

SISTEMI EMBEDDED

CARATTERISTICHE, TECNOLOGIE E MERCATO

Alzarsi la mattina, fare colazione e recarsi con calma in libreria per acquistare un libro. È sabato o domenica, finalmente un giorno in cui non si interagisce con la tecnologia, in cui non si accende il computer. Un tale scenario è ben lontano dalla realtà. Da qualche ora si è probabilmente già entrati in contatto con un centinaio di sistemi basati su microprocessore: decine sull'automobile, due o tre in ogni elettrodomestico o telefono cellulare, almeno uno in ogni apparato alimentato dalla rete elettrica o a pile: condizionatore, apricancello, pace-maker, calzature ginniche evolute, semafori per l'attraversamento pedonale, carte di credito per il pagamento elettronico e così via.

1. INTRODUZIONE

La maggior parte dei sistemi di elaborazione non è costituita da personal computer, bensì da dispositivi in stretta relazione con l'ambiente in cui operano, che in genere hanno una funzione prefissata e per questo motivo non richiedono di caricare programmi né, in molti casi, di avere interfacce tradizionali con tastiera e monitor.

Si parla di sistemi invisibili, ubiqui e pervasivi, per rappresentare la loro trasparente invasività nella vita quotidiana. Questi sistemi, detti dedicati o *embedded*, dominano numericamente il mercato, anche se in modo non clamoroso, rispetto ai più noti e visibili sistemi *general purpose* come i personal computer. Si ritiene infatti che attualmente un cittadino del mondo occidentale entri in contatto giornalmente con circa 100 sistemi dedicati. Per convincersi di ciò basti pensare che ciascuno dei seguenti apparati contiene normalmente sistemi elettronici dotati di almeno un microprocessore: telefono cellulare, apricancello,

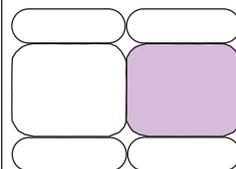
bancomat, testina di una stampante a getto d'inchiostro, lavatrice, lavapiatti, serratura elettronica, navigatore, carta di credito e così via, fino all'automobile ove si contano addirittura decine di microprocessori.

La presenza di tali sistemi in una varietà di prodotti non ha solamente lo scopo di realizzare le funzionalità desiderate ma sempre più spesso diviene il veicolo per introdurre innovazione. La rilevanza dei sistemi *embedded* in alcuni importanti settori applicativi è mostrata nella figura 1 che evidenzia come all'incirca la metà del costo finale di un prodotto è rappresentato dall'elettronica.

L'architettura di un sistema dedicato ricorda quella di un generico sistema di calcolo, con sezioni di elaborazione, comunicazione e memorizzazione. I requisiti operativi di tali sistemi tuttavia li rendono talmente peculiari da richiedere metodologie di progetto, e un approccio alla ricerca di soluzioni tecnologiche, tali da giustificare la nascita di una vera e propria nuova disciplina dell'ingegneria.



Carlo Brandolese
William Fornaciari



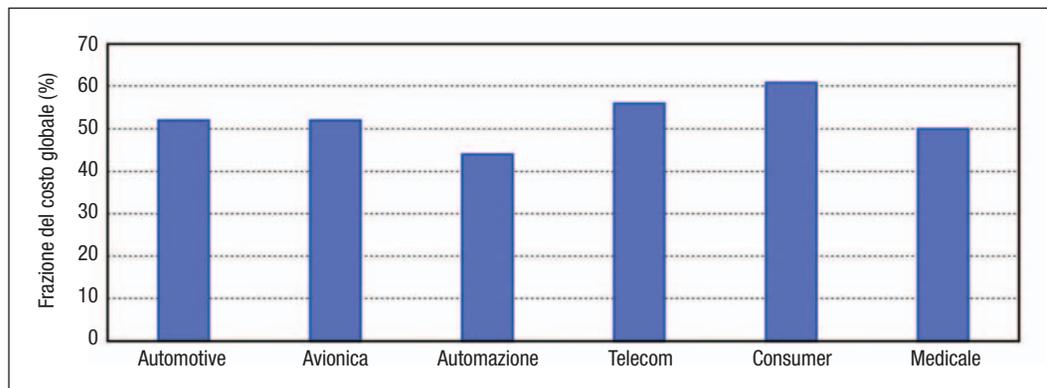


FIGURA 1
Incidenza
percentuale dei
sistemi embedded
nel costo finale
dei prodotti

Componente	2004	2009	AAGR ¹
Software	1.6	3.4	16.0%
Circuiti Integrati	40.5	78.7	14.2%
Board	3.7	6.0	10.0%

¹ Average Annual Growth Rate, Tasso medio annuo di crescita.

