

# Introducció als sistemes encastrats

Ignasi Vilajosana Guillén

PID\_00177250



Universitat Oberta  
de Catalunya

[www.uoc.edu](http://www.uoc.edu)



*Els textos i imatges publicats en aquesta obra estan subjectes –llevat que s'indiqui el contrari– a una llicència de Reconeixement-Compartir igual (BY-SA) v.3.0 Espanya de Creative Commons. Podeu modificar l'obra, reproduir-la, distribuir-la o comunicar-la públicament sempre que en citeu l'autor i la font (FUOC. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya), i sempre que l'obra derivada quedi subjecta a la mateixa llicència que el material original. La llicència completa es pot consultar a <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/es/legalcode.ca>*

# Índex

<b>Introducció</b> .....	5
<b>Objectius</b> .....	7
<b>1. Què és un sistema encastat</b> .....	9
1.1. Exemples de sistemes encastats .....	11
1.1.1. Computadors en una targeta .....	11
1.1.2. CPU cards.....	11
1.1.3. PC104 modules .....	12
1.1.4. System on a module (SoM) .....	12
1.1.5. System on a chip (SoC) .....	13
1.1.6. Field-programmable gate array (FPGA) .....	13
<b>2. Factors de forma</b> .....	15
<b>3. El concepte de família</b> .....	17
<b>4. Aplicacions</b> .....	19
4.1. Indústria militar i aeroespacial .....	20
4.2. Automoció .....	21
4.3. Tecnologia mèdica .....	21
4.4. Comunicacions .....	21
4.5. Electrodomèstics i electrònica de consum .....	21
4.6. Automatismes industrials i processos de control .....	22
4.7. Logística .....	22
4.8. Agricultura .....	23
4.9. Infraestructures .....	23
4.10. Seguretat .....	23
<b>5. Consideracions de disseny</b> .....	24
<b>6. El procés de desenvolupament</b> .....	27
6.1. Uns altres aspectes que cal tenir en compte en el disseny .....	29
6.1.1. Determinació dels requisits del sistema .....	29
6.1.2. Consideracions pel que fa al projecte .....	30
6.1.3. Consideracions pel que fa al disseny del sistema encastat .....	31
<b>Resum</b> .....	36
<b>Activitats</b> .....	37

**Bibliografia**..... 38

## Introducció

La llei de Moore afirma que la densitat del transistor és doblada aproximadament cada divuit mesos. Això vol dir que la densitat d'integració s'incrementa 1.000 vegades cada quinze anys. Seguint la mateixa tendència, la capacitat de computació experimenta un "canvi de generació" aproximadament cada quinze anys.

La propera generació es coneix amb diferents termes, com, per exemple, *l'era dels processadors encastats* (de propòsit específic), *l'era post-PC*, *l'era de la informació*, *l'era wireless* (sense fil)... És ben cert que una nova generació de dispositius intel·ligents, connectats (amb fil o sense), potents i barats, s'apropa.

Val a dir que dels més de 9.000 milions de microprocessadors manufacturats l'any 2005, menys del 2% van acabar essent els cervells de nous PC, MAC o estacions de treball UNIX. Els 8.800 milions restants van ingressar finalment en allò que denominem *sistemes encastats*. Bàsicament, l'essència de qualsevol sistema electrònic modern, des d'una joguina fins a un sistema de control d'una central nuclear passant pels semàfors de les nostres ciutats, són constituïts per sistemes encastats.

Els **microcontroladors** ( $\mu\text{C}$ ) són els cervells de cada sistema encastat i són els encarregats de processar la informació, executar tasques o generar un flux d'informació. Els microcontroladors dels dispositius que avui en dia trobem en el mercat van des d'un simple  $\mu\text{C}$  de 4 bits, com els que podríem trobar en una postal nadalenca amb so, fins als complexos  $\mu\text{C}$  dedicats de 128 bits, amb altes capacitats de procés i gestió de gràfics, que trobem en una Play Station 3.

Pel que fa al seu funcionament, el ventall d'opcions també és molt ampli. Així, doncs, tenim dispositius que executen codis simples basats en el llenguatge d'assemblador i que són executats des d'una memòria ROM i no disposen de sistema operatiu, fins a sistemes basats en sistemes operatius en temps real (en anglès, *real time operating systems*, RTOS) amb capacitats de preempció i multitasca, executant programes en C o C++ i fins i tot versions encastades de Linux i Windows.

La seva utilització és molt extensa i, si mirem al nostre voltant, podem comptar fàcilment dotzenes d'aquests dispositius, per exemple, la rentadora de casa, el telèfon mòbil, els reproductors d'MP3, càmeres digitals, etc.

Tant és així que comencen a sonar termes com *Internet of things*, *smart planet*, *smart cities* o *stream computing*, en què el centre de la informació i de la computació ja no és als nostres ordinadors, sinó que d'una manera ubiqua és present en les coses, en els objectes i, fins i tot, en les persones.

Per tal d'entendre aquesta predicció, però, ens cal conèixer exactament què entenem per *sistema encastat* o *sistema de propòsit específic*. En aquest sentit, ens sorgeixen les primeres preguntes:

- Què és un *sistema de propòsit específic*?
- De què es compon?
- Quines aplicacions té?

En aquest mòdul trobareu una aproximació als sistemes encastats per tal de resoldre aquestes preguntes bàsiques i també altres consideracions que aniran sorgint durant la lectura.

Dedicarem aquest mòdul a introduir les idees i els conceptes bàsics dels sistemes encastats que analitzarem en profunditat en els propers mòduls. Primer de tot, coneixerem la definició de *sistema encastat*, alguna de les seves tipologies i els conceptes de *família de sistemes*. Coneixerem els camps d'aplicació d'aquesta tecnologia i, finalment, ens endinsarem en el procés complet de disseny i desenvolupament d'un sistema d'aquestes característiques.

#### **Mercat global de les tecnologies d'Internet**

El mercat global de les tecnologies d'Internet (o *extended Internet technologies* en la seva forma anglesa), que inclou les tecnologies RFID i xarxes de sensors, tindrà un volum de 11.600 milions de dòlars EUA el 2012, dels quals 5.300 milions de dòlars EUA s'espera que siguin de xarxes de sensors sense fil. Concretament a Europa, s'espera que el mercat de xarxes de sensors sense fil (WSN) arribi als 180 milions de dòlars EUA. Aquestes previsions es basen en els avantatges que ofereixen les xarxes de sensors sense fil (costos reduïts, estalvi energètic, facilitat d'instal·lació i maduresa actual de la tecnologia).

## Objectius

L'estudi d'aquest mòdul us ha de permetre assolir els objectius següents:

- 1.** Conèixer el concepte de *sistema encastat*, *família de sistemes* i els components principals d'un sistema encastat.
- 2.** Identificar els atributs principals i les aplicacions dels sistemes de propòsit específic.
- 3.** Conèixer les diferències amb sistemes de propòsit general, tant en aspectes genèrics com pel que fa a detalls d'arquitectura.





## 1. Què és un sistema encastat

Un sistema encastat és un sistema informàtic d'ús específic, que és encapsulat totalment pel dispositiu que controla. Els sistemes encastats constitueixen un sistema computacional fruit de la combinació de maquinari i programari. Aquesta combinació té com a missió dur a terme una funcionalitat o un conjunt de funcionalitats determinades. Es diuen *encastats* perquè normalment formen part d'un sistema complet o amb funcionalitats més generals.

Normalment, un sistema encastat està basat en un microcontrolador ( $\mu\text{C}$ ), que controla una funció o funcions específiques d'un sistema. No obstant això, el sistema no està dissenyat per a ser programat per l'usuari final com podria passar amb un PC, en què ara l'utilitzem com un processador de textos i al cap d'una estona hi instal·lem un joc. És a dir, un usuari final pot configurar el dispositiu encastat, però normalment no pot modificar la funcionalitat per la qual ha estat construït.

Així, doncs, un sistema encastat està dissenyat per a dur a terme específicament la tasca per la qual ha estat programat. La tasca pot no ser única i, per tant, s'hi poden incloure diverses opcions que l'usuari pot seleccionar (com si es tractés dels diversos programes de rentat en una rentadora). Aquest tret és diferencial amb relació als ordinadors, o almenys ho era fins fa ben poc. Actualment, un grup minoritari dels dispositius encastats han experimentat una forta evolució i gairebé ja ofereixen funcionalitats més properes als PC que no als electrodomèstics.

Les tècniques de disseny de sistemes encastats han possibilitat el desenvolupament de productes més petits, més ràpids, més robustos i sobretot més barats que els han fet presents a gairebé tots els dispositius que envolten la nostra vida diària. El disseny VLSI<sup>1</sup> ha permès dissenyar transistors extremament petits que es poden integrar per milions en petits circuits integrats. Gràcies a això, s'han pogut construir sistemes més complexos d'una manera modular.

El desenvolupament d'un sistema encastat és condicionat sempre per la seva robustesa i eficiència, i amb el condicionant que cap dels seus usuaris final no sigui conscient de la seva existència.

En la dècada de 1970 van aparèixer els primers microcontroladors de 8 bits produïts per Motorola (M6800) i Intel (8080), juntament amb les primeres memòries programables (PROM<sup>2</sup>). Les aplicacions basades en els primers microcontroladors eren força senzilles (microprogramari, *firmware*, com el coneixem

### Exemple

Un bon exemple de l'acostament dels electrodomèstics a les funcions pròximes al PC el tenim en la telefonia mòbil amb dispositius amb capacitats equivalents a les d'un ordinador.

