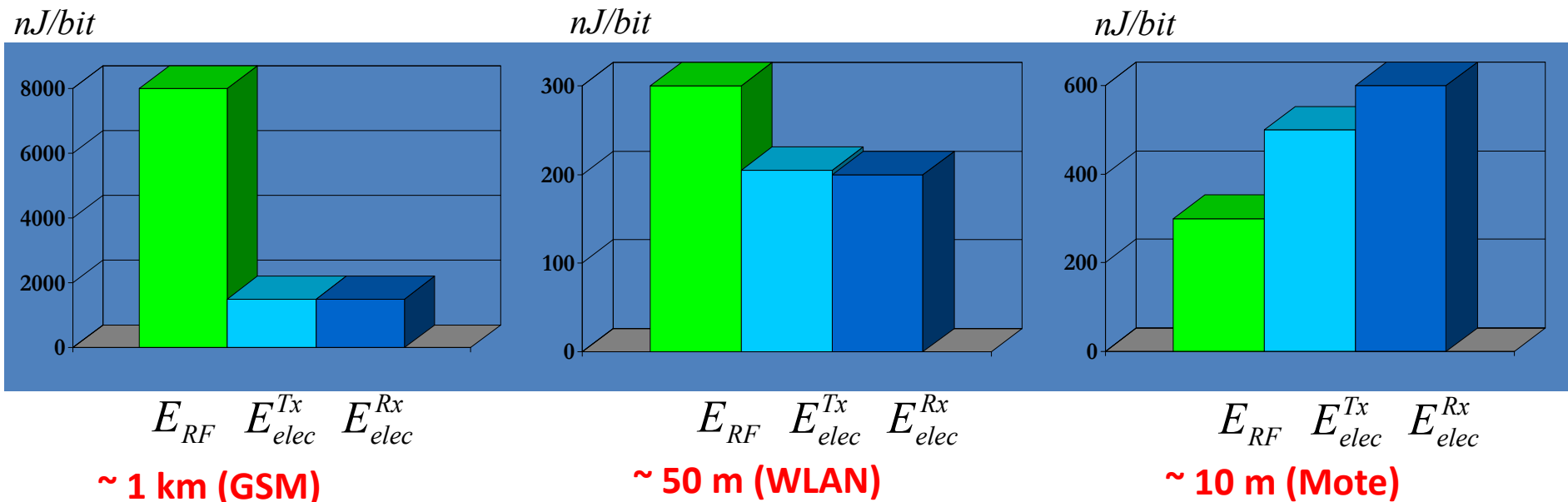
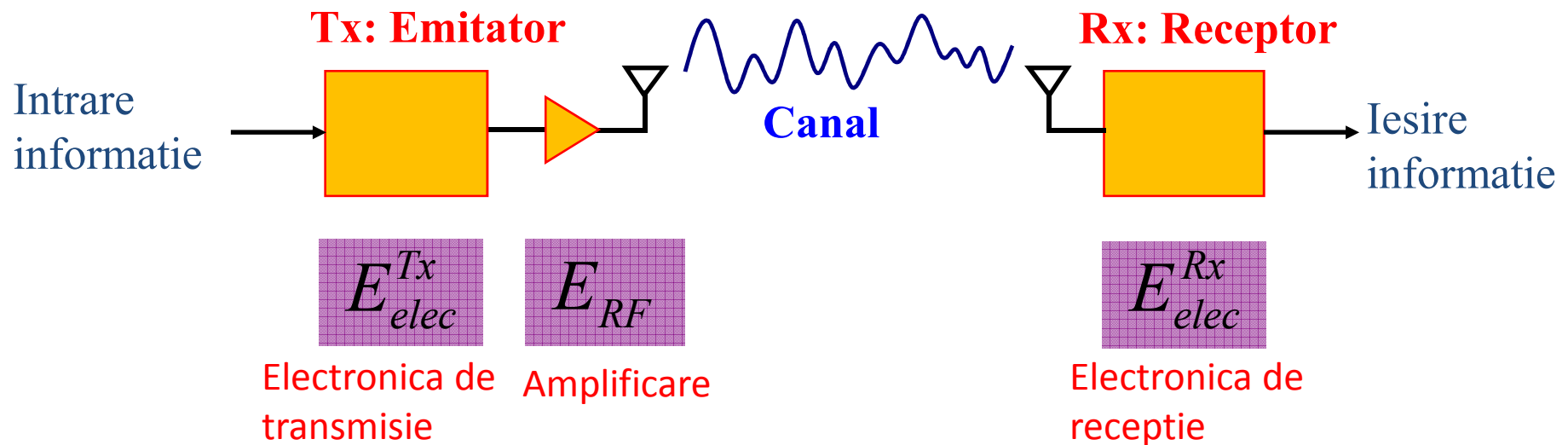
Costul Procesarii in WSN

- Procesoare folosite frecvent in WSN:
 - Atmel AVR, Intel 8051, StrongARM, XScale, ARM Thumb
- Valori diferite pentru consumul de energie electrica.
 - 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/Instructiune)
 - 480 MIPS/W for ARM Thumb @ 40 MHz (2.1 nJ/Instructiune)
 - Alte exemple:
 - 0.2 nJ/Instructiune pentru Cygnal C8051F300 @ 32KHz, 3.3V
 - 0.35 nJ/Instructiune pentru IBM 405LP @ 152 MHz, 1.0V
 - 0.5 nJ/Instructiune pentru Cygnal C8051F300 @ 25MHz, 3.3V
 - 0.8 nJ/Instructiune pentru TMS320VC5510 @ 200 MHz, 1.5V
 - 1.1 nJ/Instructiune pentru Xscale PXA250 @ 400 MHz, 1.3V
 - 1.3 nJ/Instructiune pentru IBM 405LP @ 380 MHz, 1.8V
 - 1.9 nJ/Instructiune pentru Xscale PXA250 @ 130 MHz, 0.85V
 - Sunt arhitecturi diferite pe 8, 16 sau 32 de biti!
- Pentru a fi cu adevarat eficient un chip trebuie sa aiba facilitati de power-management
 - Idle, sleep mode sau sa poata sa opereze la frecvente si tensiuni diferite.

