

ELS SISTEMES ENCASTATS: IMPACTE I REPTES DE FUTUR

Joan Verdaguer-Codina, José Luis Rubiés, David Badia, Xavier Pi i Manel Frigola¹

Grup de Treball en Sistemes Encastats del Col·legi d'Enginyers Industrials de Catalunya

Resum: S'analitza l'impacte que tenen els moderns sistemes electrònics encastats en diferents àmbits, com són la societat, l'àmbit industrial i l'educació. Es presenta una breu definició del que és un sistema encastat i es donen alguns exemples de les aplicacions que pot tenir. Es fa un repàs de les tendències actuals dels sistemes encastats i una projecció a mitjà i llarg termini de l'impacte que poden arribar a tenir. Es conclou amb unes recomanacions d'actuació amb l'objectiu de preparar la societat i la indústria catalana vers l'imminent futur dels objectes cibernètics interconnectats.

Paraules clau: sistemes encastats, Internet de les coses, ciberobjectes.

EMBEDDED SYSTEMS: IMPACT AND FUTURE CHALLENGES

Abstract: The impact of modern embedded electronic systems in different scenarios – such as society, industry and education – is analyzed. A brief definition is given of what an embedded system is, providing some examples of possible applications. A review of current trends in embedded systems is made, presenting a medium- and long-term impact projection. This introductory article concludes with some recommendations for action in order to prepare Catalonia's industry and society in general for the imminent future of the cyber interconnected objects.

Keywords: embedded systems, Internet of things, cyberobjects.

1. Introducció

El terme *sistemes electrònics encastats* (*embedded systems*, en anglès) es refereix a aquells dispositius electrònics, inserits en un equip o aparell, que han estat dissenyats específicament per a realitzar una funció concreta de control o monitorització. Actualment, la majoria dels elements electrònics que utilitzem en la nostra vida quotidiana inclouen un sistema encastat. Trobem sistemes electrònics encastats (SE) inserits en les sondes aeroespacials, aeronaus, drons, instruments mèdics, cotxes, fresadores, torns, impressores, televisors, aparells d'aire condicionat, neveres i, fins i tot, en aparells tan simples com làmpades o torrades.

Una definició més concreta del que és un SE podria ser l'adoptada a [1]: «Un sistema encastat és una combinació de maquinari i programari destinat al control i el monitoratge mitjançant un conjunt finit de funcions ben definides, sovint amb capacitats de procés en temps real, integrat dins d'un sistema més ampli». A grans trets, un SE consta bàsicament d'una unitat central de processament amb interfícies d'entrada per a la lectura

dels sensors, una sèrie d'interfícies de sortida per a poder controlar els dispositius actuadors (motors, vàlvules, etc.) i els dispositius indicadors (LED, monitors, etc.) i algunes interfícies de comunicació. Amb aquestes interfícies de comunicació, els SE poden transmetre les dades més rellevants del procés que estan controlant, dades com poden ser la temperatura, la pressió, els índexs de contaminació, el consum, etc. Precisament, és l'augment en els últims anys de l'abast i la velocitat de transmissió de les interfícies de comunicació el que en certa manera més ha revolucionat els SE, i ha atret així molts sectors de la indústria i la societat en general. Gràcies a la capacitat de comunicar-se amb l'exterior, els SE estan deixant de ser sistemes aïllats per començar a formar part d'un núvol d'elements interconnectats per Internet. En la figura 1, s'intenta exemplificar el concepte *objectes interconnectats*, i s'hi mostra una hipotètica situació en què una persona, després d'una situació imprevista, vol conèixer on es troben els seus efectes personals i el seu animal de companyia. Gràcies al fet que els objectes estaran equipats amb SE i, per tant, seran capaços d'indicar la seva posició al núvol d'Internet mitjançant una comunicació sense fil, l'usuari podrà conèixer l'estat i la posició dels seus objectes personals i el seu animal de companyia.

1. Correspondència: Manel Frigola, manel.frigola@upc.edu.



FIGURA 1. En un futur proper, milions d'objectes quotidians incorporaran un sistema electrònic encastat amb capacitat d'interconnexió mitjançant Internet.

FONT: Elaboració pròpia.

La constatació que el nombre de dispositius interconnectats està creixent exponencialment i la previsió que, en un futur a curt termini, moltíssims dels objectes fabricats per l'ésser humà estaran connectats són dues de les idees centrals de la Internet de les coses (*Internet of things*, IoT). La IoT és un concepte basat en la connectivitat dels objectes, centrat en la noció de xarxa i en els serveis, i que implica des dels SE dotats de sensors fins a les infraestructures de la informàtica en núvol (*cloud computing*) i la mineria de dades (*data mining*).

Des del punt de vista social, els SE estan produint un fenomen prou inèdit [2]. El «fes-ho tu mateix» (*do it yourself*, DIY) i el món del *hobby* han evolucionat, ja que han incorporat maquinari programable de baix cost (Arduino i Raspberry Pi, entre d'altres) a tot tipus de mecanismes i dispositius. Amb la incorporació dels SE en el món del lleure com a afició de moltes persones, s'han aportat noves aplicacions d'alt valor afegit, oferint llicències lliures i socialitzant encara més el fenomen.