<sup>(1)</sup>Sigla de *very large scale integrated circuits*, circuits integrats a molt gran escala.

### Exemple

El sistema de control del nivell de carburant d'un vehicle és constituït per diversos sistemes encastats. Curiosament, només som conscients de la seva existència quan deixen de funcionar.

ara). Normalment, feien ús del llenguatge d'assemblador que permetia desenvolupar aplicacions de com a màxim centenars de línies de codi que permetien substituir dissenys de maquinari molt complexos per sistemes programables molt més senzills.

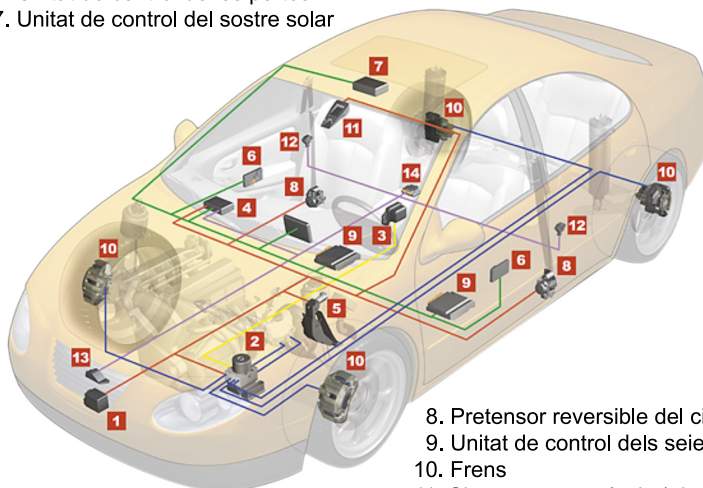
<sup>(2)</sup>Sigla de *programmable read only memory*

Avui en dia, s'estan desenvolupant aplicacions per a sistemes encastats de milers de línies de codi, utilitzant múltiples microcontroladors, components integrats VLSI, diferents nivells de memòria, convertidors analògic-digital i molts altres components que permeten que els sistemes encastats siguin usats gairebé en tots els dispositius i màquines que existeixen avui.

Els sistemes encastats interactuen amb una gran varietat de dispositius analògics i digitals. El desenvolupador de sistemes encastats s'ha d'afrontar a la interacció amb dispositius analògics i digitals, ha de comprendre com funcionen sensors i transductors i com els seus senyals són digitalitzats o viceversa. Cada dia més, també, els sistemes encastats utilitzen connexions de xarxa, en molts casos amb protocols específics condicionats per la naturalesa d'aquests dispositius. D'aquesta manera, la tasca de desenvolupar un sistema encastat és heterogènia i requereix que el desenvolupador tingui un ampli ventall d'habilitats i coneixements.

#### Sistemes encastats en un vehicle

1. Control de creuer adaptatiu
2. Sistema electrònic de frenada MK60E
3. Grup de sensors
4. Entrada del transmissor de dades
5. Retroalimentació del pedal d'acceleració
6. Unitat de control de les portes
7. Unitat de control del sostre solar



8. Pretensor reversible del cinturó de seguretat
9. Unitat de control dels seients
10. Frens
11. Sistema prexoc òptic (*closing velocity sensor*)
12. Satèl·lits laterals
13. Sensor davanter
14. Unitat de control dels coixins de seguretat

## 1.1. Exemples de sistemes encastats

Els sistemes encastats es poden classificar de moltes maneres, per exemple, segons la funcionalitat, segons la mida, segons els components, etc. Hem triat una classificació que els discrimina en funció del seu nivell d'integració. Atès l'elevat nombre de sistemes existents, n'hem triat alguns dels més representatius.

### 1.1.1. Computadors en una targeta

Els computadors en una targeta<sup>3</sup> són computadors complets en un sol circuit. El disseny se centra en un microprocessador amb la memòria, l'E/S i totes les altres característiques d'un computador funcional en una sola targeta que sol ser de grandària reduïda i que té tot el que necessita en la placa base.

<sup>(3)</sup>En anglès, *single board computers* o SBC.

Aquesta arquitectura no s'usa tant en els computadors personals, sinó que s'utilitza en entorns industrials o en sistemes encastats dins d'altres que ofereixen funcionalitats de control o d'interfície.

A causa dels grans nivells d'integració i reducció de components i connectors, els computadors en una targeta solen ser més petits, lleugers, més robustos i solen tenir una millor gestió de la potència elèctrica que els computadors de múltiples targetes.

### 1.1.2. CPU cards

Una *CPU card* és un circuit imprès<sup>4</sup> que conté un processador (CPU, unitat central de processament) d'un computador. Les *CPU cards* s'especifiquen per la freqüència de rellotge, pel tipus de bus i per altres característiques específiques de la funcionalitat que ofereixen. Les *CPU cards* són tots aquells circuits integrats que implementen *architecture peripheral component interconnect* (PCI), targetes de PC modulars, targetes *industry standard card* (ISC), targetes *PCI extensions for instrumentation* (PXI), targetes *embedded technology extended* (ETX) i moltes altres. Normalment, són usades per a expandir memòria, velocitat, amplària de banda o aplicacions encastades de sistemes computacionals existents. Entre d'altres, cal destacar mòduls per a aplicacions d'àudio i de vídeo, comunicació de dades i emmagatzematge encastat.

Les targetes PXI s'usen per a l'adquisició i per a sistemes de control, i són del tot adequades per a aplicacions de mesura en temps real. Les targetes ETX s'usen en entorns industrials per a augmentar d'una manera encastada les propietats d'un sistema. Les CPU cards estan pensades per a ser connectades a la placa mare d'un computador, per mitjà dels ports ISA o PCI, i inclouen totes les funcionalitats, tant l'específica com la de comunicació, amb la placa mare o



SBC TPC-35A de Techsol. SBC amb pantalla tàctil

<sup>(4)</sup>En anglès, *printed circuit board* (PCB).

d'altres targetes del computador. Normalment, són conegudes com a *targetes d'expansió* i inclouen, entre d'altres, funcionalitats de mòdem, targetes de xarxa, targetes de vídeo i acceleradores gràfiques o controladores de disc RAID.

### 1.1.3. PC104 modules

PC/104 està definit com un estàndard administrat pel PC/104 Consortium i que defineix un factor de forma i un bus de comunicació. L'estàndard PC/104 va ser concebut per a aplicacions d'adquisició de dades en entorns amb condicions que poden ser extremes (temperatura, humitat, exteriors, etc.). El factor de forma PC/104 no utilitza una placa mare en què s'insereixen les plaques d'expansió, sinó que els mòduls poden ser apilats i ancorats els uns als altres fent que l'estructura sigui molt més robusta. La comunicació entre mòduls apilats es fa mitjançant un bus que connecta tots els nivells.

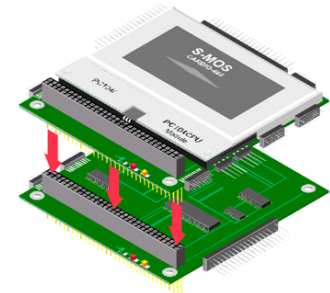


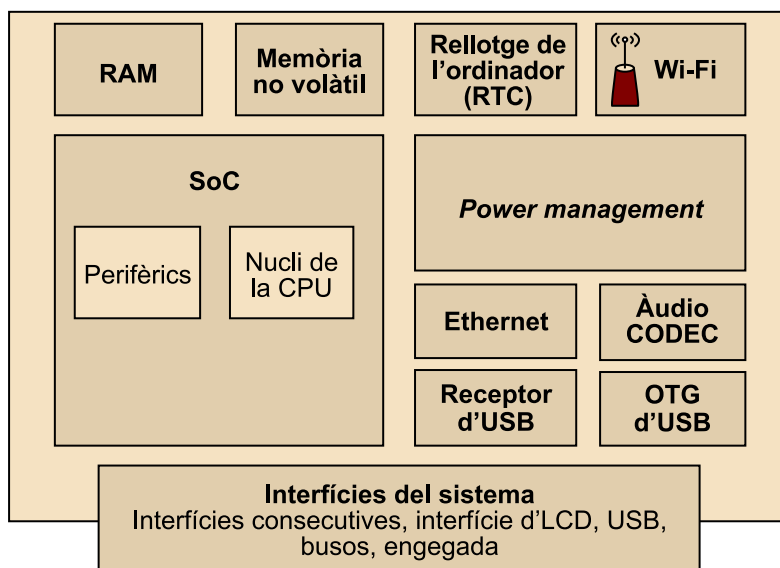
Diagrama d'un dispositiu seguint l'estàndard PC/104

### 1.1.4. System on a module (SoM)

*System on a module* (SoM) és un computador en una sola placa<sup>5</sup>, encastat, que es pot considerar l'extensió del concepte *system on a chip*. El SoM es podria descriure com un computador complet construït en una única placa. El disseny se centra en un únic microprocessador amb memòria RAM, controladors d'entrada/sortida, alimentació i altres components necessaris per a convertir-lo en un computador complet però en una sola placa. A diferència d'un SBC, els SoM no tenen connectors per a afegir perifèrics directament a la placa, sinó que qualsevol perifèric ha de ser endollat mitjançant un bus connectat a un port (com ara un USB) del SoM. Els principals avantatges que té són el baix consum energètic i la robustesa, gràcies a l'alt nivell d'integració.