TABELLA 1
Mercato mondiale
dei sistemi
embedded per
componente
(miliardi di dollari)

Settore	2004	2009	AAGR
Computer	18.1	30.5	14.1%
Telecom	11.2	18.0	12.6%
Consumer	12.0	22.5	17.0%
Automotive	3.8	7.8	19.7%
Medicafe	3.0	3.7	5.4%
Industriale	3.4	4.5	7.3%

TABELLA 2
Mercato mondiale
dei sistemi
embedded per
macro-settore
(miliardi di dollari)

Tra i vincoli di natura non direttamente tecnologica cui sono soggetti i sistemi *embedded* si hanno il *costo* del prodotto (costo unitario e costo non ricorrente) ed il tempo di realizzazione (*time-to-prototype*, *time-to-market* e *time-to-volume*). Tali sistemi, inoltre, sono fortemente specializzati e ottimizzati per svolgere un ristretto numero di compiti, e sono soggetti a vincoli molto stringenti di consumo di potenza, prestazioni, dimensioni, affidabilità, tempo reale e così via.

Le principali conseguenze di un così elevato numero di requisiti e vincoli sono, da un lato, la scelta di architetture miste hardware/software per trovare il migliore equilibrio tra costo, prestazioni e tempo di sviluppo e, dall'altro, il ricorso a metodologie di progetto ben strutturate

te e ad una moltitudine di strumenti di *Electronic Design Automation* (EDA).

2. MERCATO

A partire dagli anni '60 abbiamo assistito ad una sorta di seconda "rivoluzione industriale", quella associata allo sviluppo e alla diffusione delle tecnologie digitali. Negli ultimi quarant'anni, infatti, si è passati dai *mainframe* ai *personal computer*, per arrivare oggi ad una larga diffusione di *laptop*, *PDA* e *smart phone* con un utilizzo prevalentemente legato ad applicazioni di *office automation* e di accesso ad internet.

Nonostante tale sviluppo sia molto evidente, attualmente le statistiche mostrano che il mercato e le applicazioni dominanti – per un fattore pari a circa 100 – sono quelle dei sistemi *embedded*. In un ambiente domestico, per esempio, vi sono al massimo due o tre computer, ma non meno di 40 sistemi *embedded*. Tale diffusione si traduce in una percentuale di mercato dei sistemi *embedded* rispetto all'intero settore elettronico superiore al 90%. Secondo i dati del *World Trade Statistics*, attualmente il 98% dei dispositivi programmabili sono *embedded* e altre previsioni di crescita stimano che nel 2010 vi saranno circa 16 miliardi di sistemi *embedded*, circa 3 per ogni abitante della terra, mentre nel 2020 si dovrebbe raggiungere un valore pari a 40 miliardi di unità.

Tali proiezioni, per quanto già estremamente significative, possono essere analizzate con maggiore dettaglio considerando orizzontalmente il mercato globale dell'hardware e del software per applicazioni *embedded* (Tabella 1) e quello più verticale dei vari macro-settori applicativi quali telecomunicazioni, elettronica di consumo, *automotive* e così via (Tabella 2).