2. L'ús dels sistemes encastats en l'educació

En un nou context que està aflorant, les tecnologies productives digitals i l'ús d'Internet com a xarxa de coneixement global, combinats amb dinàmiques de cocreació, coinnovació, generació de coneixement distribuït i la cultura de compartir, contribueixen a un canvi de model en els sistemes d'ensenyament [12]. Aquest canvi en el model d'ensenyament ha estat propiciat principalment per dos factors: el primer, la digitalització de les aules provocada per l'entrada dels ordinadors, els mòbils i l'accés a Internet; i el segon, per les indústries, que com a coneixedores de les necessitats digitals veien la manca de gent formada en informàtica des de l'ensenyament obligatori com una amenaça a la seva supervivència. Aquesta mancança va provocar que diverses indústries establertes al Silicon Valley fessin una petició conjunta de canvis curriculars a la National Science Foundation (NSF) l'any 2009. Des de llavors, i fins i tot abans, s'han generat moltes iniciatives de grups de treball i de professorat que, sense comunicar-se

entre ells, han vist la necessitat fonamental de conèixer com funcionen els dispositius del món digital i incorporar-los en les matèries curriculars. De resultes de la pressió docent, la competència digital ha estat assenyalada per la Comissió Europea com una de les competències clau del segle XXI.

Roxanne Emadi, estratègia de Code.org, un grup amb seu a Seattle que promou l'«Hour of code» (una introducció a la programació d'una hora per mostrar que tothom pot aprendre a programar), diu que els nens i nenes d'avui dia estan enganxats als telèfons i a les tauletes, que estan constantment utilitzant la tecnologia, però molt pocs estan aprenent a crear-la. Actualment, a Europa existeixen dos models d'ensenyament on la informàtica s'ensenyava des de primària; un és a Estònia, des de fa quatre anys i per a alumnes de set a dinou anys, i l'altre és a Anglaterra, que durant el curs 2014-2015 ha començat a implantar el programa anomenat «Computing at school» (CAS) també des de primària, el qual ha marcat com a objectiu que en acabar la secundària els alumnes han de saber dos llenguatges de programació. A Catalunya, tot i la cotilla que representa el sistema educatiu dissenyat a Madrid, des de la Conselleria d'Ensenyament s'ha deixat clar en el setè fòrum ITworldEdu i, posteriorment, en el Mobile World Congress d'enguany que la competència digital és un objectiu a assolir pel sistema educatiu català. Una d'aquestes iniciatives és el conveni signat per l'Ajuntament de Barcelona amb la New York Academy of Sciences (NYAS) per a promoure el programa STEM («Science, technology, engineering and mathematics») a Barcelona, de la mateixa manera que ja s'està fent a Nova York. La NYAS és la tercera institució científica més antiga dels Estats Units, sense ànim de lucre i amb més de 25.000 afiliats de 140 països de tot el món, i va decidir prendre accions per a resoldre el problema de la manca de motivació dels joves en el camp científic i tecnològic als Estats Units. Les activitats que desenvolupa la NYAS contribueixen a expandir el coneixement científic i tecnològic per mitjà d'iniciatives diferents. Una d'aquestes iniciatives és despertar l'interès de la població en el camp de la ciència i la tecnologia; d'aquí ve la creació del programa STEM, orientat principalment a fomentar vocacions en aquests camps entre els alumnes de secundària [13]. La iniciativa STEM, mencionada anteriorment, utilitza una placa anomenada Arduino com a element clau dels mòduls d'aprenentatge en automatització i robòtica. La placa Arduino és un sistema de baix cost, de codi obert tant de programari com de maquinari, on les diferents versions estan pensades per a interaccionar amb objectes i construir dispositius de control interactius que poden detectar i controlar el món físic.

Una de les fites importants quant al maquinari de baix cost va venir dels membres d'un equip de Cambridge [14,15], amb un PC de baix cost encarregat per l'emissora de televisió BBC per a una campanya d'educació d'àmbit nacional relacionada amb les noves tecnologies. En aquest moment, i sense sospitar l'èxit del futur, es creen els fonaments del que després serà un sistema encastat, la Rasp-

berry Pi [16], un PC de molt baix cost que està a l'abast de les classes socials més desfavorides. El director de desenvolupament educatiu de Raspberry Pi, Clive Beale, diu que de la mateixa manera que no ensenyem música a l'escola perquè tothom sigui concertista de violí, no estem tractant de fer de cadascun un científic de la computació, però el que estem dient és que és bo per a tothom entendre els conceptes bàsics de com funcionen internament les coses del món digital. Raspberry Pi treballa amb el sistema operatiu Raspbian (una distribució de Linux), que porta incorporats per defecte els llenguatges Python i Mathematica, per esmentar-ne un parell. A diferència del microcontrolador Arduino [18], la Raspberry Pi és un veritable ordinador personal i no només un controlador; per tant, des de la perspectiva de l'aprenentatge de la programació és una eina més adient. Ambdues eines es complementen: si volem detectar i controlar sistemes físics, val més fer servir un microcontrolador Arduino [6]. En canvi, per a la gestió de les dades obtingudes i la seva interconnexió al núvol d'Internet, és millor utilitzar la Raspberry Pi.