Transmisia Radio

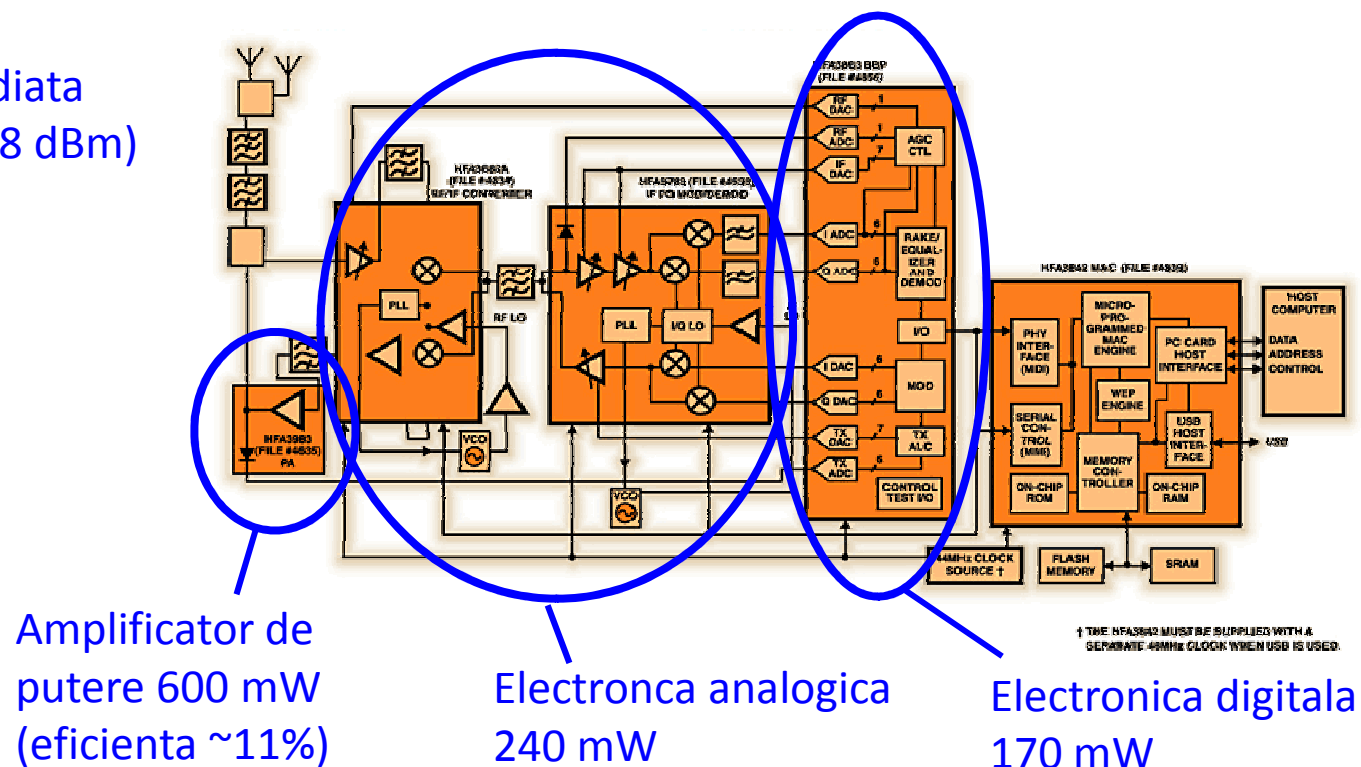
- O metrica puternica in estimarea performantelor intr-un transceiver radio este energia consumata pentru un bit de informatie
 - Depinde de modulatia adoptata
 - Determina distanta de emisie si alti parametri (nivelul de zgomot, atenuarea)
- Diferite estimari ale consumului pentru transmisie, receptie, mod idle si sleep
- Modulatie variabila, codare
- Costul curent: in jur de 150 nJ/bit pentru short range (5-10m)

Consumul de energie radio



Tendinte in electronica radio

Putere radiata
63 mW (18 dBm)



■ Tendinte

- ◆ Muta functionalitatea din partea analogica in cea digitala
- ◆ Electronica digitala beneficiaza cel mai mult de pe urma imbunatatirilor tehnologice

Senzori

- Sunt cateva surse importante de consum
 - Transducer
 - Procesare de semnal
 - analogic, digital
 - Conversie ADC
 - Consum foarte mare de energie
 - Depinde de viteza si rezolutia la care e facuta o conversie
 - Este important sa se aleaga o precizie suficienta pentru aplicatia respectiva
- Sunt foarte multe tipuri de senzori pe piata
 - Low-power
 - Temperatura, lumina, accelerometru
 - Medium-power
 - Acustic, magnetic
 - High-power
 - Foto, video, scanner laser

Actionari

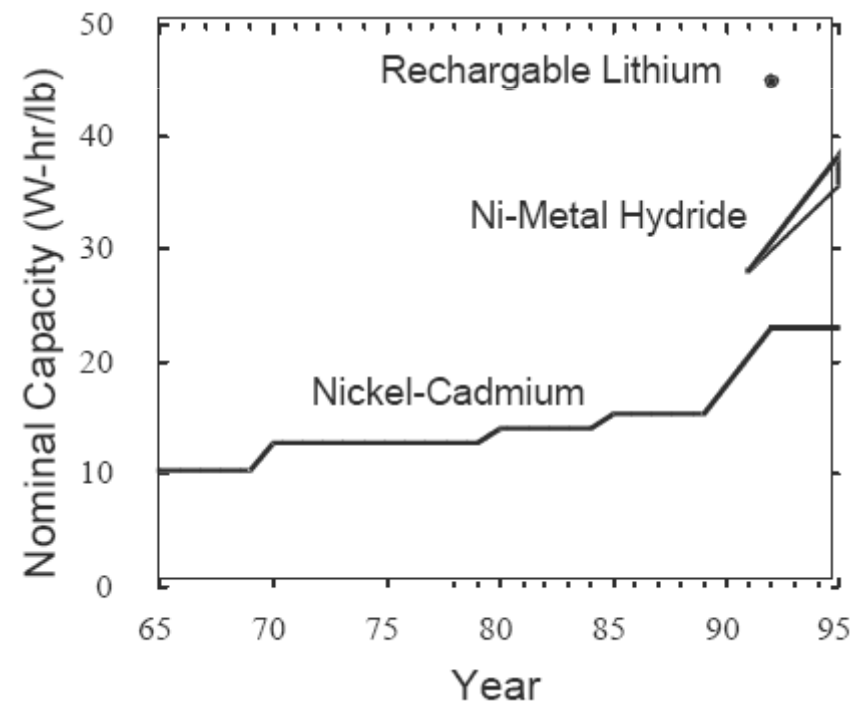
- Platforme de actionare, propulsie si interactiune cu mediul
 - Montate pe roboti mobili
 - Antene sau senzori care pot fi actionati
- Eficienta energetica variaza si nu este inca bine studiata
- Cateva considerente:
 - Actionarea este facuta de obicei prin arderea unui combustibil, care are o densitate energetica mult superioara unei baterii
 - Unele UAV-uri au un timp de zbor mult mai mare decat timpul de viata al camerei wireless instalate pe ele
 - O actionare facuta atunci cand este necesar poate avea avantaje considerabile
 - Repozitionarea mecanica a antenei poate permite receptionarea mai buna a semnalelor si reduce costul comunicatiei in general
 - Miscarea unor noduri intr-un WSN poate duce la o distributie mai uniforma si un timp de viata mai mare al retelei per ansamblu

Portabilitate: Capacitatea bateriilor este o problema

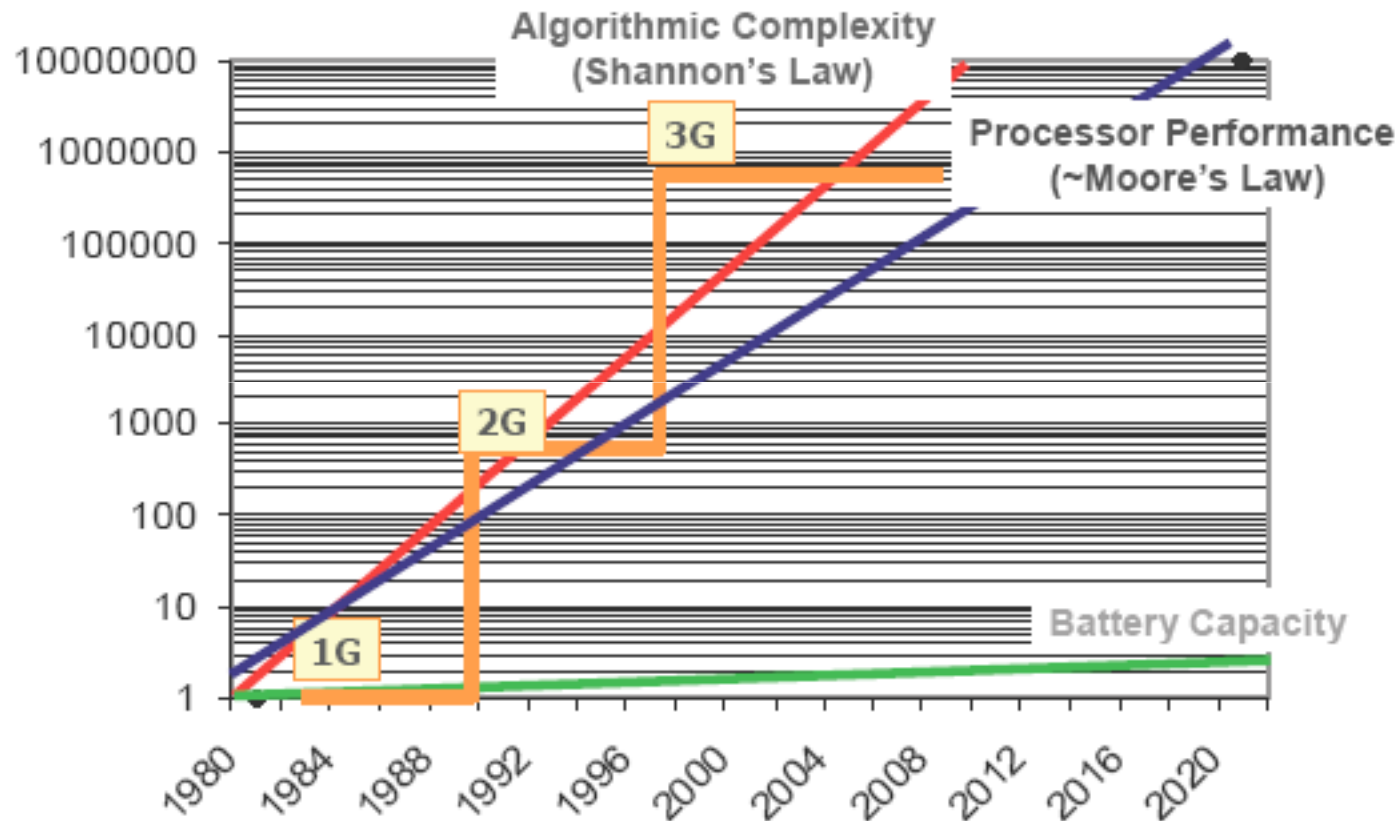
Capacitatea bateriilor se dubleaza odata la zece ani