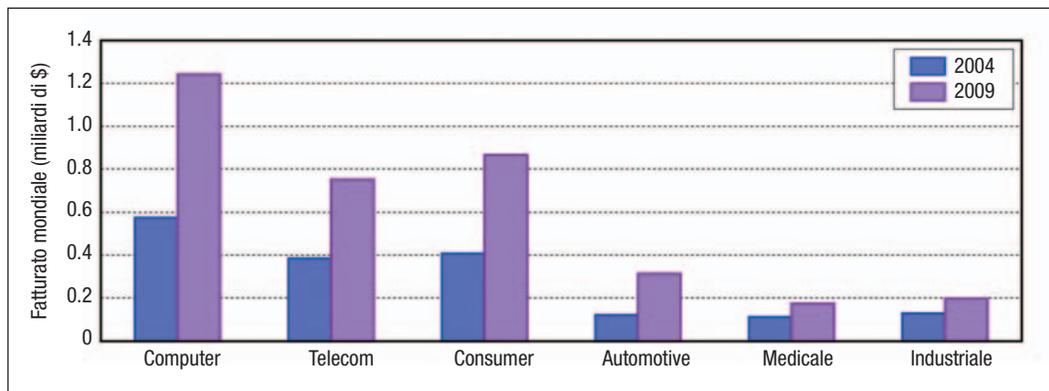


FIGURA 2
Suddivisione per applicazione del fatturato del software embedded

2.1. Software

Analizzare in modo compiuto il mercato del *software embedded* e la sua evoluzione richiede alcune precisazioni. Benché il mercato degli strumenti per il *testing* e quello dei sistemi operativi mostri una notevole crescita (circa il 20% all'anno) il reale impatto del software è ancora superiore poiché la maggior parte delle stime non tiene conto del codice dell'applicazione e dell'eventuale *middleware* realizzato *ad-hoc* dal produttore finale del sistema embedded. Tale frazione non è pertanto compresa nei dati della tabella 1.

Complessivamente il software rappresenta spesso una notevole frazione dell'attività di sviluppo. Circa il 48% del fatturato relativo al software è assorbito dagli USA, mentre il resto del mercato è diviso in parti più o meno uguali fra Asia, Giappone ed Europa. Osservando la suddivisione per tipologia di software (Figura 2), si nota che quello delle telecomunicazioni, dei computer e dell'elettronica di consumo sono i mercati trainanti, grazie anche alla convergenza dei dispositivi palmari (PDA, telefoni cellulari, organizer elettronici, e così via). Si conferma l'effervescenza del settore *automotive*, i cui tassi di crescita battono abbondantemente quelli degli altri settori applicativi, superando il 21%, grazie anche all'aggiunta al semplice controllo del veicolo, di molte applicazioni un tempo peculiari di altri settori come per esempio telefono, la connettività internet e vari sistemi d'intrattenimento.

Si osserva inoltre una crescente presenza dei sistemi operativi in molte applicazioni embedded che testimonia l'interesse dei produttori, oltre che verso i tradizionali microcontrollori, anche nella direzione dei procesori di classe superiore (i più diffusi sono

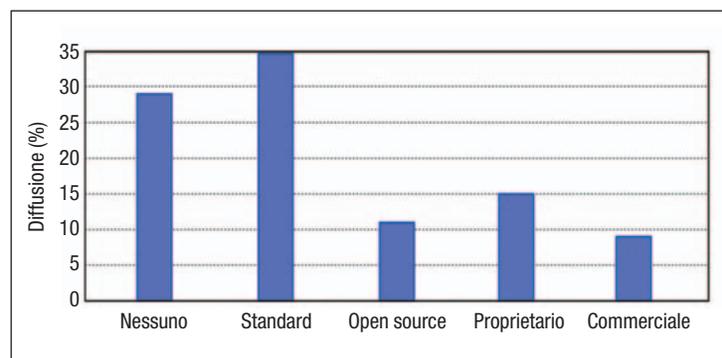


FIGURA 3
Utilizzo recente dei sistemi operativi per sistemi embedded

Freemove, PowerPC e ARM), in grado di ospitare appunto un sistema operativo utile allo sviluppo di applicazioni complesse con interfacce utente evolute. È tuttavia interessante notare che, come emerge dai dati della figura 3, oltre un quarto dei dispositivi embedded non utilizza alcun sistema operativo. Tale fenomeno non è da stupire: in moltissimi apparati, infatti, si utilizzano architetture con memoria integrata sullo stesso chip del processore, di dimensione non sufficiente a ospitare sia un sistema operativo sia l'applicazione. Inoltre, molti sistemi operativi per applicazioni embedded di natura commerciale richiedono licenze d'uso con costi non inferiori a qualche euro (per sistema venduto), valore molte volte superiore al costo dell'intero hardware e, di conseguenza, difficile da proporre a un mercato in cui in molti casi il prezzo è il fattore determinante. La tipologia di sistema operativo è decisamente varia, si spazia dall'*open source* di Linux e le sue varianti, sino ai prodotti commerciali come Windows CE. I dati più dettagliati della figura 4 quantificano la frammentazione del mercato,

sebbene i principali fornitori per i nuovi progetti in ambito real-time siano stati ultimamente Windriver (con il sistema VxWorks) e Linux, mentre Microsoft (Windows CE e Windows XP Embedded) si è rivolta soprattutto al mercato PDA e telefonia.