Legó, empresa danesa, ha fet un gir al seu model de negoci basat en mecanismes simples mitjançant la introducció d'un sistema encastat que permet construir robots i programar tasques concretes d'una manera senzilla a estudiants de primària. Cal reconèixer que el sistema Lego Mindstorms és un model d'èxit de negoci a molts països; ara bé, no és econòmicament assequible per a moltes famílies i institucions educatives. La comparació és fàcil: pel preu d'un sistema Lego es poden comprar quasi vint plaques Arduino Uno. Val a dir que el producte Lego està molt ben acabat i les competicions de la Lego League són un esdeveniment mundial en el sector educatiu.

Però el començament de tota aquesta revolució digital [19] amb els sistemes encastats a les escoles no hauria estat possible si no hi hagués hagut un esforç en el desenvolupament de llenguatges de programació dels sistemes encastats que d'una manera senzilla i gràfica en permetessin el control. En aquest sentit cal destacar la tasca realitzada per un grup d'informàtics que en el Citilab de Cornellà de Llobregat va treballar per adaptar un senzill llenguatge basat en la composició gràfica de mòduls anomenat Scratch, del MIT, com una altra opció per a programar les plaques Arduino l'any 2010; van crear així l'anomenat «Scratch for Arduino» (S4A), que té una important comunitat d'usuaris [20]. De fet, els alumnes de la iniciativa educativa STEM que es porta a terme a Barcelona programen la placa Arduino amb Scratch.

Un altre exemple de l'esforç per a apropar les tecnologies informàtiques als estudiants és el que va iniciar un professor en el curs 2011-2012 amb el projecte «Python at K7» (K7 és l'equivalent a primer d'ESO als Estats Units) que té per objectiu introduir la programació a primer d'ESO: és una alternativa que dura un trimestre i que està lligada a tot un projecte educatiu fins a arribar als treballs de recerca de batxillerat. L'avantatge del llenguatge Python és la seva simplicitat inicial; se'l podria comparar amb el llenguatge BASIC dels anys setanta, però Python és po-

tent com C++ o Java, amb l'avantatge que inicialment Python no demana una gran capacitat d'abstracció per part dels que s'inicien en la programació.

Seguint la recomanació de molts grups que promouen l'educació en tecnologia, és necessari que les generacions que són a les escoles aprenguin a crear la tecnologia que fan servir, perquè si tenen una bona idea amb coneixements informàtics puguin iniciar una aventura empresarial. En el programa CAS, els alumnes del nivell KS3 (el KS3, segons la nomenclatura d'Anglaterra i el País de Gal·les, inclou els alumnes d'edats compreses entre els onze i els catorze anys) treballen amb el joc *Minecraft*, que està adaptat a la Raspberry Pi per programar amb Python, i així s'ensenya a programar.

Un altre factor que no hem d'obviar i que, en principi, no es va tenir en compte és la proliferació de l'ús del mòbil a les aules i la seva evolució. Aquesta situació es va començar a corregir amb la designació per part de la GSMA (Global Society Mobile Association) de Barcelona com a seu del Mobile World Congress, fet que va provocar que des del Govern de Catalunya i, concretament, des de la Conselleria d'Ensenyament es creés el programa «mSchools» [21]. En el programa educatiu «mSchools», estudiants de quart d'ESO, batxillerat i cicles formatius de grau mitjà aprenen a programar aplicacions per a dispositius mòbils i a controlar sistemes encastats des del mòbil, la qual cosa anticipa ja la revolució que està a punt d'arribar, la IoT. La penetració dels sistemes encastats a les escoles, junt amb la simplificació dels llenguatges de programació, està ajudant a introduir el pensament computacional i el treball per projectes com a element fonamental del procés d'aprenentatge a l'escola. Els pares i mares cada cop tenen més clar la importància que té la formació en informàtica per als seus fills. El resultat és un important augment de l'oferta d'activitats extraescolars que posen el focus en la robòtica educativa, la programació i l'ús dels sistemes encastats.

Finalment, queda l'ensenyament no reglat, que parteix de les iniciatives personals amb xarxa, les quals en alguns casos són entitats sense ànim de lucre. Aquest és el cas de la CoderDojo Foundation, una xarxa global de clubs de programació gratuïts per a joves d'entre set i disset anys, formada per voluntaris independents que treballen en comunitat i que funciona en ciutats com Barcelona. L'objectiu és compartir coneixement, el treball comunitari, la tutorització de joves i la programació com una força per a anar a un món millor. És evident que una munió de diferents programes educatius pot provocar un efecte no desitjat, i per aquest motiu es pretén aglutinar aquestes iniciatives. Així mateix, l'existència d'un conveni, sota el model de Centre d'Innovació Compartida, entre el Citilab i la Direcció d'Innovació de l'Institut Municipal d'Informàtica de l'Ajuntament de Barcelona és, sens dubte, una bona notícia que permetrà disposar d'una col·laboració continuada en el temps i que donarà els primers fruits amb la incorporació d'una funcionalitat que permet fer servir alguns serveis d'Internet, o la Xarxa d'Ateneus de Fabricació a Barce-