Primul telefon mobil



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



Bateriile nu respecta legea lui Moore!!!

Tehnologiile actuale de fabricatie a bateriilor nu sunt adecvate

Tehnologie	Reincarcabil?	Wh/litru
Alkaline MnO₂	NU	347
Silver Oxide	NU	500
Li/MnO₂	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 viata de 1h si costa 20\$
 - Aceeasi cantitate de Li-Ion tine 3 h, dar costa > 80\$

Surse de energie: Comparatie

	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

Caracteristicile bateriilor

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

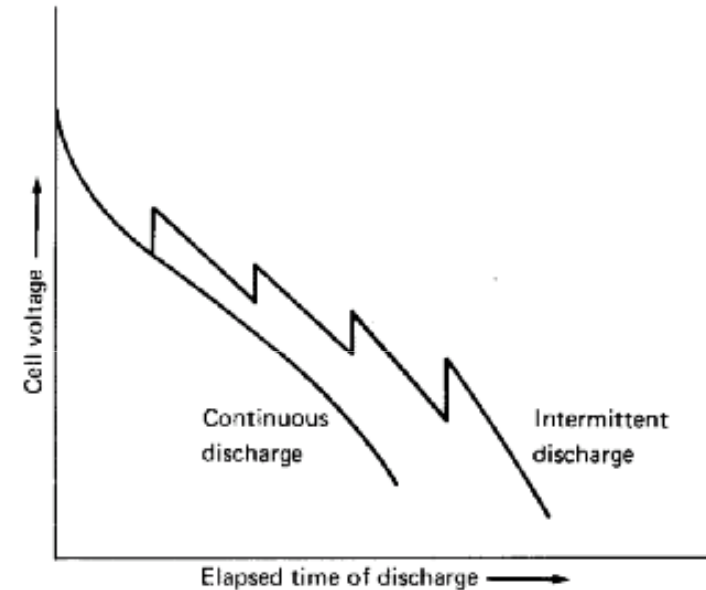
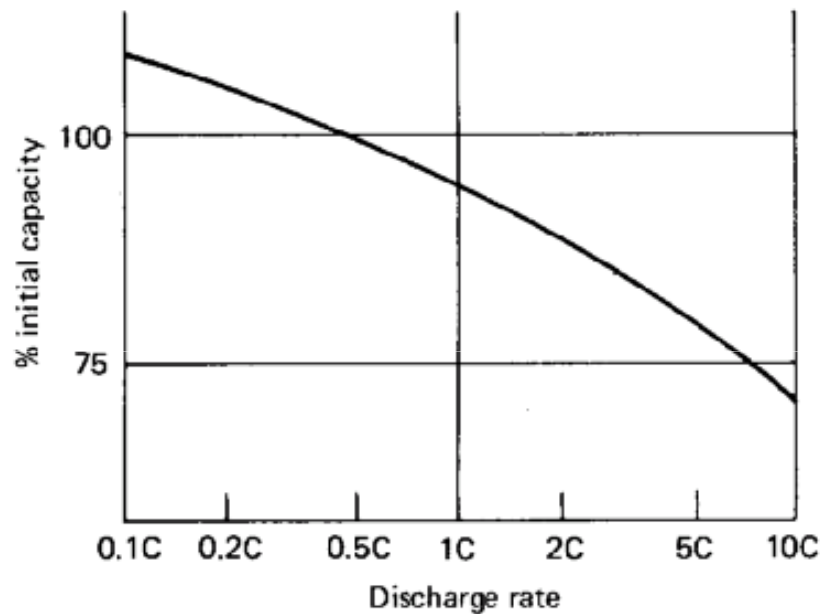
Modelarea Comportamentului Bateriilor

- Teoretic, capacitatea unei baterii este determinata de cantitatea de material activ din celulele ei
 - Bateriile sunt modelate ca niste surse constante de energie
- In realitate, capacitatea nominala depinde de modul in care bateria este descarcata
 - Rata de descarcare (curentul dat in sarcina)
 - Profilul de incarcare/descarcare
 - Tensiunea de operare

Capacitatea bateriilor vs. curentul de descarcare

- Cantitatea de energie livrata scade odata cu marirea sarcinii in circuit
 - Masurata in amperi ora (Ah) sau watt ora (Wh) atunci cand bateria este descarcata intr-un anumit regim si pana la o tensiune de prag
- La curenti mari procesul de difuzie care misca materialul activ din electrolit catre electrod nu este suficient de rapid
 - Concentratia materialului activ din jurul electrozilor scade la zero si tensiunea celulei scade dramatic
 - Chiar daca bateria inca mai are material activ!

Capacitatea Bateriilor



- Curentul exprimat in unitati "C": curentul in sarcina relativ la capacitatea bateriei
 - e.g. un curent de descarcare de 1C pentru o capacitate a bateriei de 500mAh este 500mA

Formula lui Peukert

$$C = \frac{k}{I^\alpha}$$

C - capacitatea bateriei

k - constanta ce depinde de chimia bateriei

α - ideal = 0 pentru bateria ideala (Ah constant), 0.7 in cel mai bun caz

$$T = \frac{C}{P} = \frac{C}{U \cdot I} = \frac{k}{U \cdot I^{\alpha+1}}$$

T - timpul de descarcare

Cate calcule se pot face in timpul de viata al unei baterii?