2.2 Hardware

L'industria dell'hardware per sistemi embedded è sicuramente considerata una delle più promettenti sia come volume, sia per l'elevato tasso di crescita (Tabella 1). Com'è ovvio attendersi, a livello geografico gli USA sono i leader, con un fatturato all'incirca equivalente al resto del mondo. Mentre in Europa le maggiori spinte provengono e proverranno dal mercato telefonico (grazie alla presenza di Nokia, Philips, Siemens ed STM), il Giappone sarà sostenuto principalmente da applicazioni consumer e satellitari (Samsung, LG, Sony e Toshiba) e gli USA sembra si stiano focalizzeranno su internet e dispositivi di comunicazione.

Sotto il profilo applicativo, la distribuzione è quella mostrata nella figura 5, con volumi che si consolidano per computer, telecomunicazioni ed elettronica di consumo e ingenti

tassi di crescita per il settore automotive. Come già ricordato per il software, i nuovi veicoli continueranno a incorporare funzioni tradizionali gestite elettronicamente (controllo trazione e motore, freni, sospensioni, sensoristica, e così via), assieme ai nuovi servizi come router GPS, DVD player, dispositivi per accesso a internet o per reti wireless, fino a utilizzare più di un centinaio di processori su una sola auto. La convergenza delle applicazioni verso gli stessi dispositivi (per esempio, macchina fotografica, telefono, comunicazione e media player) costituisce e continuerà a costituire un'importante tendenza a sostegno del mercato consumer.

I componenti più utilizzati nel mercato dell'hardware sono i microprocessori *general purpose* e i microcontrollori, seguiti dai circuiti integrati per applicazioni dedicate (ASIC, PLD ed FPGA), dai DSP (*Digital Signal Processor*), e dalle memorie, il cui mercato si attende abbia i tassi di crescita più elevati (Figura 6).

Il componente più importante per il mercato dei sistemi embedded rimane il microprocessore: le architetture CISC (*Complex Instruction Set Computer*) sono principalmente legate al

FIGURA 4
Andamento dell'uso
dei principali
sistemi operativi in
ambito embedded

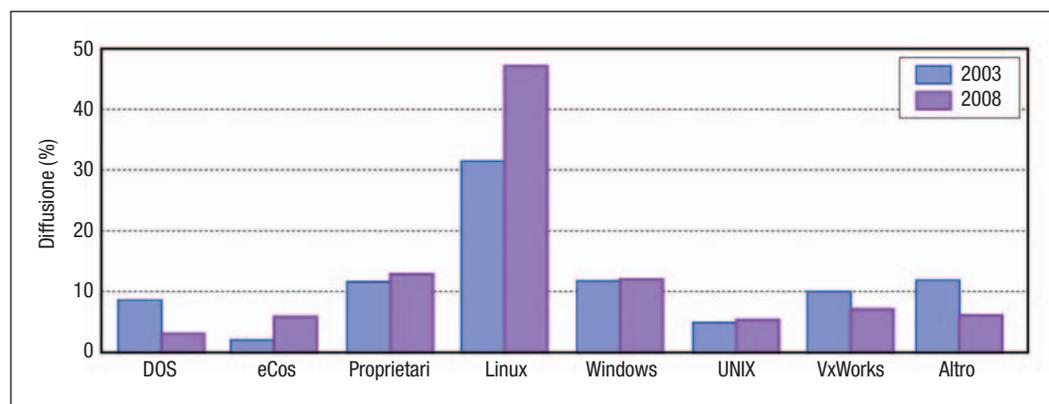
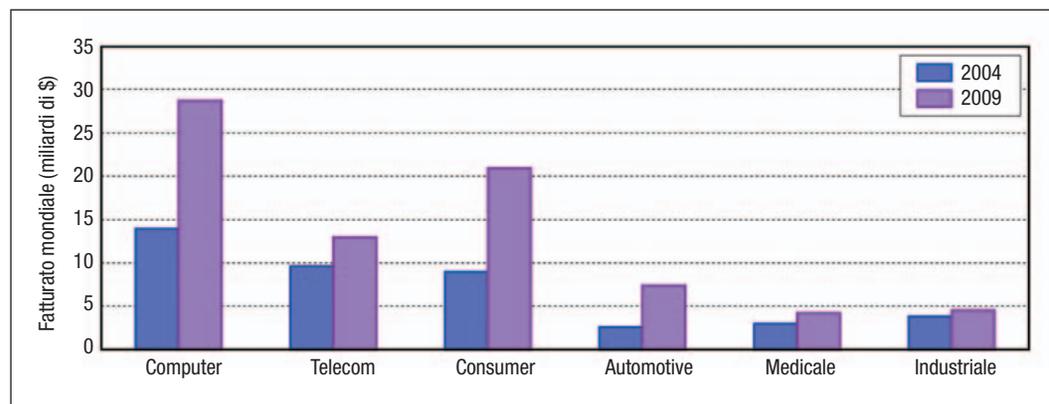