lona. Un dels seus pilars fonamentals és el programa educatiu, tant per a aquells que ja són fora de l'escola com per a aquells que, a causa d'unes circumstàncies determinades, no han pogut accedir a l'aprenentatge digital. La xarxa permetrà una aproximació ràpida a la robòtica, a la cultura del prototip i de la impressió 3D, i contribuirà així a la cultura del DIY i la seva evolució en el treball en grup, que s'anomena *do it with others* (DIWO). Tot això té un propòsit final, que és la millora socioeconòmica de la ciutadania, i en aquest objectiu entra el concepte *ciutat intel·ligent* (*smart city*, en anglès), la qual no es pot entendre sense ciutadans capaços d'aprendre i entendre la tecnologia, i aquesta tasca comença a l'escola. Una ciutat no serà intel·ligent si no és social i inclusiva, i situa el ciutadà o ciutadana en la posició central. En cas contrari, incorrerem en el risc de crear un nou tipus de pobresa que podem anomenar *pobresa digital*. Estem parlant d'un canvi d'època, no pas d'una època de canvi. En aquest canvi d'època, els sistemes encastrats seran la base de la IoT, on cada objecte tindrà la seva empremta digital. El món educatiu ha d'incorporar la robòtica educativa, els sistemes de control físics, la programació de mòbils, els anomenats *wearables* (dispositius que formen part de les peces de roba i complements), un seguit de SE que despertin la curiositat dels nostres estudiants.

3. L'impacte dels sistemes encastrats en la indústria

L'informe anual de 2013 de Siemens incorpora el discurs de la quarta revolució industrial plantejat per l'Acadèmia de Ciència i Enginyeria alemanya (Deutschen Akademie der Technikwissenschaft, Acatech) en el document *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0* [3], en el qual es destaca la importància dels sistemes encastrats i s'assigna al programari un paper omnipresent en tots els passos requerits en el desenvolupament de productes, la seva fabricació i el seu manteniment.

L'anomenada *quarta revolució industrial* (*Industry 4.0*) descrita en aquest document d'Acatech es fonamenta en dos pilars: la Internet de les coses i els sistemes ciberfísics. L'informe anual de Siemens de 2013 situa aquesta revolució en «el temps del demà», però alguns investigadors [4, 5] adverteixen de la necessitat de construir un cos de coneixement formal, consistent i complet per a aquests pilars. «Demà» [4] pot ser el mateix 2017.

Els sistemes encastrats han estat identificats com a crucials, ja que han estat considerats com a KETS (*key enabling technologies*) pels experts de la Unió Europea [6] per al període 2014-2020, i han estat enquadrats en el programa estratègic ECSEL, que és l'hereu dels programes precedents ARTEMIS i ENIAC, de sistemes encastrats i nanotecnologia, respectivament.

Des del punt de vista normatiu, el discurs de la IoT s'ha incorporat al discurs dels comitès d'estàndards, que representen dos corrents en l'àmbit de l'automatització industrial. D'una banda, hi ha el comitè AENOR/CTN 116 (Sistemes Industrials Automatitzats, corresponent a l'ISO/TC

184, «Sistemes d'automatització i integració») i, de l'altra, l'AENOR/CTN 203 (Equipament Elèctric i Sistemes Automàtics per a la Indústria, que correspon a la IEC/TC 65, «Mesura i control en processos industrials»). En l'última dècada, la interacció de tots dos amb l'AENOR/CTN 71 (Tecnologia de la Informació, corresponent a l'ISO/IEC JTC 1, «Tecnologia de la informació») s'ha incrementat de manera contínua a causa del fenomen identificat per Rockwell Automation denominat *convergence* [7], que consisteix en l'aproximació tant tècnica com cultural entre els mons de la informàtica de planta i de la informàtica de gestió, és a dir, entre els mons de la fabricació i de les TIC, i que afecta no només aspectes tecnològics com protocols de comunicació, sinó també la problemàtica derivada d'equips mixtos amb professionals que provenen de comunitats amb mentalitats diferents. Els sistemes encastrats són el bloc constructiu que està propiciant aquestes convergències inevitables.

Ja actualment vivim l'eclosió de la Internet de les coses també a la indústria. La connectivitat de tot amb tot obliga els estàndards a ser realment compatibles, la qual cosa força els actors a la interoperabilitat i, per tant, a l'estandardització dels components, i això té com a conseqüència una baixada important dels preus. En un context de societat del coneixement, Internet i el moviment Open (provinent del programari Open Source), la tercera onada del DIY (la primera va ser la física, a principi del segle xx; la segona va ser la ciber, als anys vuitanta, i la tercera és la ciberfísica), anomenada *moviment maker*, comença a ser vista per alguns analistes [2] com els primers passos cap a una nova forma de fer negocis i de fer indústria.

A les interfícies HMI (persona-màquina) s'han afegit les interfícies M2M (màquina-màquina), l'adquisició de dades intel·ligents i les xarxes basades en més o menys mesura en les capes de comunicacions sobre Ethernet/IP (ProfiNet, Modbus TCP, xarxes Ethernet industrials propietàries), ja siguin amb cable o sense fil. També en aquesta evolució l'arquitectura d'ordinadors basada en PC industrials ha pres protagonisme als autòmats en les tasques més complexes i polivalents en incorporar funcions de procés determinista, en temps real i de seguretat industrial. Els PLC (controladors lògics programables) s'han fet més polivalents quant a comunicacions i àmbits d'aplicació, integrant en l'equip propi la interfície (HMI) i aplicacions de gestió de la producció, de control per lots, d'eficiència energètica i d'anàlisi de paràmetres de procés.