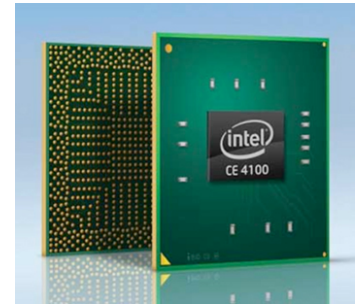
<sup>(5)</sup>En anglès, *single board computer*.

*System on a module* (SoM)



### 1.1.5. *System on a chip* (SoC)

*System on a chip* (SoC) és un concepte que fa referència a la integració de tots els components d'un computador o d'un altre aparell electrònic en un únic circuit integrat (xip). Normalment, aglutina funcions digitals, analògiques i comunicacions via radiofreqüència en un únic substrat. A diferència de les limitacions de memòria i capacitat de càlcul d'un microcontrolador, els SoC acostumen a incloure un o diversos microcontroladors que els donen molta més capacitat de còmput i integren diverses memòries externes, la qual cosa n'incrementa la capacitat. No obstant això, la integració avui encara té límits i el terme *system on a chip* engloba també els sistemes que són formats per més d'un xip, però que van empaquetats en un mateix encapsulat, cosa que n'afavoreix la integració, però sense arribar als extrems d'utilitzar un mateix substrat.



Exemple de SoC

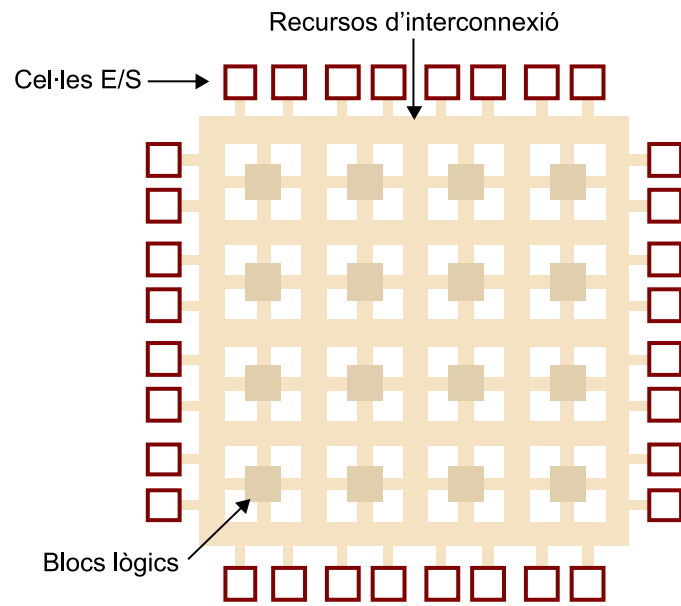
### 1.1.6. *Field-programmable gate array* (FPGA)

Malgrat que el seu nivell d'integració és molt variable, volem introduir el concepte de *field-programmable gate array* (FPGA) –en català *matrius de portes programables in situ*–, ja que un gran nombre de dispositius encastats utilitzen sistemes FPGA com a components de la seva arquitectura.

Una FPGA és un circuit integrat que pot ser reprogramat mitjançant un llenguatge de programació específic, normalment algun llenguatge de descripció de maquinari com VHDL. Les FPGA poden ser usades per a implementar qualsevol operació que un circuit integrat pot dur a terme amb la diferència que, en ser reprogramables, són molt més versàtils i poden ser reusades en altres contextos. Les FPGA són constituïdes per blocs lògics i una jerarquia d'interconnexions reconfigurable que permet unir els blocs lògics. Els blocs lògics es poden configurar per a dur a terme operacions complexes o simples operacions lògiques. Els blocs lògics són acompanyats per elements de memòria.

A més de funcions digitals, algunes FPGA també tenen funcions analògiques, entre d'altres, la de control de l'*slew rate* (o velocitat de canvi de voltatge de sortida en funció de les variacions del voltatge d'entrada). En cada piu permeten als desenvolupadors ajustar la càrrega a cada piu segons les necessitats del seu disseny.

Esquema de blocs lògics d'una FPGA amb les seves entrades i sortides



Els blocs lògics s'interconnecten per a aconseguir funcionalitats específiques

## 2. Factors de forma

L'estandardització de qualsevol sistema és cabdal per a la seva implantació posterior a gran escala en els mercats, també per als sistemes encastats. Així, doncs, la comunitat ha definit factors de forma i mides que permeten als fabricants seguir uns estàndards que simplifiquen la integració, el disseny, la interoperabilitat, l'encapsulatge, entre d'altres.

L'existència dels factors de forma (o *form factor*, en anglès) ha permès que puguem canviar la placa mare del nostre PC per una d'un altre fabricant sense haver-ne de canviar la caixa. També han permès reduir els costos dels sistemes encastats, ja que els encapsulatges, connectors, fonts d'alimentació, etc. no han de ser específics per a cada dispositiu.

Les mides de la majoria dels sistemes encastats estan estandarditzades pel que s'anomena **factor de forma** (en anglès, *form factor*). El factor de forma permet que els fabricants d'accessoris, de components i de sistemes de protecció o embolcall puguin fabricar seguint uns estàndards.

En aquesta figura veiem els factors de forma més utilitzats ordenats de més gran a més petit pel que fa a les dimensions. En podem reconèixer alguns relacionant-los amb la placa mare del nostre PC. D'altra banda, també hi podem veure la relació d'escala dels factors de forma més utilitzats.

Factors de forma i les seves mides

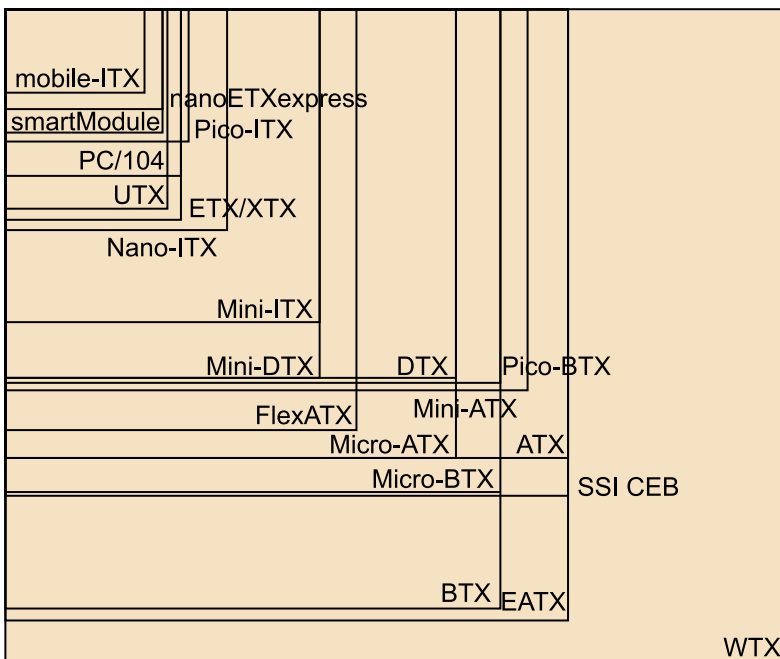
Nom	Mida (mm)
WTX	356 × 425
AT	350 × 305
Baby-AT	330 × 216
BTX	325 × 266
ATX	305 × 244
EATX (Extended)	305 × 330
LPX	330 × 229
microBTX	264 × 267
NLX	254 × 228
Ultra ATX	244 × 250
microATX	244 × 244
DTX	244 × 203

### Perfilant factors de forma

Recentment, els fabricants de dispositius mòbils com Apple i el seu Iphone estan definint factors de manera que permetrien estandarditzar la mida d'aquests dispositius.

Nom	Mida (mm)
FlexATX	229 × 191
Mini-DTX	203 × 170
EBX	203 × 146
microATX (min.)	171 × 171
Mini-ITX	170 × 170
EPIC (Express)	165 × 115
ESM	149 × 71
Nano-ITX	120 × 120
COM Express	125 × 95
ESMexpress	125 × 95
ETX/XTX	114 × 95
Pico-ITX	100 × 72
PC/104 (-Plus)	96 × 90
ESMini	95 × 55
Beagle Board	76 × 76
mobile-ITX	60 × 60
CoreExpress	58 × 65

Els factors de forma



No estan a escala real, sinó que només hi observem la relació d'escala.



### 3. El concepte de *família*

Una família engloba tots els components que estan dissenyats sota un mateix patró i que comparteixen un conjunt de propietats. Així, en el context d'un sistema encastat, podem trobar components que s'engloben dins l'àmbit d'una família i que, per tant, comparteixen propietats.

En l'àmbit dels sistemes encastats hi ha un conjunt de famílies que han anat evolucionant a mesura que se n'estenia l'ús. Les més representatives són:

- L'arquitectura ARM de l'empresa ARM.
- L'arquitectura AVR d'Atmel.
- L'arquitectura PIC de Microchip.
- L'arquitectura MSP430 de Texas Instruments.
- L'arquitectura 8051 d'Intel.
- L'arquitectura Z80 de Zilog.
- L'arquitectura 65816 de Western Design Center.
- L'arquitectura SuperH d'Hitachi.
- L'arquitectura ETRAX CRIS de Axis Communications.
- L'arquitectura Power Architecture (pròpiament dita PowerPC).
- L'arquitectura eSi-RISC d'EnSilica's.