FIGURA 5
Mercato
dell'hardware
embedded per
settore applicativo



settore dei calcolatori, mentre soluzioni di tipo RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) sono le preferite per applicazioni *embedded*, in virtù della buona relazione che lega costo, consumo energetico e prestazioni. Benché il fatturato dei microprocessori nel settore dei computer sia ancora rilevante (circa il 20%), non lo si deve confondere i volumi in termini di numero di pezzi. I processori per applicazioni *embedded* hanno infatti costi industriali che vanno da meno di un dollaro a pochi dollari mentre i processori per calcolatori hanno prezzi fino a due ordini di grandezza superiori. Un'analisi della tipologia dei processori mostra che oltre il 60% di questi sono a 4, 8 o 16 bit e solo il 30% è basato su architetture x86. In maniera facilmente avvertibile anche dall'acquirente finale, si assiste a una parziale rivoluzione del mercato delle memorie (Figura 7), trainato soprattutto dal tasso di crescita delle tecnologie Flash, utilizzate nei lettori mp3, nelle macchine fotografiche digitali, nei telefoni cellulari, nelle chiavette USB e in molti altri prodotti. In generale la dimensione e il tipo di memoria influenzano le prestazioni e il costo di un sistema *embedded*. Al giorno d'og-

gi, a una crescita di un fattore dieci della banda di comunicazione di una memoria corrisponde solo un aumento di un fattore cinque della densità. Per questa ed altre ragioni, nonostante le memorie statiche (SRAM) siano più veloci, spesso si ricorre alle memorie dinamiche (DRAM) per via del minore costo e in virtù della loro maggiore densità e capacità. Benché siano in sviluppo nuove tecnologie di memoria (magnetoresistive, ferroelettriche, zero-capacitor) che potrebbero in futuro competere con quelle attuali, il loro impatto in termini di volumi di mercato è ancora poco influente.

3. CARATTERISTICHE DEI SISTEMI EMBEDDED

Gli obiettivi e le conseguenti architetture realizzative di un sistema *embedded* sono duali rispetto a quelli di un normale elaboratore. Un personal computer viene realizzato in modo da essere principalmente versatile, in grado cioè di adattarsi a molteplici applicazioni semplicemente caricando programmi differenti. Come conseguenza l'architettura hardware di supporto contiene in genere risorse sovrab-