De manera paral·lela, els sistemes encastrats aplicats a l'automatització industrial progressen des d'una volguda especialització funcional i integració física fins a la incorporació d'arquitectures més obertes i funcions més generalistes basades en els processadors d'alta densitat d'integració i multinucli, molt usats en el món dels telèfons mòbils. Els dispositius multiprocessador que combinen dos o més nuclis en un únic processador esdevenen la nova plataforma estàndard per als fabricants de sistemes encastrats industrials. Amb aquest potencial, els usuaris de sistemes encastrats disposen d'un sistema complet en un

mateix xip que combina prestacions, capacitats de maquinari i programari en unes mides adequades i amb un consum reduït d'energia.

El sistema en un xip o SoC, del terme anglès *system on a chip*, descriu la tendència cada vegada més freqüent d'usar tecnologies de fabricació que integren tots els mòduls components, o una gran part d'aquests, d'un ordinador o qualsevol altre sistema informàtic o electrònic en un únic circuit integrat o xip. Els proveïdors de sistemes d'automatització que fonamenten la seva arquitectura de sistemes en una certa homogeneïtat de tipus de processadors disposen en la nova generació de SoC d'un nou ventall de possibilitats per a combinar tipus heterogenis de processadors. Disposen de microcontroladors, de processadors per a aplicacions específiques com ara el control discret, el procés continu, el control de moviment, les interfícies de comunicacions o d'usuari. Disposen també de diferents sistemes operatius en temps real, deterministes o no, ja siguin sistemes oberts o propietaris. El domini d'aquesta diversitat tecnològica és un nou repte que les empreses estan afrontant per poder extreure'n tot el potencial.

Pel que fa a les comunicacions, els sistemes industrials de control distribuït amb múltiples dispositius discrets actualment es gestionen amb interfícies estàndard sobre ports en sèrie, busos de camp i/o Ethernet, amb protocols com ara el clàssic OPC (*OLE for process control*) per a accés a dades, alarmes i esdeveniments en temps real o dades històriques. La consolidació de dispositius en un únic SoC requereix estratègies de comunicació addicionals basades en una comunicació entre processos IPC (*inter-process communication*) robusta i segura. El més recent protocol de comunicacions OPC - Unified Architecture (OPC-UA) (vegeu <https://opcfoundation.org>), que aporta una més gran fiabilitat a les comunicacions industrials M2M, disposa ja de versions de mercat, on la comunicació per OPC-UA es pot implantar en sistemes encastats i microcontroladors.

D'altra banda, els desenvolupadors de productes industrials necessiten una manera d'optimitzar el rendiment general i caracteritzar l'arquitectura del sistema adequadament abans de la seva implantació en aplicacions crítiques. Qüestions com: quines prestacions es requereixen dels SE?, quines funcions han de ser configurables?, com se supervisarà el maquinari?, com s'engegarà i s'apagarà el sistema?, amb quins nivells de seguretat i encriptació de dades cal realitzar les comunicacions?, com se simularà i provarà el sistema?, entre altres, són clau abans de realitzar el disseny del sistema. Cal dissenyar els sistemes encastats de manera que s'aprofiti al màxim la partició del sistema en múltiples nuclis i la seguretat intrínseca del maquinari, mitjançant la implantació d'arquitectures avançades de seguretat i el compliment de la norma ISA/IEC-62443 (anteriorment, ISA-99), estàndard de seguretat cibernètica de la indústria. Per a assolir aquests reptes, la tecnologia *system on a chip* suposa un desafiament tècnic, i per això necessita enginyers i professionals capacitats, experts en disseny de maquinari, en desenvolupament de programari, en verificació i depuració de sistemes complexos.

Una de les aplicacions que despunten dels sistemes encastats en la indústria en general es basa en el desenvolupament i l'aplicació de microsensors industrials autònoms, sense fil i de baix consum, que faciliten dades per al manteniment predictiu dels equips als quals materialment s'adhereixen per a registrar contínuament una diversitat de senyals i d'esdeveniments: polsos, corrents, vibracions, pressions, temperatures, sorolls, velocitats, colors, consums, fuites, deformacions, etc. Una altra punta de llança en les indústries de procés (alimentari, químic i biotecnològic) són els sensors analítics de procés que, integrats en el mateix reactor, permeten registrar i analitzar les dades dels paràmetres crítics (temperatura, humitat, pressió, composició química, pH, etc.) en temps real i mantenir automàticament el procés sota control.

A tall de conclusió, els nous sistemes encastats facilitaran als fabricants de maquinària i als integradors de sistemes que els incorporin en els seus productes i solucions una clau diferencial per al seu futur, ja que podran afegir noves funcionalitats, integrar el manteniment, possibilitar l'assistència remota, allargar el cicle de vida dels productes, adaptar el factor de forma del producte i reduir-ne el consum energètic. El valor més important per als usuaris finals a la indústria i els seus proveïdors d'automatització i de la IoT industrial serà que els seus sistemes encastats puguin ser útils, eficients, fiables i segurs durant els quinze o vint anys d'operació previstós per a la maquinària a la qual donen servei, funcionant les vint-i-quatre hores del dia i els set dies de la setmana en els entorns de producció i de logística més exigents.