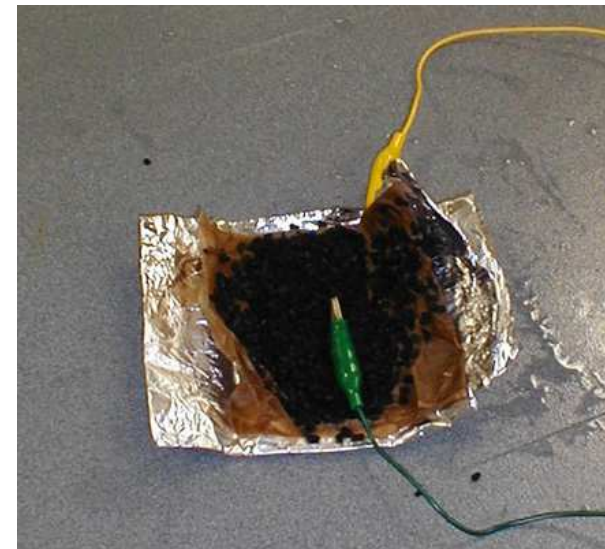
- Daca performanta unui sistem se schimba de n ori si puterea de x ori
 - Numar de calcule = viteza de executie x timp de viata
 - se modifica cu $n * x^{-(1+\alpha)}$
- Daca reducem frecventa ceasului de N ori -> puterea disipata se reduce de N ori si performanta se reduce de N ori
 - Cresterea numarului de calcule = $(1/N) * (1/N)^{-(1+\alpha)} = N^\alpha$
 - » > 1 pentru $\alpha > 0$
 - Cu toate acestea, nu putem reduce frecventa procesorului la nesfarsit
 - » Puterea statica este disipata si la frecventa zero
 - » $P = U * I = U * (I_S + I_D(f))$
 - Exista o frecventa optima de lucru pentru care timpul de viata este maxim

Home study

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

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

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

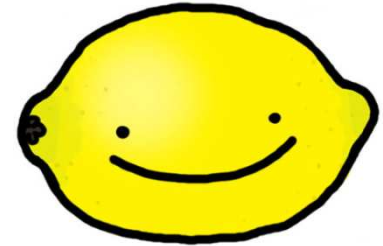


Test

O lamaie poate genera o tensiune de 1V si un curent mediu de 0.1mA pentru aproximativ o ora.

a. De cate lamai este nevoie pentru a aprinde un bec de 100W?

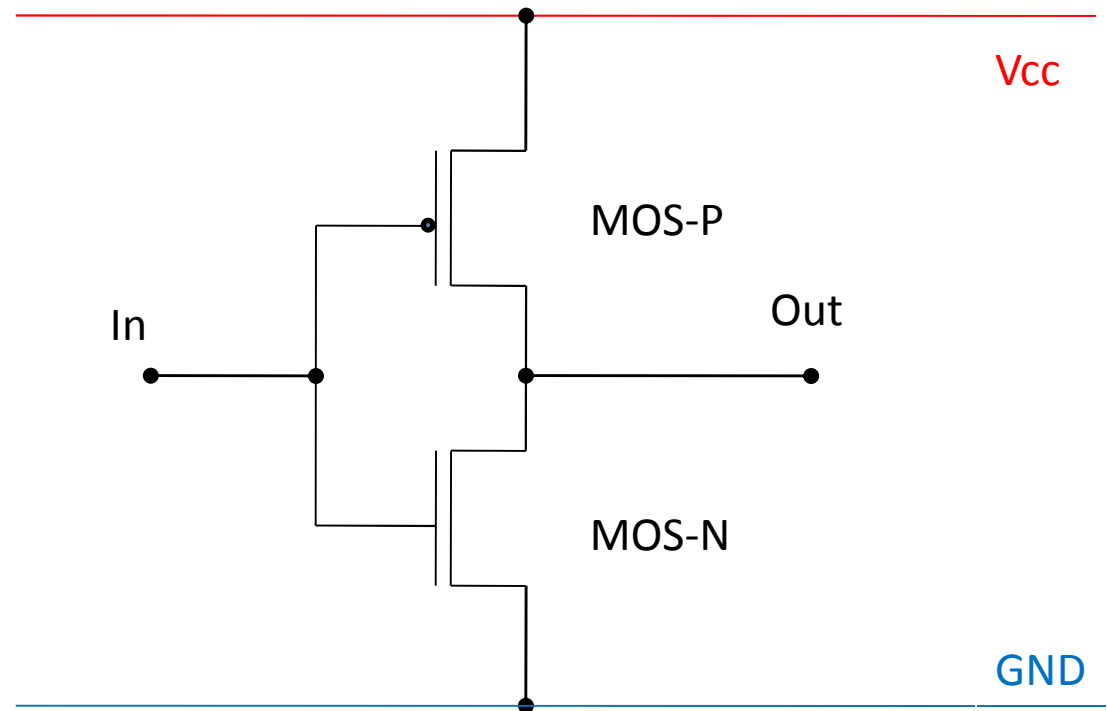
b. Procesorul Atmega128L are un consum de energie de 4nJ/instructiune. Cate instructiuni pot fi executate de procesor din energia unei singure "baterii-lamaie"?



Ce poate sa faca un proiectant embedded?

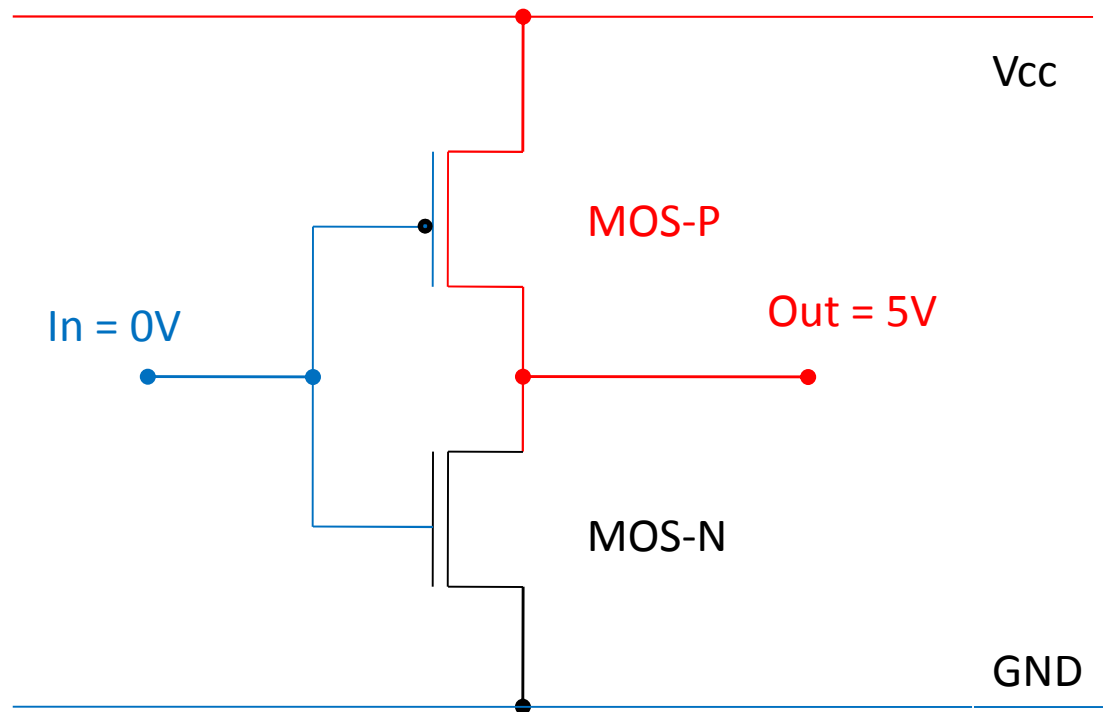
1. Sa inteleaga unde si de ce se disipa energia intr-un circuit.
2. Sa se gandeasca cum sa reduca consumul la toate nivelele din ierarhia de design.
 - In trecut era destul de greu de implementat o astfel de abordare
 - Toate eforturile erau depuse in reducerea consumului la nivel de circuit