Una família és constituïda per múltiples microcontroladors que segueixen les especificacions bàsiques de la família, com són el format de les instruccions o l'arquitectura del processador. Una família no deixa de ser una especificació i un disseny d'un nucli i un conjunt de funcionalitats que forma el que s'anomena *microcontroller unit* (MCU) o *core*.

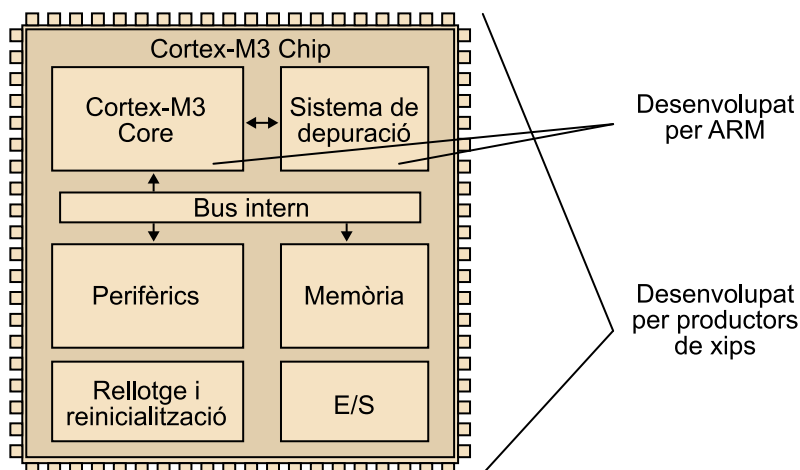
#### Exemple

Troblem les famílies de processadors o de microcontroladors que comparteixen, entre d'altres, una arquitectura, un format d'instrucció, una mida de registres, etc.

#### Exemple

En la família d'ARM podem trobar més de 30 microcontroladors diferents, tots basats en el mateix nucli.

Xip Cortex-M3. Hi veiem la part desenvolupada per ARM i la part desenvolupada pels diferents integradors.



L'especificació d'una família pot ser implementada per diversos fabricants o integradors; així, l'especificació del processador Cortex-M3 d'ARM la desenvolupen empreses com Texas Instruments, NXP, FreeScale o Atmel, entre d'altres, que hi afegeixen els perifèrics, la memòria i altres components que consideren òptims pel disseny que tenen.

Els fabricants intenten mantenir la compatibilitat entre els microcontroladors que formen una família, ja que el desenvolupament d'aplicacions en sistemes encastats va lligada a una *tool chain* o eines de desenvolupament específiques per a la família i, per tant, volen evitar que els seus clients hagin de canviar totes les eines pel simple fet de canviar de processador. També cal dir que hi ha una forta competència en l'àmbit de les eines ofertes per al desenvolupament, i fabricants com FreeScale "regalen" el seu entorn de desenvolupament i biblioteques si es fan servir els seus microcontroladors.

#### Exemple

L'iphone 4 d'Apple porta un microcontrolador basat en Cortex-A8 de la família ARM com a processador. Samsung hi ha introduït certes modificacions per a augmentar-ne el rendiment. Al seu torn, uns altres dispositius com el Motorola Droid o el Samsung Galaxy porten el mateix microcontrolador.

## 4. Aplicacions

El desenvolupament tecnològic dels darrers anys en l'àmbit dels sistemes encastats i de la microelectrònica, en general, han facilitat el desenvolupament d'aplicacions existents i també n'ha afavorit l'aparició de noves.

Els sistemes encastats han permès el desenvolupament de sistemes i aplicacions:

- de baix cost.
- en molts casos descentralitzades.
- amb baixos consums energètics.
- amb més robustesa i tolerància a les fallades.
- amb millor suport a l'operació amb temps real.
- amb potencial per a ser connectades en xarxa.
- amb control o accés remot.
- amb més densitat de sensors o actuadors.
- amb alt nivell d'integració a d'altres sistemes o objectes.
- amb mides més reduïdes o amb la possibilitat de ser usades on abans no era possible.

Una gran part dels sistemes encastats es poden considerar dispositius *sensors* que mitjançant interfícies són capaços d'obtenir dades. En aquesta categoria s'inclouen tots els dispositius que utilitzen sensors (sensors de temperatura, humitat, sísmics, acústic, magnètics, etc.) i també tota mena de comptadors i dispositius de mesura mecànica (com tacòmetres, amperímetres, comptadors de polsos, etc.). D'altra banda, els **sistemes actuadors** són aquells que gràcies a estímuls rebuts duen a terme accions en el seu àmbit d'actuació.

En els darrers anys i gràcies a l'auge de les comunicacions sense fil, molts dels sistemes encastats existents han evolucionat per tal d'operar d'una manera remota sense la necessitat de connexions cablades. Això ha permès el desenvolupament de noves aplicacions que fins al moment no eren possibles. No obstant això, han aparegut reptes nous, ja que el fet de poder comunicar un sistema encastat sense fil ha permès ubicar-los en llocs on ni tan sols hi ha energia elèctrica. Per tant, el consum i l'eficiència dels dispositius ha esdevingut crucial.

Tant és així que la majoria dels esforços en el desenvolupament de la microelectrònica i del programari (sistemes operatius i biblioteques) han anat encarrats a la reducció dels consums energètics d'aquests dispositius. Això s'ha fet palès en diferents vessants:

### Exemple

Els sistemes actuadors accionen motors, obren o tanquen interruptors i notifiquen esdeveniments, entre altres funcions.

1) **Microelectrònica energèticament eficient.** Gràcies a la reducció de la mida dels xips i dels components electrònics que integren un sistema encastat, juntament amb tècniques que permeten apagar literalment alguns components del dispositiu quan no són usats, han reduït d'una manera notable el consum d'aquests dispositius. També cal destacar l'aparició de sistemes de recollida d'energia de l'entorn (*energy harvesting*), que han permès la prolongació de la vida operativa dels sistemes encastats.

2) **Sistemes operatius en temps real.** Els avenços en sistemes operatius en temps real de propòsit específic, incloent-hi planificadors de tasques prioritàries i multitasca i en molts casos amb conceptes de *justícia* (*fairness*, en anglès), han permès una optimització del temps de processador. També han aparegut tècniques que permeten detectar quan no hi ha més tasques per executar i, d'una manera automàtica, posar el sistema en un mode adormit (*sleep*). Els sistemes basats en esdeveniments i asíncrons han afavorit la utilització d'interrupcions i han evitat també l'ús innecessari d'esperes o enquestes.

3) **Estàndards de comunicació que optimitzen el consum energètic.** Les comunicacions sense fil són les que més han evolucionat. Han aparegut estàndards per a la comunicació pensats per a entorns amb altes restriccions energètiques en què la pila de protocols està pensada per a minimitzar aquest aspecte. El 802.15.4 és l'especificació feta per la IEEE del protocol per a xarxes de sensors i entorns industrials en què s'optimitza l'eficiència energètica de la capa física. Defineix taxes de transmissió, modulacions i estructura dels paquets. Han aparegut diferents implementacions de la capa MAC que, entre altres funcions, permeten un accés aleatori CSMA/CA en xarxes amb poc trànsit, o bé accés múltiple TDMA/FDMA per a xarxes amb trànsit constant, basant-se en protocols complexos de sincronització i d'encaminament de la informació.

Gràcies a aquests avenços, trobem aplicacions dels sistemes encastats en gairebé tots els sectors. Tot seguit, en detallem els més representatius.

#### 4.1. Indústria militar i aeroespacial

Troblem els sistemes de propòsit específic en sistemes de control, ubicació i monitoratge en rescats o operació en desastres naturals, també en sistemes de control de projectils i armament o control de dispositius voladors no tripulats, entre d'altres. Una part significativa del cost dels avions prové dels equips de processament d'informació, incloent-hi sistemes de control de vol, sistemes per a evitar col·lisions o sistemes d'informació per als pilots. En molts casos, l'operació en temps real, la robustesa i els mecanismes de posicionament i comunicació sense fil són claus per a aquesta mena de dispositius.

##### UAV

Espanya i els Estats Units són dos dels fabricants més importants de vehicles aeris no tripulats (en anglès, *unattended aerial vehicle*, UAV).

## 4.2. Automoció

La majoria de països han establert lleis que requereixen als fabricants de vehicles incloure certs sistemes de seguretat com són els sistemes de coixins de seguretat controlats per sistemes de control encastats al vehicle, sistemes de control del motor, controls del sistema de fre (ABS) o sistemes d'estabilitat (ESP), entre d'altres. Uns altres components dels vehicles són també sistemes encastats, els GPS, els sistemes d'alarma, els controls de climatització, etc.

## 4.3. Tecnologia mèdica

Gràcies a les seves característiques i mides, els sistemes encastats són usats en l'àmbit de la medicina i integren tota mena d'equipament per al monitoratge i control en temps real. Fins i tot en molts casos, els sistemes són adherits als pacients per a ser observats d'una manera permanent, sobretot en el cas de gent gran. Hi ha algunes experiències de múltiples sistemes sensors adherits al cos del pacient i que es comuniquen entre ells per a encaminar la informació cap al centre receptor i formar una xarxa de comunicacions personal anomenada *xarxa d'àrea personal* (PAN, *personal area network*).