4. La tecnologia actual i els reptes del futur

Podríem dir que avui dia trobem els SE en la majoria d'aparells electrònics. Llavors, quin és el pas següent? Si analitzem l'evolució en prestacions dels microcontroladors integrats, ens podem fer una idea de com pot ser el futur. En l'inici de la dècada dels setanta, els primers microcontroladors podien calcular aproximadament cent mil operacions per segon. Amb els avenços en les tecnologies d'integració, a principi del segle XXI ja s'assolien xifres pròximes al miler de milions d'operacions per segon. En trenta anys la seva potència de càlcul s'ha multiplicat per deu mil. Quant a la capacitat de memòria, aquesta s'ha vist ampliada en un factor similar al de la velocitat de processament. L'augment de l'escala d'integració ha permès incloure dins del xip prou memòria, una interfície de comunicació o diverses (CAN, Bluetooth, Ethernet) i dispositius auxiliars (temporitzadors, acceleròmetres, GPS, etc.). Quant a les mides, s'ha passat dels 5 cm de llarg per 2 cm d'ample, als anys setanta, als poc més de 2 x 2 mm el 2010. En els últims anys les capacitats d'integració han seguit la seva evolució i han arribat a fites d'integració que fa pocs anys eren impensables (figura 2).

Hitachi va presentar al principi del 2006 un xip d'identificació per radiofreqüència (RFID) de 0,15 x 0,15 mm.

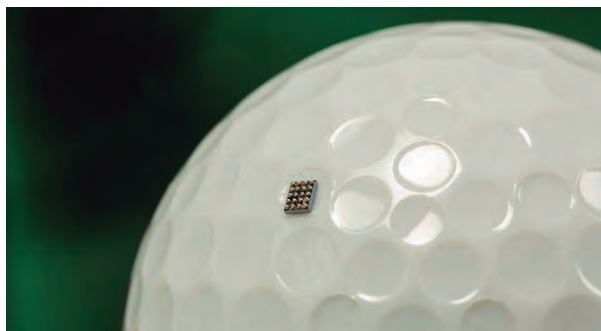


FIGURA 2. El microcontrolador KLO3 és actualment un dels dispositius ARM (Advanced RISC Machines) més petits del món, amb només $1,6 \times 2$ mm.
FONT: Freescale.

Aquest xip és fabricat amb un encapsulatge proveït d'un elèctrode de doble superfície, i per tant, malgrat la seva mida, encara és possible connectar-lo amb antenes i fonts d'energia externes al xip.

Una altra revolució han estat els substrats flexibles dels xips (figura 3). L'electrònica impresa sobre plàstic permet desenvolupar xips i circuits impresos adaptables a gairebé qualsevol superfície.

Uns investigadors del Swiss Federal Institute of Technology han desenvolupat un xip [8] flexible i transparent sobre un polímer anomenat Parylene, d'una micra de gruix. Actualment ja s'estan desenvolupant xips flexibles en diferents substrats i s'han aconseguit prestacions semblants a les dels xips convencionals de silici.

L'evolució del consum d'energia dels xips és un tema molt extens i depèn del tipus d'aplicació per a la qual van destinats, però en termes generals la reducció de la ràtio de consum per unitat de superfície ha estat més modesta. De manera molt aproximada, en doblar la densitat de transistors per unitat d'àrea s'ha incrementat la velocitat d'operació en un 40 %, mentre que el consum per unitat de superfície s'ha mantingut en valors similars [9]. Avui dia, existeixen xips comercials amb ràtios de 100 μA per MHz, i tan sols baixen a 1 μA en mode d'hibernació. En certa manera, la relació d'amperes per MHz ens indica que, per a reduir el consum, cal reduir la freqüència d'operació, la qual cosa implica obtenir menys prestacions quant a la velocitat de càlcul del sistema.

L'evolució tecnològica ha estat molt més lenta quant a mètodes d'obtenció d'energia innovadors. Normalment els sistemes de baix consum prenen l'energia de petites

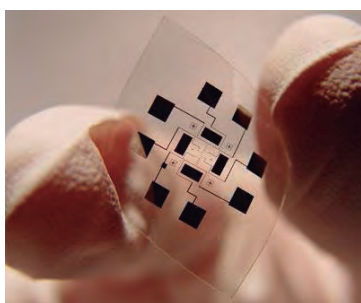


FIGURA 3. Fotografia d'un xip flexible.
FONT: Heath Group, Caltech.