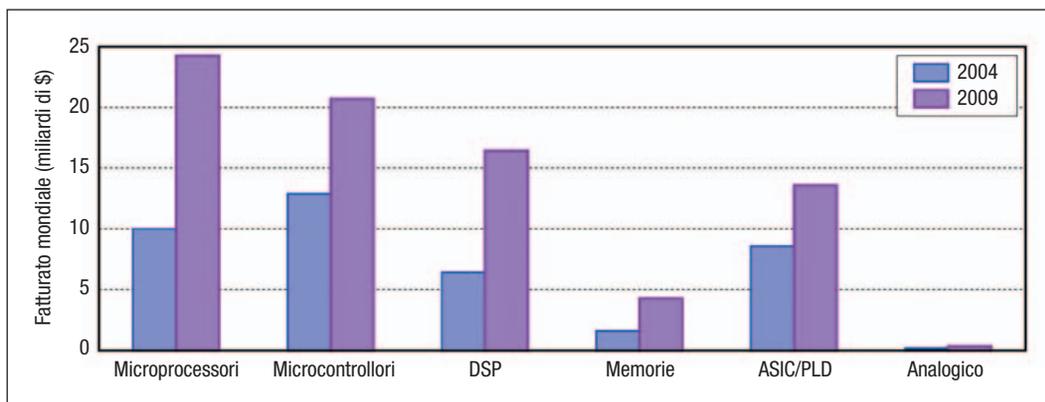


FIGURA 6
Mercato dell'hardware *embedded* per settore applicativo

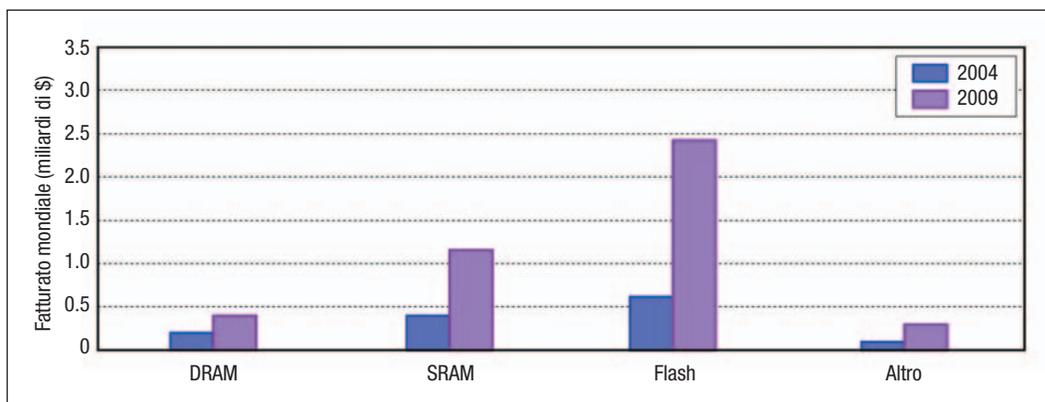


FIGURA 7
Mercato delle memorie suddiviso per tecnologia



bondanti rispetto alle singole applicazioni poiché versatilità ed ottimizzazione sono obiettivi contrastanti. Per esempio, l'utilizzo di un'applicazione di elaborazione di testi difficilmente richiede più di qualche punto percentuale della piena potenza di calcolo dei moderni microprocessori, valore che risulta peraltro spesso insufficiente per la gestione efficace dei requisiti della grafica dei videogiochi, al punto da richiedere la presenza di schede grafiche dedicate.

Un sistema dedicato ad un'applicazione o ad una classe molto specifica di applicazioni può invece essere fortemente *ottimizzato*, venendo meno il requisito di garantire versatilità. In questo caso, sulla base di una conoscenza approfondita dell'applicazione, si può dimensionare in modo corretto ed ottimale la capacità di calcolo scegliendo opportunamente il microprocessore ed eventualmente utilizzando componenti hardware aggiuntivi per ridurre la potenza di elaborazione richiesta al processore stesso.

Non è pertanto affatto facile standardizzare l'architettura di un sistema *embedded*, poiché – anche a parità di requisiti funzionali – i vincoli posti dalla specifica applicazione possono portare a sistemi sensibilmente diversi. Avere per esempio l'obiettivo tassativo di realizzare il sistema in pochi mesi, spesso sbilancia le scelte verso soluzioni principalmente software, mentre le esigenze di raggiungere ingombri limitati o bassi costi unitari per elevati volumi di produzione possono richiedere lo sviluppo di hardware dedicato.

Dato lo spettro amplissimo degli ambiti applicativi e le peculiarità di ognuno di essi il tipo e l'importanza dei vincoli cui un sistema può essere soggetto variano moltissimo.

3.1. Peso e dimensioni

Spesso l'ingombro fisico del sistema è determinante, soprattutto per i dispositivi che non prevedono una collocazione fissa.