Exemplu: Inversorul CMOS



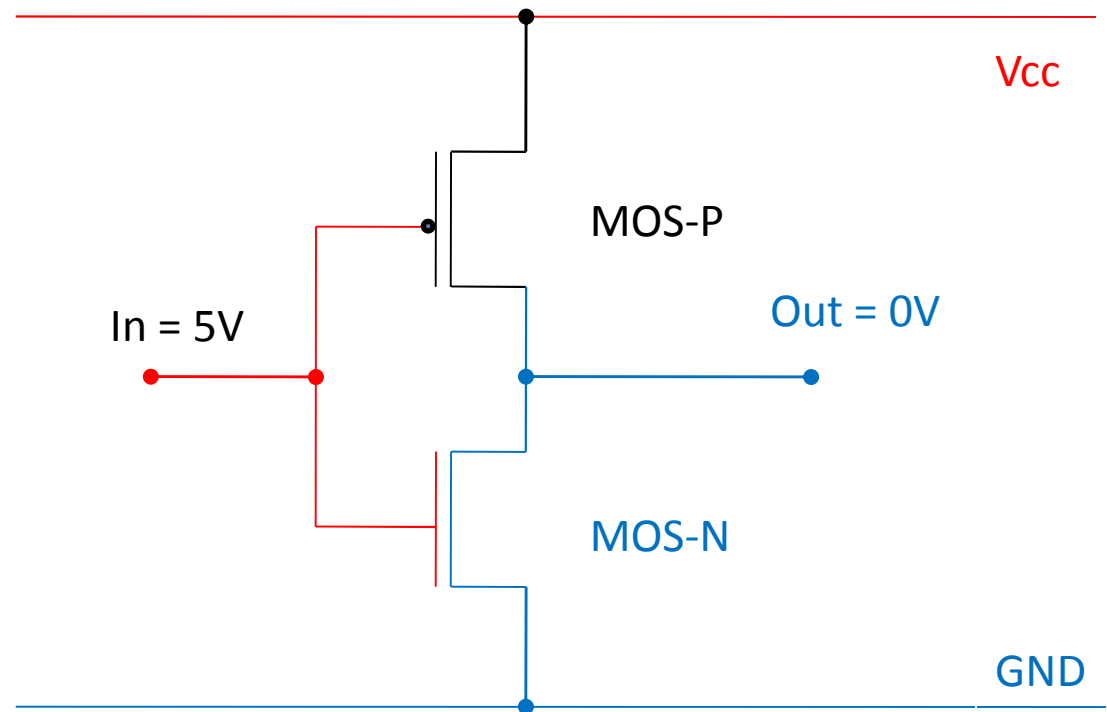
- Cea mai simpla poarta logica – doar doua tranzistoare
- Functionare complementara (MOS-N in conjunctie cu MOS-P)

Exemplu: Inversorul CMOS



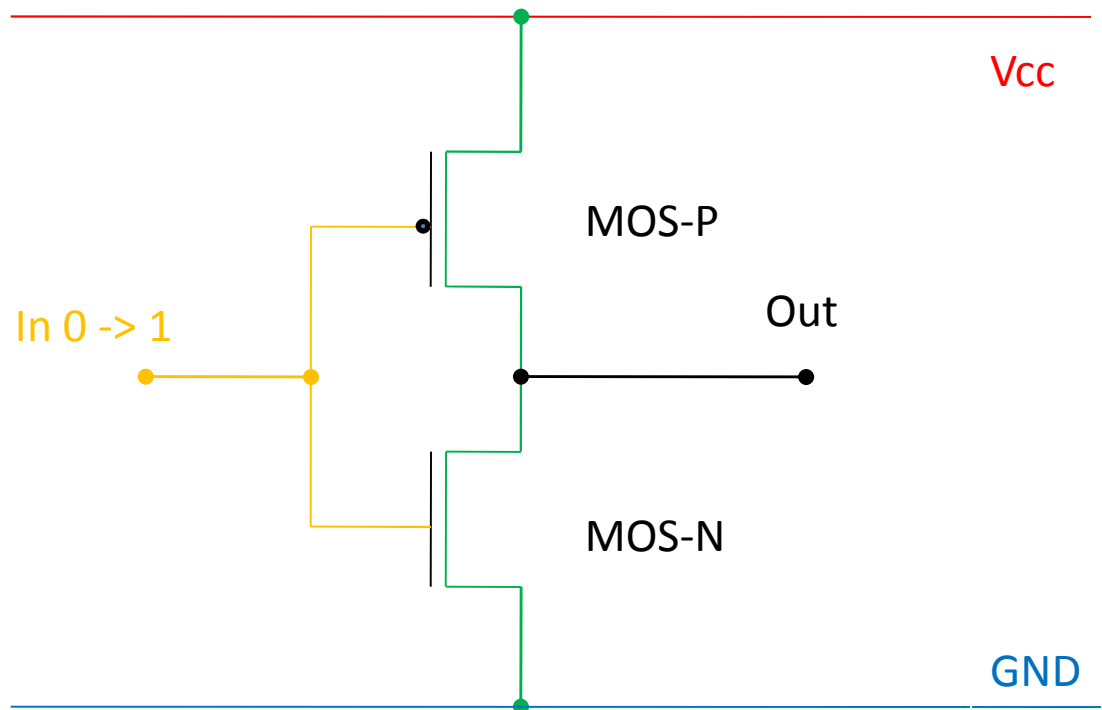
- Input = 0V \rightarrow MOS-P conduce, MOS-N blocat \rightarrow Out = 5V

Exemplu: Inversorul CMOS



- Input = 5V \rightarrow MOS-N conduce, MOS-P blocat \rightarrow Out = 0V

Exemplu: Inversorul CMOS



- Ce se intampla in regim tranzitoriu? (cand intrarea comuta)
 - Pentru o scurta perioada de timp ($\sim nS$) amandoua tranzistoarele sunt deschise -> scurt intre V_{CC} si GND -> consum de energie

Puterea disipata in CMOS

$$P = \frac{1}{2} ACV^2 f + \tau AVI_{short} f + VI_{leak}$$

P = putere totala

V = tensiunea de alimentare

f = frecventa de ceas

C = capacitatea liniilor de iesire

A = activitate (tranzitii logice pe ciclu de ceas)

I_{leak} = curent de mers in gol I_{short} = curent de scurt-circuit

τ = durata curentului de scurt-circuit

Masurarea puterii disipate in CMOS

$$P = \underbrace{\frac{1}{2} ACV^2 f}_{\text{Puterea de comutatie}} + \underbrace{\tau AVI_{short} f}_{\text{Puterea de scurt-circuit}} + \underbrace{VI_{leak}}_{\text{Puterea de mers in gol}}$$

$\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{Putere dinamica} \quad \text{Putere statica}}$

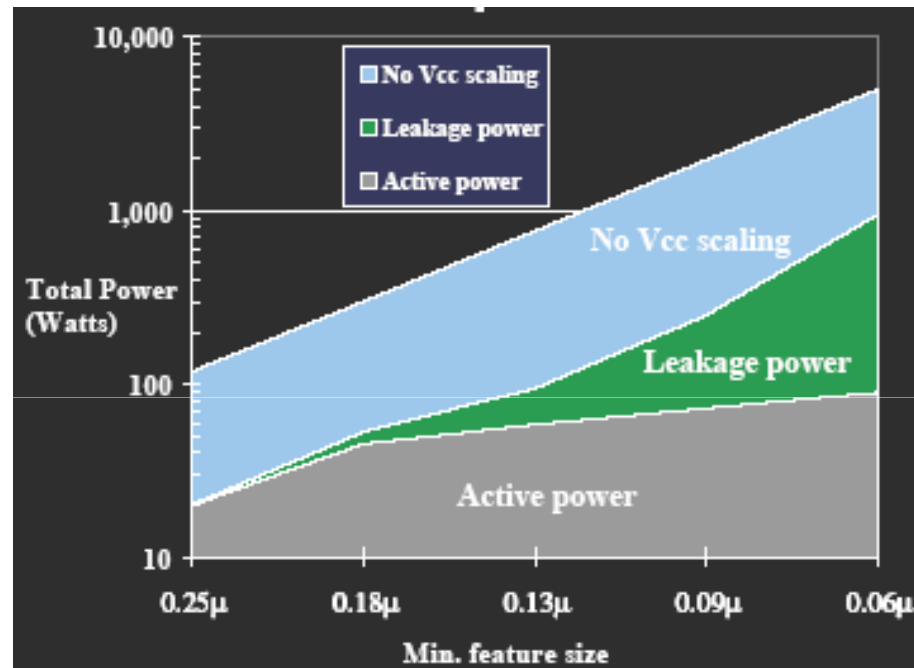
Puterea dinamica

- Puterea de comutatie
 - Puterea dinamica cauzata de incarcarea si descarcarea sarcinilor capacitive de la iesirea fiecărei porti logice
 - Este “vinovata” pentru majoritatea puterii disipate intr-un chip
 - Factori de influenta
 - Tensiunea de alimentare (V)
 - Frecventa de ceas (f)
 - Activitatea (A): unele porti logice nu comuta la fiecare ciclu
- Puterea de scurt-circuit
 - Putere dinamica datorata existentei curentului de scurt-circuit I_{short} care se stabileste un timp τ intre alimentare si masa in momentul in care intrarea comuta dintr-o stare in alta si ambele tranzistoare sunt deschise.