## 4.4. Comunicacions

La majoria de dispositius que conformen les xarxes de comunicacions són constituïts per un microcontrolador, la seva memòria i una interfície de comunicació. Així, doncs, els encaminadors (*routers*) o els commutadors (*switch*), entre d'altres, no deixen de ser sistemes de propòsit específic. L'auge de les comunicacions ha fet que cada vegada apareguin més dispositius multiinterfície que permeten la comunicació utilitzant diferents tecnologies. En aquest apartat no podem oblidar els telèfons mòbils que són la tecnologia que ha experimentat un creixement més destacat en els darrers anys. En aquest àmbit, són especialment important les comunicacions de radiofreqüència i els dissenys de sistemes energèticament eficients.

## 4.5. Electrodomèstics i electrònica de consum

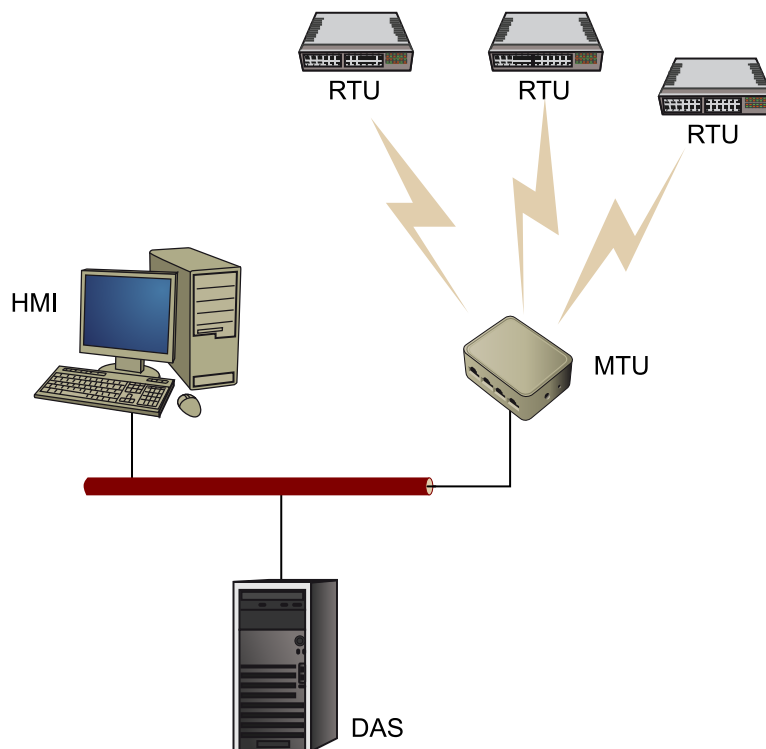
Des dels telèfons mòbils fins als reproductors de música, passant per les cuines d'inducció, aires condicionats i calefaccions, trobem un o diversos sistemes de propòsit específic que regeixen el funcionament d'aquests dispositius. Tant és així que molts dels electrodomèstics que tenim a casa ja inclouen interfícies o ports estàndard d'expansió que permeten estendre les funcionalitats dels aparells com, per exemple, afegint-hi un control remot. En aquest context, no cal parlar dels sistemes d'entreteniment i videojocs, estesos cada vegada més amb dispositius de maquinari que n'augmenten la interactivitat mitjançant sensors i actuadors.

#### 4.6. Automatismes industrials i processos de control

Els sistemes SCADA<sup>6</sup> i autòmats de control són implementats cada vegada més amb sistemes de propòsit específic. Malgrat que la indústria té una gran inèrcia a l'hora d'integrar noves tecnologies, els sistemes encastats amb comunicacions sense fil abarateixen extremament els costos d'instal·lació, i els fa molt interessants i ràpidament amortitzables. Fa uns anys, els sistemes de control solien estar centralitzats en un computador central i gestionats per un programari SCADA. Aquests ordinadors eren un punt crític per a l'operació de la indústria, ja que en cas de fallada s'aturaven molts processos. L'abaratiment dels sistemes encastats, juntament amb les comunicacions sense fil, ha permès dur-ne un control descentralitzat, ja que els mateixos sistemes sensors són capaços de processar les dades i enviar-les a sistemes web en què la replicació i la tolerància a fallades és molt més senzilla.

<sup>(6)</sup> *Supervisory control and data acquisition*, en anglès.

Arquitectura SCADA



Un servidor central, un centre de control i els dispositius sensors

#### 4.7. Logística

En moltes aplicacions de logística s'equipen les matèries primeres amb identificadors de radiofreqüència (*tags*), o RFID, que permeten fer el seguiment dels productes. Tant el control com la lectura d'aquests identificadors es fa mitjançant sistemes de control basats en sistemes de propòsit específic.

## 4.8. Agricultura

L'aparició de múltiples sistemes d'irrigació, fertilització del sòl i control del creixement de vegetals i plantes comencen a introduir un canvi en els models d'agricultura tradicionals. Malgrat els costos d'introduir la tecnologia al camp, alguns estudis demostren grans augments de la productivitat, cosa que fa molt interessant aquesta tecnologia per al sector. Per exemple, s'han començat a aplicar controls exhaustius en la viticultura i l'horta de regadiu atesa la rellevància de les millores que els dispositius encastats poden aportar a la producció agrícola en aquests sectors i l'increment evident del volum de negoci que això significa.

## 4.9. Infraestructures

Gràcies a les capacitats de comunicació sense fil, els consums energètics baixos i les dimensions reduïdes, els sistemes encastats poden ser usats com a sistemes de mesurament en llocs gairebé inaccessibles en tota mena d'infraestructures. Això permet controlar la salut d'edificis, ponts, preses, etc. L'evolució d'aquests sistemes ha donat peu a l'aparició de termes com *smart cities* o *smart infraestructures*, que denominen ciutats plenes de sistemes de mesurament sense fil posats al servei del control de les grans infraestructures o ciutats. Inclouen sistemes de control de trànsit i de pol·lució, sistemes de control acústic o de lluminositat a gran escala, per esmentar-ne alguns.

## 4.10. Seguretat

En els últims anys, els sistemes de seguretat han anat incorporant tota mena de sistemes de propòsit específic, des de sistemes de captura i processament d'imatges fins a sistemes sensors i actuadors, passant per sistemes d'autenticació de persones, per exemple, mitjançant l'empremta dactilar o l'escàner de retina.



Control de les vinyes fent ús d'un dispositiu encastat dotat d'interfície de comunicació sense fil

### SmartSantander

El 2011, la ciutat de Santander iniciava un projecte anomenat SmartSantander i que pretén instal·lar més de 20.000 sensors a tota la ciutat amb l'objectiu de donar servei a la ciutadania.

## 5. Consideracions de disseny

El procés de disseny d'un sistema encastat es basa en la creació d'un model del dispositiu en qüestió. Normalment, el procés de disseny requereix una metodologia específica que ha de tenir en compte els requisits següents:

- **Jerarquia.** Els éssers humans generalment no són capaços de comprendre sistemes molt complexos formats per molts objectes fortament interrelacionats. D'aquesta manera, fer ús de jerarquies permet concebre els sistemes d'una manera estructurada i permet focalitzar el disseny en cadascuna de les parts. Podem considerar dos tipus de jerarquies:
  - **Jerarquies de comportament.** Contenen els objectes necessaris per a descriure el comportament del sistema: estats, esdeveniments, senyals d'entrada i de sortida...
  - **Jerarquies estructurals.** Descriuen la composició física del sistema. Per exemple, processadors, memòries, actuadors i sensors. Al seu torn, els processadors inclouen registres, multiplexors, sumadors... Els multiplexors són constituïts, al seu torn, per portes lògiques.
- **Disseny orientat a components.** El sistema ha de poder ser especificat usant components amb funcionalitats definides. Ha de ser senzill derivar el comportament d'un sistema del comportament dels seus components. Si dos components estan interconnectats, el comportament d'ambdós ha de ser previsible.
- **Concurrencia.** Atès que el sistema és una composició de components, hem d'esperar que aquests treballin d'una manera simultània i, per tant, donar peu a situacions de concurrència. Per al dissenyador és difícil preveure les situacions de concurrència, i per això és un aspecte crític que cal tenir en compte en la fase de disseny. Val a dir que, en molts casos, les possibles fallades són per un coneixement incomplet de les situacions de concurrència.
- **Sincronització i comunicació.** Els components s'han de poder comunicar i sincronitzar. S'han de poder expressar prioritats i posar-se d'acord en l'ús de recursos (exclusió mútua).
- **Comportament temporal.** Molts dels sistemes encastats són sistemes en temps real. Així, doncs, els requisits de temps són crítics i han de ser especificats durant la fase de disseny del sistema. És crucial en el disseny d'alguns algorismes que s'executaran en un sistema encastat demostrar que l'algorisme finalitza de manera determinista en un temps determinat. Generalment, es fan servir tècniques per al següent:



- **Mesurar el temps emprat.** Per a moltes aplicacions és necessari mesurar el temps que ha passat des d'un cert instant fins que s'ha acabat l'execució.
- **Retardar processos durant un període.** Típicament els llenguatges de programació per a sistemes en temps real ofereixen mètodes per a introduir endarreriments. No obstant això, en molts casos aquests mètodes no són gaire precisos, ja que utilitzen el planificador de tasques del sistema operatiu que introdueix certs endarreriments a causa dels canvis de context.
- **Possibilitat d'especificar temporitzacions (*timeouts*).** En moltes situacions el que es vol és esperar un cert esdeveniment. Pot passar, però, que aquest esdeveniment no succeeixi en un període de temps finit i, per tant, volem que se'ns notifiqui d'això per tal d'evitar que el sistema esperi eternament. Un cas comú el podríem trobar quan s'espera un paquet de resposta a través de la xarxa i volem ser notificats si aquest no s'ha rebut en un període de temps determinat. Els llenguatges de programació en temps real acostumen a oferir aquesta mena de funcionalitats.
- **Mètodes per a especificar retards i planificacions.** Per a certes aplicacions, cal completar certs càlculs en un període de temps concret. Desafortunadament, la majoria de llenguatges de programació no permet imposar restriccions de temps; alhora, el maquinari presenta cada cop més un comportament més impredecible (temporalment parlant), a causa de l'ús de memòries cau, *pipelines* d'execució, execució especulativa, prioritització de tasques, interrupcions, etc., la qual cosa fa molt difícil que es perdi el temps d'execució d'un algorisme.
- **Comportament definit per estats.** És molt útil utilitzar màquines d'estat automats per a definir el comportament del sistema. No obstant això, la temporització no es pot modelar en una màquina d'estats ni tampoc s'hi poden modelar jerarquies complexes.
- **Gestió d'esdeveniments.** Fruit de la naturalesa reactiva dels sistemes encastats, es requereixen mecanismes per a descriure esdeveniments. Els esdeveniments poden ser externs (causats per l'entorn) o bé interns (causats pel comportament del mateix sistema).
- **Comportament definit per excepcions.** En la majoria dels sistemes hi ha excepcions. Per tal que els nostres sistemes siguin robustos, s'han de poder definir accions que gestionin les excepcions d'una manera senzilla.
- **Suport al disseny de sistemes grans.** De vegades, s'han de desenvolupar sistemes grans i complexos amb funcions molt específiques. S'han de fer servir metodologies per a dur a terme aquests dissenys, entre d'altres,

**Exemple**

Si el conjunt de sensors d'acceleració d'un cotxe detecta una forta desacceleració, el coixí de seguretat s'ha d'engegar amb un temps no superior a 10 ms; en aquest context, el sistema ha de garantir que es prendrà la decisió d'activar o no del coixí de seguretat en aquest temps.

l'orientació a objectes o a components són cabdals. S'han de reaprofitar les tècniques i les metodologies existents per tal de minimitzar els esforços en aquest sentit.

- **Llegibilitat.** El disseny s'ha d'especificar en un document que ha de ser llegible. La documentació és tan important o més que el mateix disseny. S'han de desenvolupar documents que puguin ser llegits per humans i també especificacions que puguin ser fàcilment transformades en programes.
- **Portabilitat i flexibilitat.** Les especificacions han de ser independents del maquinari específic perquè puguin ser utilitzades d'una manera senzilla en altres plataformes o components. Idealment, s'hauria de poder canviar la plataforma de maquinari sense que això n'afectés l'especificació –encara que, a la pràctica, sempre calen alguns canvis.
- **Finalització.** Ha de ser possible identificar el cicle de vida de l'aplicació a partir de la seva especificació. S'han de poder determinar els seus estats de finalització.
- **Support per a dispositiu d'E/S no estàndard.** Molts sistemes de propòsit específic fan servir dispositius d'E/S no estàndard. S'han de descriure les entrades i sortides d'una manera convenient.
- **Propietats no funcionals.** S'han de tenir en compte també altres propietats no funcionals com la tolerància a fallades, la mida, l'extensibilitat, l'esperança de vida del sistema, el consum, el pes, la usabilitat, l'aspecte, la compatibilitat electromagnètica... S'han de definir aquestes propietats formalment.

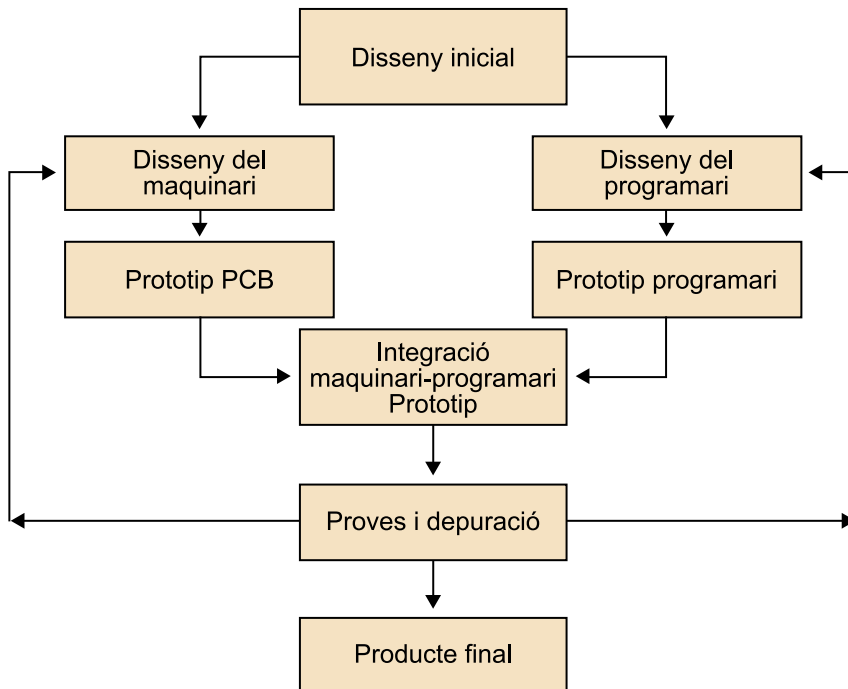
## 6. El procés de desenvolupament

La concepció del sistema en la seva totalitat és part d'una idea d'una persona, o d'un equip de disseny o d'un encàrrec a mida fet per a un "client" que vol resoldre un problema determinat.

Podem establir un sèrie de tasques prèvies que culminaran en l'elaboració d'un avantprojecte, sobre la base del qual es prendran les decisions de seguir endavant o descartar el procés:

- 1) Determinació dels requisits globals del sistema.
- 2) Selecció del microprocessador, microcontrolador o DSP més adequats.
- 3) Selecció de la tecnologia de fabricació més adient.
- 4) Elecció de la memòria i del sistema operatiu, si escau.
- 5) Determinació de les entrades/sortides, comunicacions, etc.
- 6) Determinació de les necessitats d'homologació en funció de l'aplicació.
- 7) Selecció de l'equip humà més escaient per al seu desenvolupament, selecció de proveïdors maquinari i programari, etc.
- 8) Elaboració d'un avantprojecte, com més detallat millor, que ens permeti avaluar la viabilitat tècnica i econòmica del sistema, i també generar un pressupost de costos tan veraç com sigui possible. Des de la primera fase, coneguda com a **disseny previ del sistema**, fins a l'última, que consisteix en la decisió del producte final, s'ha de tenir cura de l'ordre d'execució de les tasques i encavalcar totes les que sigui possible, de manera que s'obtingui un producte fiable en el mínim temps possible d'accés al mercat (*time-to-market*).

Diagrama de fases per al disseny d'un sistema encastat



En aquesta figura es mostra un diagrama simplificat amb les fases que cal seguir i que comentem a continuació:

a) Disseny inicial del sistema que inclou tot un seguit de tasques que acabaran en l'elaboració d'un esquema elèctric del sistema i en un disseny de necessitats de programari.

b) A partir de l'esquema i de la forma física de cadascun dels components que hi intervenen, disseny maquinari del sistema. Aquesta tasca inclou el posicionament de cadascun dels components i de l'encaminament de les pistes conductores que duren a terme les interconnexions necessàries entre els pins dels components, cosa que generarà un prototip de placa de circuit imprès (PCB). A partir d'aquesta PCB, un cop produïda, es duu a terme el muntatge o l'assemblatge de tots i cadascun dels dispositius mitjançant el procediment de soldadura més adequat. Aquest procés acaba en un prototip de maquinari.

c) Desenvolupament del prototip de programari amb la programació inicial del microcontrolador o dels microcontroladors que formin part del sistema encastat.

d) Integració del maquinari/programari mitjançant l'abocament o la programació en el circuit dels microcontroladors. Així, es disposarà del primer prototip preparat per a procedir al seu test i depuració.

e) Proves i depuració del programari i maquinari mitjançant l'ús de prototips fins a arribar a la versió final. Si es detecten errors en el maquinari serà necessari redissenyar la placa i tornar a començar el procés. Si els errors són de programari, el procés és similar, tret que és menys costós quant a materials que no quant a hores d'enginyeria.

f) Obtenció del producte final. Després del resultat satisfactori en totes les proves s'aconseguirà el producte final. En el cas de previsions de fabricació massiva caldrà fabricar presèries i provar-les per a minimitzar, així, els imprevistos amb vista a la fabricació en sèrie d'altres quantitats.

## **6.1. Uns altres aspectes que cal tenir en compte en el disseny**

A continuació, es comenten una sèrie d'aspectes que cal tenir en compte per a l'èxit del projecte de sistema encastat que s'ha de dur a terme.