piles botó, que amb més o menys freqüència s'esgoten i cal canviar periòdicament. La recerca en tecnologies d'extracció d'energia de l'entorn (*energy harvesting*) ofereix solucions molt prometedores, però encara dotades de prestacions energètiques molt parcials. Les principals fonts d'energia d'aquest tipus de sistemes són: mecànica, lumínica, electromagnètica, tèrmica i bioquímica. Les energies produïdes a partir d'aquestes tècniques d'extracció són molt diverses i fortament dependents de l'entorn on està immers el dispositiu però, per a tenir uns ordres de magnitud, es podria dir el següent: de l'energia mecànica del so ambient es pot extreure aproximadament uns 10 mW/cm^2 mitjançant transductors piezoelèctrics; dels moviments cinemàtics del cos, uns $40 \mu\text{W/cm}^3$; de la llum ambiental, 50 mW/cm^2 ; dels senyals de radiofreqüència (RF), al voltant de $50 \mu\text{W/cm}^2$; $50 \mu\text{W/cm}^2$ de les variacions termodinàmiques, i $100 \mu\text{W/cm}^2$ de les reaccions bioquímiques (sucre en sang). Aquestes tècniques d'extracció d'energia es poden combinar i emmagatzemar en bateries ultrafines realitzades amb elements de molt baix cost, com els ions de sodi [10], o en finíssims condensadors [11]. Cal incloure aquí els avenços derivats del descobriment del grafè: supercondensadors, conductors elàstics, transistors capaços de commutar en el rang del THz i un llarg etcètera. Amb el grafè els dispositius electrònics estan fent un pas de gegant.

La revolució dels xips amb elements microelectromecànics integrats (MEMS) ha representat un nou paradigma en el disseny de sistemes encastats. Amb aquestes tecnologies, alguns dels elements mecànics o electromecànics es poden integrar a escala micromètrica dins dels xips. Gràcies a aquestes tecnologies hi ha disponibles en el mercat dispositius anomenats *smart sensors* (senyors intel·ligents). Aquests xips *smart sensors* estan dotats de capacitats sensorials per a adquirir dades de l'ambient i transmetre-les per ràdio o, fins i tot, amb capacitat per a actuar (nanorobòtica). En la figura 4 es mostra una versió dels xips *smart sensors* incorporats en píndoles que permetran a les farmacèutiques comprendre millor el procés d'absorció dels medicaments gràcies a un volum massiu de dades provinents de milers d'usuaris.



FIGURA 4. Els xips submil·limètrics ingeribles incorporats a les pastilles podrien proporcionar dades de camp molt valuoses a les indústries farmacèutiques.
FONT: Proteus Biomedical.

Els futurs escenaris que poden sorgir amb aquestes noves tecnologies plantegen nous reptes en el disseny de maquinari i programari. Un dels reptes que cal abordar és la manera de crear xarxes de dispositius dinàmiques, xarxes on els dispositius col·laboren en la comunicació redirigint els missatges dels dispositius que no tenen prou cobertura. La principal dificultat sorgeix quan els nodes que configuren aquesta xarxa han de redirigir els missatges de dispositius veïns, fins i tot quan aquests nodes estiguin en mode d'hibernació. Tot i que el processador del dispositiu estigui en pausa, es fa necessari dissenyar una interfície de comunicacions sense fils de tal manera que estigui activa en tot moment, però utilitzant uns consums d'energia extremament baixos.

Els avenços tecnològics permeten ser optimistes i en les properes dècades totes aquestes tecnologies podran ser una realitat comercial. Si condensem tots els avenços descrits en un únic component electrònic, cal esperar que el resultat sigui un dispositiu d'unes mides similars a una petita etiqueta adhesiva, amb un alt potencial de còmput, una intercomunicació molt versàtil i una durabilitat energètica de diverses dècades, que adquirirà i processarà diverses dades de l'entorn i que enviarà la informació rellevant al núvol d'Internet. Bàsicament, la revolució estarà en el seu cost ultrabaix, mides molt reduïdes i autosuficiència energètica. Si aquest escenari esdevé realitat, la indústria podrà incorporar aquest tipus de tecnologia sense pràcticament cap cost addicional en tota la seva gamma de productes. Per exemple, en el sector de l'alimentació, es podran incorporar als envasos dels productes sensors intel·ligents que enregistraran tots els esdeveniments de la cadena de fred durant el transport i l'emmagatzemament. Aquests sensors avisaran en cas que s'alteri la qualitat del producte a causa d'un trencament de la cadena de fred i, fins i tot, podran avisar d'una alteració del producte malintencionada o un robatori. Un altre exemple del que l'escala i el cost tan reduïts dels xips permetrien fer seria incorporar aquests dispositius en les monedes i els bitllets per poder-ne fer un seguiment. Els objectes dotats de sensors intel·ligents es podran fer un autodiagnòstic i enviar un avís en cas d'anomalies o defectes detectats causats per l'envelliment o pel mal ús. Es podran implantar en les persones sensors biomètrics per monitorar el seu estat de salut. Els cotxes es comunicaran els uns amb els altres per avisar-se si hi ha algun accident o una retenció inesperada. Apareixeran centenars de noves aplicacions i les ja existents es portaran a nivells mai imaginats. Les increïbles prestacions dels nous xips faran possible implantar aquest tipus de dispositius en tot tipus d'objectes, vegetals, animals i persones.

5. Conclusions

Durant els primers setanta anys del segle xx es va desenvolupar l'enginyeria de la part física dels sistemes electromecànics, i des dels anys setanta fins ara s'ha desenvolupat

l'enginyeria del control digital d'aquests sistemes, és a dir, el que en podríem anomenar el component *cíber*. La confluència d'ambdós mons de manera integrada en una nova generació d'objectes és la base d'una nova era fonamentada en els anomenats *sistemes cíberfísics*, un dels pilars de la quarta revolució industrial, juntament amb la Internet de les coses, que planteja la qüestió de la comunicació global d'aquests dispositius.