Puterea Statica

- Leakage current. Este predominant cand circuitul este inactiv
 - Exista un consum deoarece tranzistoarele nu au rezistenta infinita atunci cand sunt inchise
- Diode leakage (neglijabil)
 - Sursa (si drena) formeaza o dioda cu substratul
 - In anumite conditii dioda poate fi polarizata, determinand aparitia unui curent rezidual.

Disiparea Puterii



- Puterea activa este factorul cel mai important in ziua de azi
- Puterea de mers in gol va deveni importanta odata cu marirea integrarii
- Puterea de mers in gol creste cu temperatura

Strategii de reducere a consumului

- Reducerea frecventei de ceas (f)
 - Scade puterea medie dar mareste timpul de executie -> consumul de energie ramane constant
 - Metrica mai buna pentru un procesor low-power: MIPS/W \equiv million instructions per sec per watt
- Reducerea tensiunii de alimentare (V)
 - Puterea de comutatie este proportionala cu V^2
 - O scadere a lui V cu $\frac{1}{2} \rightarrow$ puterea scade cu $\frac{1}{4}$
 - De ce nu merge la nesfarsit asa?
- Reducerea activitatii (A)
 - Dezactivarea unor blocuri functionale atunci cand nu sunt active
- Reducerea curentilor reziduali
 - Dezactivarea alimentarii anumitor zone de circuit

Reducerea lui $V \rightarrow$ Reducerea lui f

$$f_{\max} \sim \frac{(V - V_{\text{threshold}})^2}{V}$$

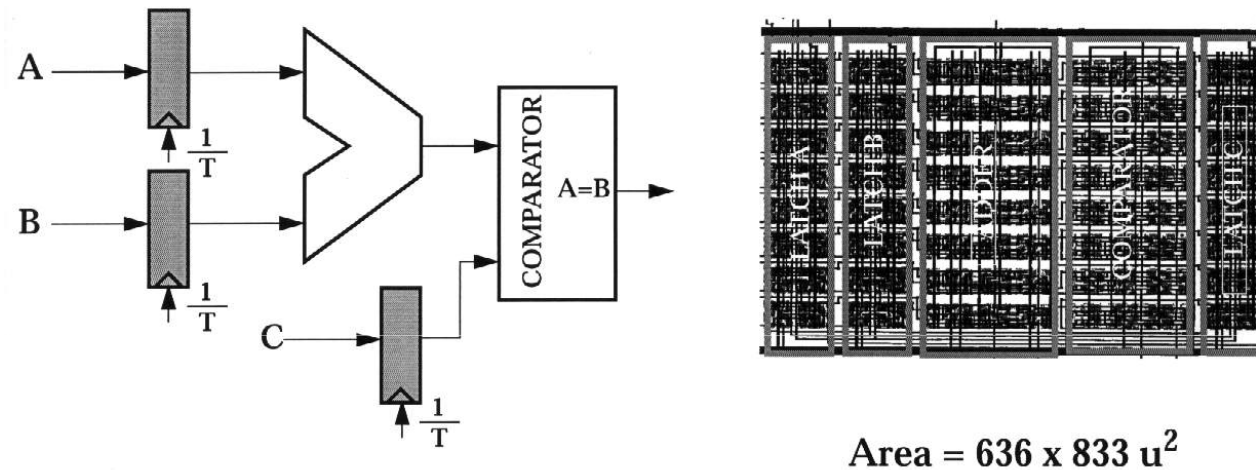
- Frecventa maxima de ceas este direct proportionala cu V
- Reducerea puterii cu $\frac{1}{4}$ reduce frecventa cu $\frac{1}{2}$ -> pierderi de performanta -> consum redus
- Implicatie indirecta: Paralelismul in procesare este o strategie eficienta de a reduce puterea fara pierderi de performanta

Reducerea lui $V \rightarrow$ Reducerea lui $V_{\text{threshold}}$

- Altfel, circuitul nu poate functiona corect
- Reducerea $V_{\text{threshold}}$ mareste exponential curentul rezidual
- Puterea de mers in gol incepe sa fie o problema

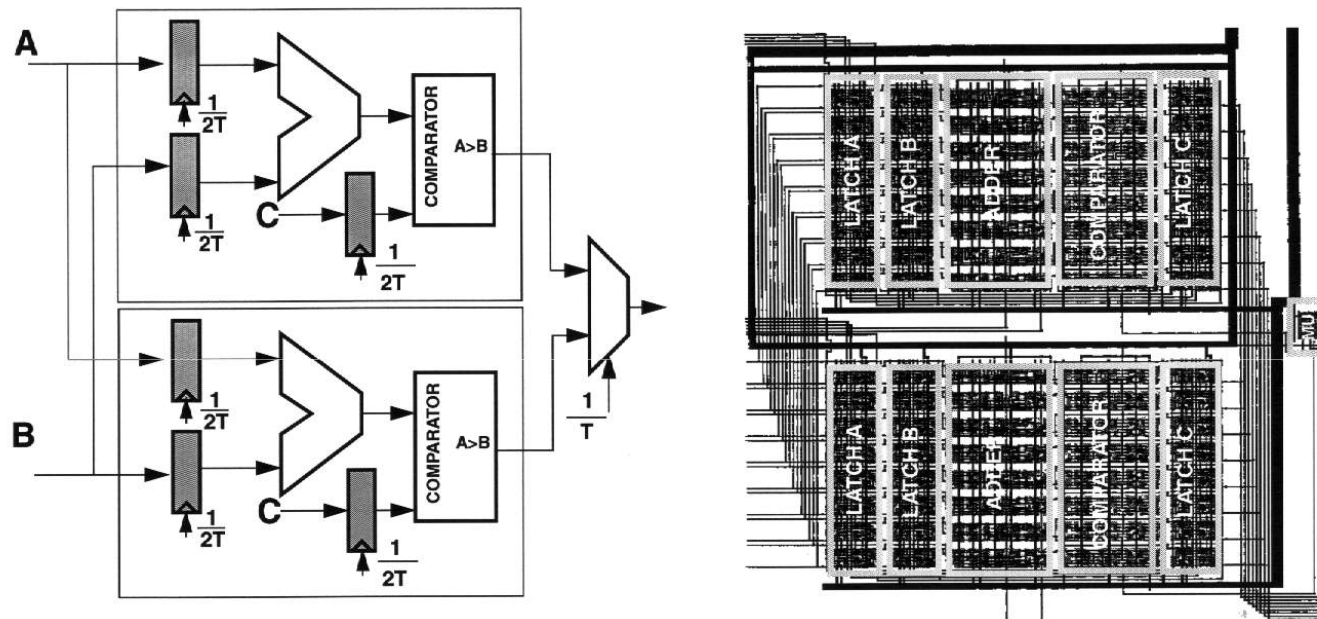
$$I_{\text{leak}} \sim \frac{1}{e^{\left(\frac{qV_{\text{threshold}}}{kT}\right)}}$$