### **6.1.1. Determinació dels requisits del sistema**

Una de les parts més importants del desenvolupament d'un sistema encastat és la definició dels requisits tècnics i funcionals per a poder complir les especificacions de l'aplicació que es vol fer. Com més acuradament es dugui a terme aquesta fase prèvia a la creació d'un prototip, menys probables seran els canvis no volguts tant en el maquinari com en el programari. Tot i així, cal recordar que el desenvolupament del sistema generalment és un procés iteratiu. En recórrer els últims passos del projecte, pot sorgir la necessitat de revisar les primeres fases per a aconseguir un producte més fiable, més consistent i que compleixi tots els requisits especificats prèviament.

Caldrà tenir en compte una sèrie de consideracions tècniques, com ara les següents:

- **Definició de les interfícies de control**
  - Els tipus de dispositius que caldrà controlar o amb els quals s'haurà de comunicar, i també les propietats elèctriques i mecàniques de les seves interfícies.
  - Una definició general dels requisits de tipus de memòria (volàtil, no volàtil, estat sòlid, magnètica...).
  - La definició de com el sistema interactuarà amb les persones (monitor, teclat i lector de codis de barres, entre d'altres).
  
- **Definició de l'aplicació de programari**
  - Descripció específica de totes les característiques de l'aplicació de programari.
  - Característiques de depuració.
  - Possibilitat d'actualització del programari.

- Previsió de controladors (*drivers*) per al funcionament del maquinari extern.
- **Requisits d'alimentació**
  - Possibilitat d'alimentació mitjançant bateria o piles.
  - Alimentació de seguretat per a condicions de caiguda de l'alimentació principal.
  - Previsions generals de consum del sistema.
- **Requisits tèrmics del sistema**
  - Marge de temperatura nominal.
  - Refrigeració per ventilador o per convecció.
  - Ubicació dels components per a una gestió tèrmica efectiva.
  - Condicions ambientals externes per a determinar les necessitats de control tèrmic.
  - Temps de vida esperat del sistema enfront de les necessitats de control tèrmic.
- **Disseny de la forma i de la grandària**
  - Restriccions quant a dimensions.
  - Robustesa del producte.
- **Necessitats de rendiment**
  - Necessitats de velocitat de processament.
  - Capacitat de manejar interfícies gràfiques.
  - Capacitat d'executar programari exterior.
  - Capacitat de comunicar-se amb altres interfícies d'alta velocitat.
- **Definició dels subsistemes principals**
  - Els subsistemes principals amb prou complexitat han de tenir una definició similar a la del sistema complet per a evitar problemes o costos d'integració elevats.

### 6.1.2. Consideracions pel que fa al projecte

#### 1) Previsió del temps que el producte viurà al mercat

- Disponibilitat de components.
- Suport i manteniment del producte venut.

#### 2) Estimació del temps de desenvolupament

- Finestra temporal de l'oportunitat de mercat.
- Velocitat per a treure els primers prototips.
- Disponibilitat de trobar desenvolupadors amb experiència.

### 3) Nivell d'experiència de disseny o desenvolupament

- Experiència de disseny de maquinari.
- Familiarització amb els entorns de programació.

### 4) Actualitzacions del programari

- Nombre esperat d'actualitzacions.
- Previsió del creixement de la grandària del programa.
- Possibilitat de fer actualitzacions remotes del programa.

### 5) Efectivitat de la plataforma de desenvolupament

- Temps volgut per a la finalització del primer prototip.
- Disponibilitat d'eines.
- Capacitat d'utilització o integració de perifèrics.
- Facilitat d'ús.
- Manteniment:
  - Procediment d'actualització del maquinari i del programari.
  - Manteniment o substitució de components.
  - Manteniment o substitució de subsistemes.
  - Manteniment tèrmic del sistema.
  - Actualitzacions del maquinari.
  - Estudi de les necessitats d'actualització.
  - Expansió i modularitat del disseny.

#### 6.1.3. Consideracions pel que fa al disseny del sistema encastat

Els fabricants de semiconductors proporcionen els microprocessadors, microcontroladors i DSP en forma de xip sota una àmplia gamma d'encapsulatges, en general cada vegada amb dimensions més reduïdes i més adaptats a nous processos industrials de soldadura que permeten reduir costos i automatitzar processos. Normalment, el maquinari es dissenya en dues fases: creació dels esquemes elèctrics i creació del format (*layout*) de la PCB.

#### Elaboració dels esquemàtics

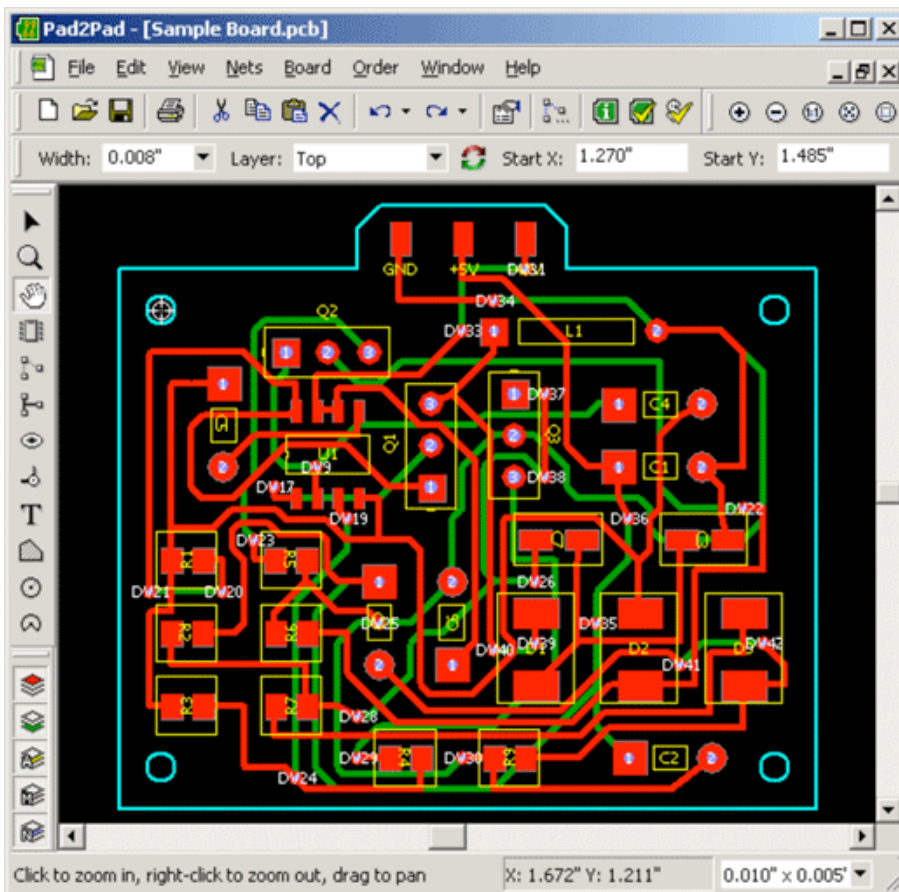
El disseny electrònic del sistema es fa mitjançant uns diagrames anomenats **esquemes elèctrics**, els quals representen els components mitjançant símbols i les seves interconnexions mitjançant línies, de manera que sigui fàcil o digerible de visualitzar. Aquests diagrames es fan amb eines de programari tipus CAD<sup>7</sup>, com ara PSPICE, Orcad, Altium o VeriBest d'Intergraph.

<sup>(7)</sup>Sigla del terme anglès *computer aided design*, disseny assistit per ordinador.

Uns bons esquemes han d'incloure informació extra requerida per a entendre el funcionament del sistema. Entre altres coses, han de figurar noms representatius en les línies que representen busos o senyals entre dos components.

Tots els components que es col·locaran en la placa del circuit imprès han de tenir la seva representació en els esquemes mitjançant símbols, normalment rectangulars, amb els seus pins al voltant. El dissenyador dels esquemes ha de consultar la documentació tècnica o especificacions dels components utilitzats de tal manera que es faci la connexió entre ells correctament. S'ha de tenir cura d'aspectes com la temporització en les comunicacions entre ells i les càrregues (això és, que una sortida proporcioni prou corrent elèctric per a les entrades a les quals arriba). Sobretot a altes freqüències de treball del sistema (per sobre de 50 MHz), cal controlar l'adaptació entre components, això és, que no es produeixin reflexions d'ones elèctriques en les interconnexions entre components, ja que faran impossible la transferència d'informació llegible.

Esquemàtic





## Creació del format de la PCB

El format (*layout*) consisteix en una representació exacta de les *empremtes* (*footprint* en anglès) dels components i de les pistes que uneixen els seus pins o terminals. S'entén per *empremta d'un component* els punts de material conductor que necessita en la placa base per a poder ser soldat i fixat, mentre que les pistes són les línies de material conductor d'amplària determinada que permetran la propagació elèctrica dels senyals entre els components.

La placa és formada per una làmina de fibra de vidre o similar amb diverses capes de coure (dues d'exterior i possibles internes, com si fos un sandvitx). Mitjançant els *gerbers*, el fabricant de PCB pot construir la placa amb les empremtes i les pistes necessàries. Després d'això es poden soldar els components. El format també es fa mitjançant una eina CAD, integrada amb la de creació d'esquemes. Així, els esquemes dirigeixen la creació del format establint quins han de ser les unions entre els components, ara en forma de pistes que recorreran el camí necessari per a unir dos punts.