Cal prendre mesures en un ampli ventall d'àmbits. Al final del segle xx, Catalunya va perdre la carrera dels xips integrats a molt gran escala (VLSI) basats en el silici, i si no fem un esforç, perdrem la carrera dels sistemes encastats moderns, principalment en aquells que estan basats en els nous materials com el grafè o els substrats flexibles. Cal motivar les empreses a prendre accions en aquest àmbit; altrament, la distància existent entre la tecnologia i la capacitat real de la indústria catalana es farà més i més gran. Paral·lelament, aquells que han de fer realitat la IoT són la generació dels joves estudiants d'avui. En conseqüència, l'actual generació de futurs enginyers s'ha de formar en molts aspectes de la tecnologia, però cal també incentivar-los i motivar-los adequadament per a poder tenir prou massa crítica d'enginyers per afrontar el repte. Es fa necessari incloure els continguts essencials de programari i maquinari en els currículums educatius. Si no s'hi posa remei, aviat Catalunya serà un país amb una dependència exterior excessiva en aquesta tecnologia.

És difícil predir el futur i fins a quin punt la tecnologia incidirà en el model productiu, però en el que sí que coincideixen la majoria d'analistes és que les habilitats digitals seran un factor clau de la competitivitat de les empreses en el futur, i benvingudes siguin les iniciatives que ajudin a l'augment de les vocacions tecnològiques perquè les generacions que s'estan formant siguin capaces de gestionar aquestes empreses i el món que vindrà. ■

6. Bibliografia

- [1] Pi, Xavier (2011). «Sistemas *embedded*». *Automática e Instrumentación*, núm. 429, p. 76-89. ISSN 0213-3113.
- [2] ANDERSON, Chris (2012). *Makers: The new industrial revolution*. Nova York: Crown Publishing Group. ISBN 0771007604.
- [3] KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. (ed.) (2013). *Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Berlín: Forschungsunion im Stifterverband für die Deutsche Wirtschaft.
- [4] SIFAKIS, Joseph (2009). «The embedded systems design - scientific challenges and work directions». ArtistDesign NoE - Embedded Systems Seminar. Brussel·les, 18 de juny de 2009.
- [5] JESCHKE, Sabine (2013). *Cyber-physical systems: History, presence and future*. Aquisgrà: Industrial Advisory Board: RWTH Aachen University. Faculty of Mechanical Engineering.

- [6] EUROPEAN COMMISSION (2013). *Cyber-physical systems: Uplifting Europe's innovation capacity*. Report del Workshop on Cyber-Physical Systems: Uplifting Europe's Innovation Capacity. Brussel·les, 29 i 30 d'octubre de 2013.
- [7] ROCKWELL AUTOMATION (2011). *Manufacturing convergence practices and trends: Perspectives from providers and customers*.
- [8] SALVATORE, Giovanni A.; MÜNZENRIEDER, Niko; KINKELDEI, Thomas; PETTI, Luisa; ZYSSET, Christoph; STREBEL, Ivo; BÜTHE, Lars; TRÖSTE, Gerhard (2014). «Wafer-scale design of lightweight and transparent electronics that wraps around hairs». *Nature Communications*, núm. 5.
- [9] BORKAR, Shekhar; CHIEN, Andrew A. (2011). «The future of microprocessors». *Communications of ACM* [en línia], vol. 54, núm. 5. [Consulta: 27 de novembre 2011].
- [10] SU, Dawei; DOU, Shixue; WANG, Guoxiu (2015). «Ultrathin MoS₂ nanosheets as anode materials for sodium-ion batteries with superior performance». *Advanced Energy Materials*, vol. 5, núm. 6.
- [11] ZHU, Youqi; CAO, Chuanbao; TAO, Shi; CHU, Wangsheng; WU, Ziyu; LI, Yadong (2014). «Ultrathin nickel hydroxide and oxide nanosheets: Synthesis, characterizations and excellent supercapacitor performances». *Scientific Reports*, núm. 4.
- [12] MARINA, José Antonio; GARICANO, Luis; MOLINAS, César (2014). «Hay que cambiar el sistema educativo por otro más creativo». *El País* (29 setembre), p. 11.
- [13] <<http://www.livscience.com/43296-what-is-stem-education.html>>.
- [14] <<http://www.theguardian.com/technology/2001/mar/08/onlinesupplement5>>.
- [15] <<http://www.theguardian.com/tv-and-radio/2009/oct/09/micro-men-sinclair-curry>>.
- [16] <<http://www.theguardian.com/technology/2012/mar/25/bbc-micro-30-years-acorn-sinclair>>.
- [17] <<http://en.wikipedia.org/wiki/Arduino>>.
- [18] <<http://en.wikipedia.org/wiki/Arduino>>.
- [19] <http://www.eetimes.com/author.asp?section_id=36&doc_id=1323907>.
- [20] <<http://s4a.cat/>>.
- [21] <<http://mobileworldcapital.com/ca/programes/mschools/>>.