Exemplu de calcul al puterii



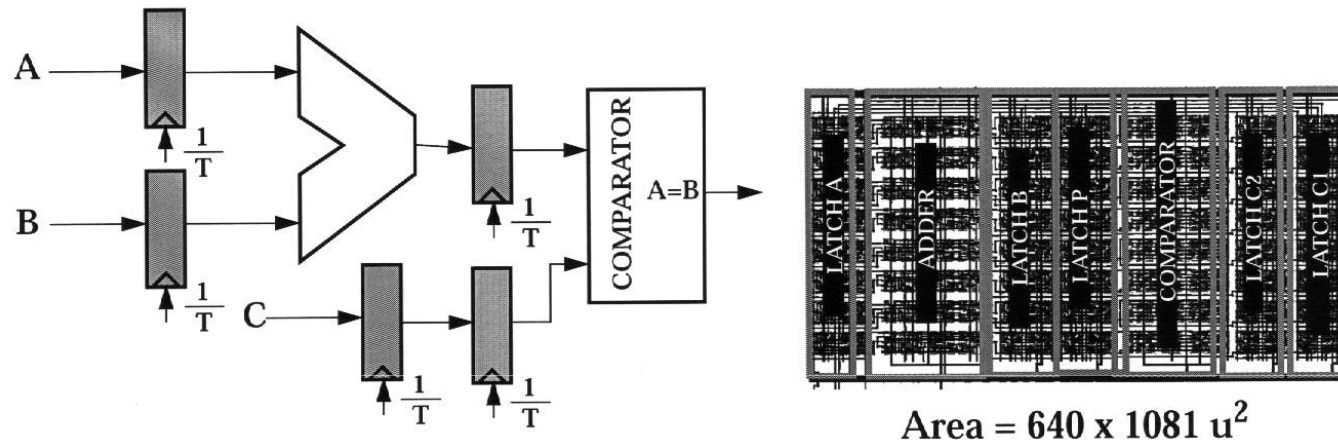
- Intarziere pe calea critica: $T_{\text{adder}} + T_{\text{comparator}} = 25 \text{ ns}$
- Frecventa: $f_{\text{ref}} = 40 \text{ MHz}$
- Capacitatea totala de comutatie = C_{ref}
- $V_{\text{dd}} = V_{\text{ref}} = 5\text{V}$
- Puterea de comutatie = $P_{\text{ref}} = C_{\text{ref}} V_{\text{ref}}^2 f_{\text{ref}}$

Paralelizarea caii de date



- Frecventa de ceas poate fi injumatatita fara a pierde din productivitate: $f_{\text{par}} = f_{\text{ref}}/2 = 20 \text{ MHz}$
- Capacitate totala de comutatie= $C_{\text{par}} = 2.15C_{\text{ref}}$
- $V_{\text{par}} = V_{\text{ref}}/1.7 (=3V)$
- $P_{\text{par}} = (2.15C_{\text{ref}})(V_{\text{ref}}/1.7)^2(f_{\text{ref}}/2) = 0.36P_{\text{ref}}$

Pipeline



- $f_{\text{pipe}} = f_{\text{ref}}$
 $C_{\text{pipe}} = 1.1C_{\text{ref}}$
 $V_{\text{pipe}} = V_{\text{ref}}/1.7$
- Tensiunea poate fi scazuta pastrandu-se aceleasi performante
- $\text{Pipe} = C_{\text{pipe}} V_{\text{pipe}} 2f_{\text{pipe}} = (1.1C_{\text{ref}})(V_{\text{ref}}/1.7)2f_{\text{ref}} = 0.37P_{\text{ref}}$

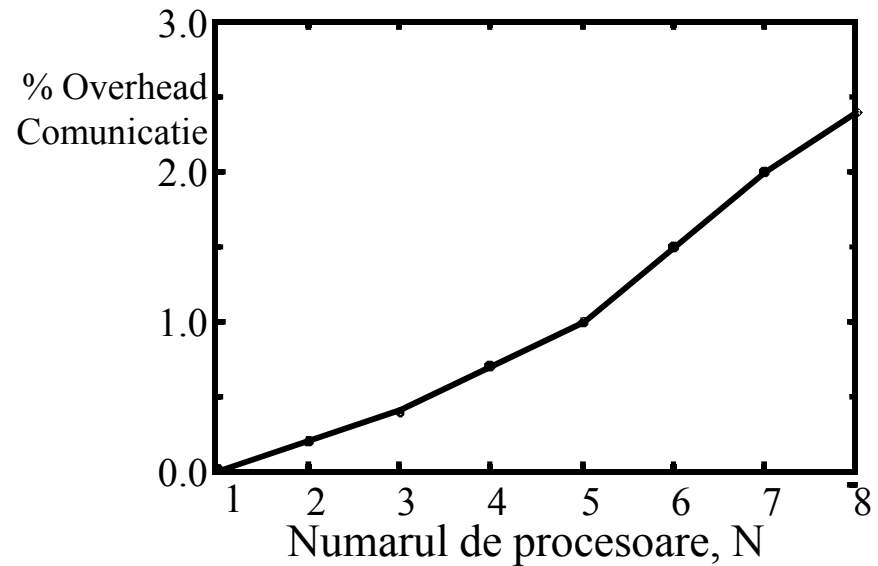
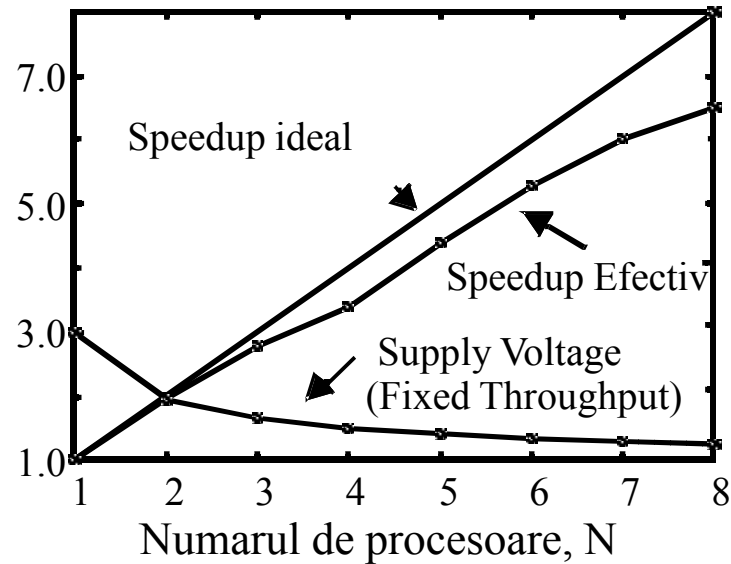
Concluzii

Arhitectura	Tensiune	Arie	Putere
Originala	5V	1	1
Pipeline	2.9V	1.3	0.37
Paralel	2.9V	3.4	0.34
Pipeline-Paralel	2.0V	3.7	0.18

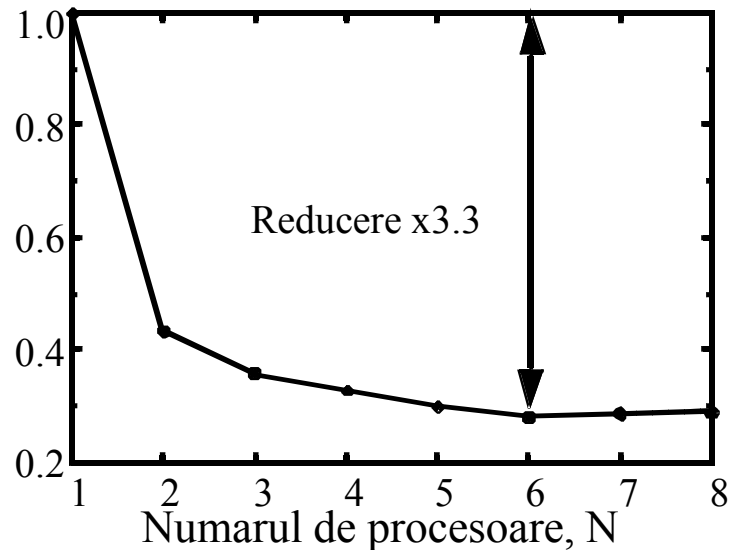
- + Prin paralelizare s-a redus puterea dinamica disipata de mai mult de 5 ori.
- Suprafata circuitului a crescut de 4 ori.
- Marirea numarului de unitati logice duce la cresterea puterii disipate in regimul de mers in gol si scurt-circuit.