Entre els aspectes que cal tenir en compte en la creació de la PCB, hi ha la possibilitat de triar encapsulatges de diferents formes o tipus per a un mateix component, i també la compatibilitat electromagnètica de la placa (això és, que els senyals d'alta freqüència no interfereixin amb altres de la mateixa placa ni amb uns altres de l'exterior). Mitjançant l'eina de l'encaminador o de l'*autorouter*, el programa CAD pot dibuixar totes les pistes només triant el lloc on anirà cada component (ubicació o *placement*). Depenent de la densitat de pistes, poden ser necessàries més o menys capes de pistes de la PCB. Tanmateix, això només funciona per a dissenys senzills, i el procediment d'encaminar plaques PCB complexes acaba essent una tasca que requereix molta experiència.

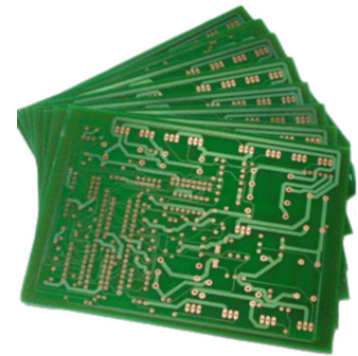
Existeix una jerarquia de disseny d'un sistema encastat, que podem expressar segons el nivell d'integració en els punts següents:

- 1) **Nivell de xip.** Utilització de sistemes CAD per a disseny electrònic per a procedir al seu disseny i simulació.
- 2) **Nivell de targeta (PCB).** Sobre un substrat aïllant amb unes dimensions físiques determinades, es procedeix a dissenyar el format de la targeta. Posteriorment, se solden els dispositius. Les tecnologies de disseny se solen definir com a:

- convencionals,
- muntatge superficial (SMT) o
- híbrida de capa fina i capa gruixuda.

Al seu torn, segons la manera d'interconnectar els dispositius podem parlar de:

- simple capa,



PCB

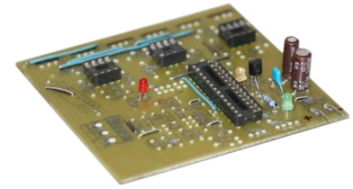
### Gerbers

Els *gerbers* són uns dibuixos que representen el format.

- doble capa o
- multicapa.

### **Muntatge dels components sobre la PCB**

El prototip és un equip maquinari que té parts idèntiques a les del producte final però que no està complet. Fins i tot, pot ser diferent del producte final però amb fortes semblances. Però ha de servir per a anar provant mòduls de programari i amb això també el maquinari, que també ha de ser depurat. Aquest prototip es pot construir adquirint els components necessaris i fabricant una PCB, o bé es pot comprar a un tercer una placa d'avaluació del microprocessador utilitzat (d'aquesta manera, s'aconsegueix estalviar temps en el disseny). Les plaques d'avaluació permeten emular el funcionament del prototip final i comprovar el funcionament del programari dissenyat. No obstant això, en última instància sempre s'haurà de provar el programari en el prototip final en una fase d'integració.



Placa *layout* i components d'un prototip

### **Integració del sistema**

En aquesta fase és la primera vegada que es prova el sistema complet (tant de programari com de maquinari conjuntament). En realitat, el que es prova és el maquinari, utilitzant el programari desenvolupat abans. Normalment, abans d'aquesta fase, el programari és verificat després de les proves dutes a terme amb els *kits* de desenvolupament i emuladors, els quals ofereixen un comportament gairebé idèntic al que ha d'oferir el maquinari.

La integració és el moment de la veritat, en què es verifica el bon funcionament del maquinari desenvolupat. Aquest és un pas de molta ansietat en el procés de desenvolupament, ja que és on hi ha els errors més costosos i que han de ser solucionats ràpidament.

Desafortunadament, la integració del sistema acostuma a tenir lloc prop del final del cicle de vida del projecte i, per tant, el temps disponible per a solucionar els errors normalment és curt. Depenent del tipus de sistema encastat, el cost afegit a l'hora de corregir un error augmenta de 2 a 10 vegades per cada fase de vida.

Hi ha nombroses estratègies per a reduir el temps d'integració dels sistemes. Una de les millors consisteix a crear un prototip de maquinari dins de la fase de disseny del maquinari i fer proves de diferents parts del programari que es va desenvolupant. A més, el desenvolupament del programari s'accelera, atès que no cal perdre temps implementant programari que simuli el maquinari encara inexistent.

## Proves, depuració i producte final

La prova final consisteix en la comprovació que el sistema compleix tots els requisits esperats. Les proves poden ser alfa, si es fan a la mateixa empresa de desenvolupament del sistema, o beta, si es fan amb el client o usuari al lloc que ell disegni. Després d'aquesta fase, només queda la política de manteniment (principalment programari) que s'estableixi entre ambdues parts.

## Altres consideracions sobre el disseny del programari

El programari que cal crear perquè el sistema compleixi la seva funcionalitat se sol començar a desenvolupar en paral·lel amb el disseny del maquinari. Una vegada acabats el maquinari i el programari, es podrà efectuar la integració del sistema. Mentre no arriba aquest moment, el programari es desenvolupa, depura i prova amb emuladors de programari o maquinari que proporcionen els fabricants dels microcontroladors emprats o altres empreses especialitzades en aquestes fases de disseny.

Si s'utilitza una arquitectura de tipus PC, es pot simplificar el desenvolupament del programari, atès que en el mercat hi ha nombrosos mòduls ja implementats que es poden comprar. On podria haver-hi una complexitat més gran és en els requisits de temps real que pugui tenir el sistema. El programari es comença a desenvolupar per una fase inicial de captura de **requisits d'usuari** (el que l'usuari final espera obtenir del sistema). Després d'això, s'estableixen els **requisits de sistema** (el que el sistema ha de tenir per a poder complir els requisits d'usuari). Cal destacar, també, la importància de documentar el programari, igual que el maquinari. En el codi, cal afegir línies de comentaris que descriguin la funcionalitat o la utilitat de les variables i de les funcions, i fins i tot explicacions de trossos de codi. També s'ha de generar un document amb la descripció del programari. Aquest queda pràcticament constituït amb els diagrames que es van generant amb la metodologia UML.

### Vegeu també

En veurem més detalls en el mòdul "Simulació i test".

### Requisits de sistema i d'usuari

Els requisits de sistema són més tècnics que els de l'usuari i en general n'hi ha més, ja que per a cobrir un requisit d'usuari poden ser necessaris més d'un requisit de sistema.

## Resum

Aquest mòdul ha introduït el concepte de *sistema encastat* o *de propòsit específic*. Hem vist que aquests sistemes són àmpliament utilitzats avui en dia i que són presents en gairebé tots els dispositius i totes les infraestructures tecnològics que ens envolten. El mòdul ens ha presentat les diferents tipologies de sistemes encastats des d'un punt de vista del nivell d'integració. Hem vist, per exemple, que hi ha dispositius que estan basats en un computador complet integrats en una sola placa; d'altres, són plaques que adhireixen funcionalitats a un altre sistema connectant-se a ports d'expansió amb formats estandarditzats. També hem vist les iniciatives d'integració dels sistemes encastats en un únic xip que, malgrat el cost de producció que tenen, abarateixen els costos de desenvolupament quan un dispositiu és usat massivament.

Hem copsat que el factor de forma és important i com la indústria s'ha posicionat per tal d'oferir diversos estàndards en què s'han definit les mides, l'encapsulatge, l'apilament i la interconnexió de sistemes encastats per a assegurar la connectivitat, la compatibilitat i els costos reduïts d'aquests sistemes. Aquest fet ha estat determinant per a la introducció massiva d'aquest tipus de dispositius al mercat.

Pel que fa a l'aplicació dels sistemes encastats, se n'han presentat breument els usos més rellevants. Hem vist que des de la medicina passant per desenvolupaments militars fins a l'agricultura es fan servir dispositius amb capacitats de monitoratge, adquisició de dades o d'actuació sobre altres mecanismes o dispositius i que han permès assolir fites que fins fa pocs anys no eren possibles.

Finalment, el mòdul ens ha guiat pel procés de disseny i desenvolupament d'un sistema encastat, i ha fet èmfasi en els aspectes teòrics i pràctics més rellevants per a la construcció d'un sistema encastat.

## Activitats

1. Busqueu quin microcontrolador fa servir el vostre telèfon mòbil. Qui el fabrica, quines característiques té? Qui n'ha fet l'especificació? Té ports d'E/S?
2. Feu un diagrama detallat del procés de desenvolupament d'un sistema encastat. Us podeu basar en el diagrama que hi ha en la primera figura que consta en l'apartat 5: "El procés de desenvolupament".
3. Busqueu informació sobre el procés de prototipatge. Com es creen els PCB? Quines eines necessitariu?
4. Compareu els microcontroladors Atmel Atmega 1281 i el Texas Instruments MSP430. Quina arquitectura tenen? Quin format d'instrucció? Quanta memòria? Quants bits?

## Bibliografia

**Ganssle, J. G.** (2000). *The Art of Designing Embedded Systems* (1a. ed.). Woburn, Massachusetts: Newnes (Elsevier).

**Marvedel, P.** (2003). *Embedded System Design* (1a. ed.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

**Peckol, J. K.** (2008). *Embedded Systems: A Contemporary Design Tool*. Hoboken, Nova Jersey: Wiley.

**Stuart R. B.** (2002). *Embedded Microprocessor Systems: Real World Design* (3a. ed.). Woburn, Massachusetts: Newnes (Elsevier).

**Yaghmour, K.** (2003). *Building Embedded Linux Systems*. Sebastopol, Califòrnia: O'Reilly and Associates.