3.2. Costo

È un fattore determinante soprattutto per le produzioni in grandi volumi, tipiche dell'elettronica di consumo.

3.3. Consumo energetico

Sempre più sistemi stanno diventando por-

tabili, pertanto un basso livello di consumo energetico consente di avere batterie meno costose, più piccole e leggere e/o di ottenere durate del sistema che ne rendano pratico l'uso. Poiché il miglioramento tecnologico delle batterie è piuttosto lento, si deve affrontare il problema del consumo energetico in sede di progetto, sia per quanto concerne lo sviluppo dell'hardware, sia nella stesura del codice dell'applicazione nonché nella scelta dell'eventuale sistema operativo.

3.4. Dimensione del codice

Nella maggior parte dei casi, i sistemi *embedded* sono completi, ovvero il loro software risiede in un supporto di memoria permanentemente integrato nello stesso *chip* o sulla stessa *board* del microprocessore. Questo vincolo si riflette, soprattutto per motivi di costo e ingombro, sulla dimensione del codice che deve quindi essere il più possibile contenuta.

3.5. Prestazioni

Le prestazioni non sono un obiettivo generico, come spesso accade nella progettazione di un computer *general purpose*, ma dipendono dall'applicazione. In generale si devono soddisfare due tipi di vincoli: il tempo di reazione a un evento e il tempo di gestione dell'evento stesso eseguendo il codice ad esso associato. Questi vincoli si tradurranno in soluzioni architetture mirate a soddisfare tali requisiti mantenendo un costo limitato. Bilanciare costo e prestazioni, molto spesso significa ricorrere a soluzioni miste hardware/software, rendendo più complesso il processo di progettazione e sviluppo.

3.6. Tempo-reale

Non necessariamente legato al concetto di prestazione è quello di funzionamento in tempo reale o *real-time*. Nell'accezione più generale possibile si dice che un sistema o una parte di esso è soggetto a vincoli di tempo reale se alcune delle operazioni svolte devono essere iniziate o completate entro un tempo prefissato e ben preciso. Si distinguono vincoli *soft real-time*, la cui violazione porta unicamente ad un degrado delle prestazioni del sistema, e vincoli *hard real-time*, il cui mancato soddisfacimento comporta effetti catastrofici sul sistema, nonché, in alcuni casi, sull'ambiente circostante.

3.7. Affidabilità

In molti casi è necessario garantire il rispetto di rigide norme di certificazione che prevedono un'accurata analisi dei potenziali guasti. In tal caso è necessario disporre di una valutazione della probabilità che il sistema si guasti, cioè appunto della sua affidabilità. Si noti che poter disporre di tale informazione è di per sé un vincolo, che eventualmente diviene più stringente nella misura in cui si fissa una soglia minima di affidabilità.

3.8. Safety

Indica una misura della possibilità che a fronte di un guasto il sistema non provochi conseguenze gravi alle cose o alle persone con cui interagisce. A seconda dell'ambito applicativo – per esempio automotive, biomedicale, nucleare ecc. – si definiscono diversi criteri e diversi livelli di *safety*. In questo senso sono ormai consolidati diversi standard e metodi per la valutazione della *safety* quali ad esempio il *Safety Integrity Level* o SIL.

3.9. Sicurezza

Da non confondere con la *safety* è la sicurezza o security, ovvero la capacità di un sistema di proteggere le informazioni e di verificarne l'autenticità.

3.10. Time-to-market e flessibilità

Le metodologie e le tecnologie scelte per il progetto devono essere scelte in modo da consentire di arrivare al prodotto entro tempi stringenti, in modo da cogliere il massimo delle opportunità di mercato. Questo significa, per esempio, ricorrere ad un approccio alla progettazione che consenta di modificare il progetto in corso d'opera, visto che le fasi iniziali della progettazione avvengono quasi in parallelo alla stesura delle specifiche.