Voltage Scaling - exemplu

Speedup



Putere normalizata

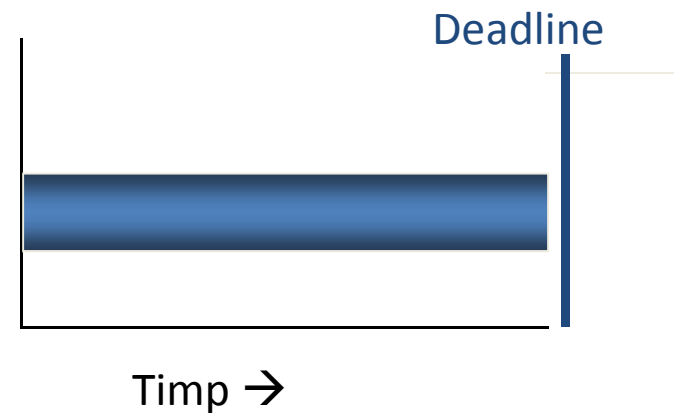
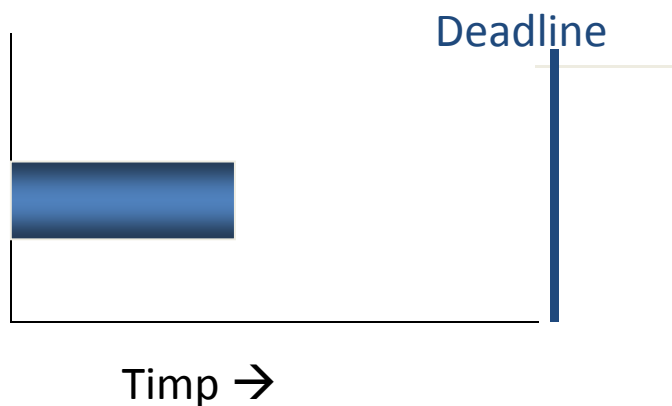


Managementul energetic la nivel de sistem

Aplicatie	-> Exportarea job-urilor comp. intensive
Algoritm	-> Procesare variabila in functie de calitate
Cod Sursa	-> Structuri de date imbunatatite
Compiler	-> Compilare energy-aware
Runtime/OS	-> Just-in-time scheduling
ISA	-> ISA redus
Microarhitectura	-> Filter cache
Logica	-> Clock gating
Circuit	-> Reducerea tensiunii de alimentare. Paralelizare

Just-in-time scheduling

- Exploateaza la maxim timpul oferit pentru procesarea unui volum de date.
- Procesorul ruleaza la o tensiune sau o frecventa redusa pentru a indeplini sarcina exact in timpul alocat ei.



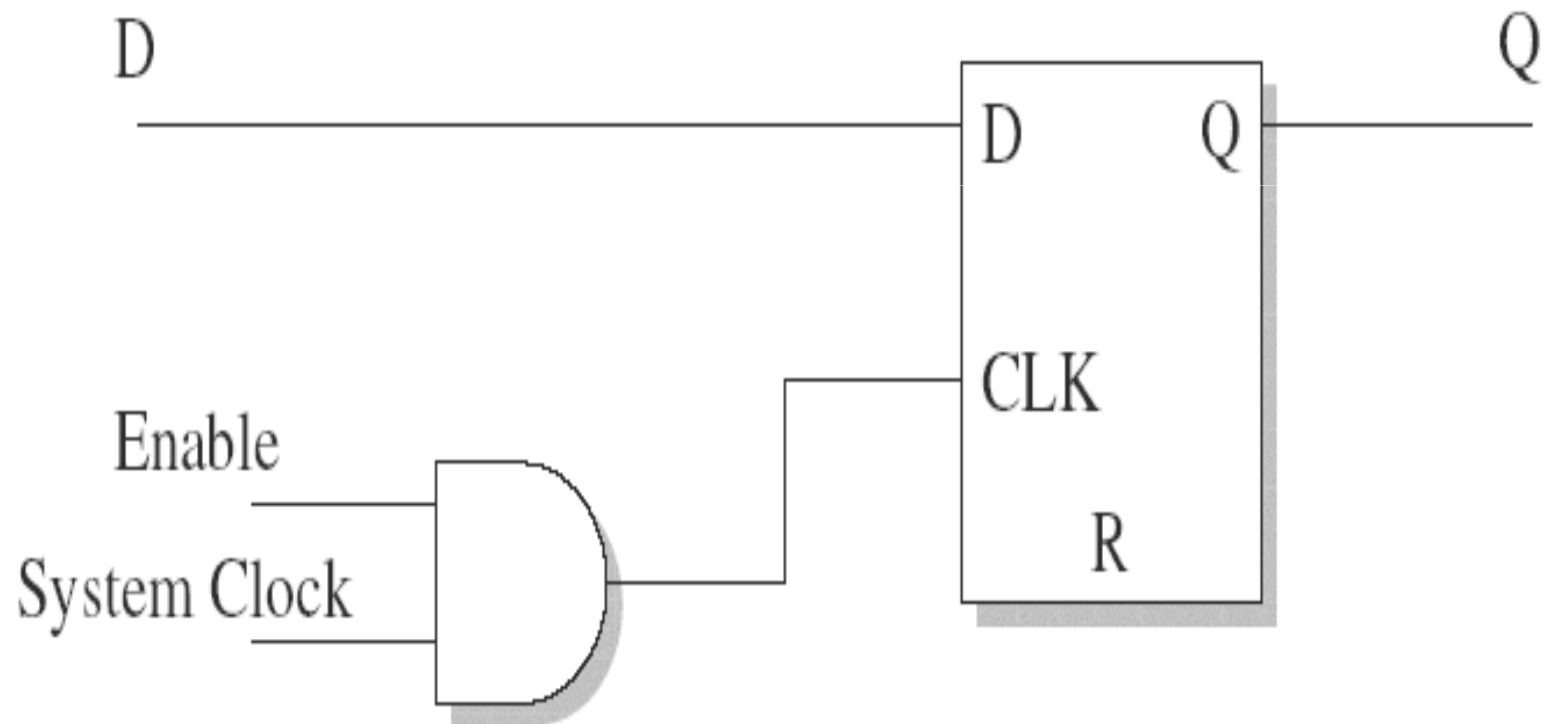
Filtru Cache

- O memorie cache de mici dimensiuni in fata memoriei cache L1
- Daca adresa inregistreaza un hit in filtru, nu este trimisa mai departe
- Daca memoria cache e mai mica -> consumul de energie per acces e mai mic.



Clock gating

Deselectează unitatile logice atunci cand nu sunt folosite de sistem



Reducerea consumului altor componente

- Inlocuirea hard-discului cu memorie flash
 - Consum scazut si viteza comparabila cu DRAM
 - Stergerea are totusi o latentă mare
- Echipamente wireless de comunicatie
 - Idle mode la transmitator
 - Posibilitatea de modificare a puterii de emisie
- Display si backlight
 - Tehnicile de reducere a consumului pot micșora timpul de viata