4. UN ESEMPIO TIPICO

Concludiamo questa breve introduzione ai sistemi embedded discutendo un semplice caso di studio relativo ad una funzionalità sempre più diffusa: ovvero la capacità di effettuare fotografie digitali. Tale funzionalità è ormai inclusa sia nelle macchine fotografiche digitali, sia in molti telefoni digitali e PDA, così com'è possibile scattare fotografie a partire da una vi-

deocamera digitale o una webcam. Un primo passo verso l'analisi e la progettazione di un sistema per la fotografia digitale consiste nel delineare lo specifico scenario di utilizzo, allo scopo di definire sia i requisiti funzionali sia i vincoli di progetto. In sintesi, questa prima fase ha lo scopo di identificare uno spazio delle soluzioni, entro cui prendere le decisioni che guideranno il successivo processo di sviluppo. I principali scenari d'uso potrebbero realisticamente essere i seguenti.

4.1. Macchina fotografica per consumer electronics

È l'utilizzo più naturale, in cui abbiamo un sistema concepito per fornire tale servizio. L'obiettivo è raggiungere le prestazioni migliori in termini di risoluzione, velocità di scatto, capacità di memorizzazione e di gestione delle foto memorizzate. L'interfaccia utente deve essere semplice e prevedere un piccolo schermo grafico. Il sistema deve offrire la possibilità di connessione sia verso un PC sia verso uno schermo televisivo. Visto che il sistema rimarrà acceso solo saltuariamente, i requisiti di consumo di potenza sono mediamente stringenti. Dal punto di vista meccanico è desiderabile, benché non indispensabile, ridurre le dimensioni. Un aspetto importante è il costo, dato che per un tale prodotto si prevedono volumi piuttosto elevati.

4.2. Funzione fotografica integrata in un cellulare/PDA

Per un telefono, nonostante il processo di convergenza del settore ICT, la capacità fotografica non dovrebbe essere un fattore cruciale. L'utilizzo tipico deve prevedere la presenza di un'interfaccia basata su pochi tasti, possibilmente gli stessi del telefono, con controlli e gestione molto semplificati, senza particolari elaborazioni dell'immagine se non una buona compressione. La risoluzione richiesta è medio-bassa e la velocità di scatto o la capacità di lavorare con bassa luminosità non sono determinanti. Non sono previste interfacce dedicate per le fotografie ma si dovrà fare uso di quelle del telefono, per esempio WiFi o Bluetooth. Il consumo di potenza e le dimensioni devono essere invece molto contenuti. Anche il costo finale della funzionalità deve essere estremamente ridotto.

4.3. Funzione di scatto singolo in videocamere digitali

La funzionalità in questo caso non è in realtà legata allo sviluppo di un sistema *ad-hoc*, ma viene in massima parte *derivata* da quella del sistema di acquisizione video esistente. Ciò significa avere forti vincoli, per esempio, riguardo al tipo e alla risoluzione del sensore ottico, che, essendo quello della videocamera sarà probabilmente inferiore al megapixel. Per contro la disponibilità di risorse di elaborazione, la dimensione delle batterie, la quantità di memoria disponibile, gli ingombri e la varietà di interfacce non sono aspetti critici e possono essere facilmente adattati per supportare la nuova funzionalità.

4.4. Funzionalità di scatto con webcam per PC fisso o portatile

Questo tipo di scenario d'uso ha molti punti in comune con il precedente, poiché anche in questo caso si tratta di una funzione *derivata* da quelle di un diverso sistema ospite. Le maggiori differenze risiedono nel tipo di interfaccia utente, nella memorizzazione e nel collegamento: si utilizzerà infatti un'interfaccia grafica e si ricorrerà ai sistemi di trasferimento dati e di memorizzazione normalmente presenti in un personal computer. Né la velocità di scatto né le dimensioni sono influenti.

Benché sintetica, una simile descrizione degli scenari applicativi di una stessa funzionalità mette comunque in luce buona parte dei vincoli iniziali di un progetto realistico. Tali considerazioni sono il punto di partenza per il raffinamento dell'architettura hardware e software mirato alla realizzazione della funzione in esame.

A questo punto entrano in gioco conoscenze, metodologie e strumenti specifici dei diversi domini: progettazione di sistemi elettronici analogici, di componenti digitali, di *printed circuit board* e di parti meccaniche, sviluppo di software di base e di software applicativo, conoscenze approfondite dei sistemi operativi e dei problemi di networking, progettazione e sviluppo di interfacce uomo-macchina e molti altri ancora. Tutto ciò rende la progettazione dei sistemi embedded alquanto complessa e critica ma ne fa al tempo stesso una delle più interessanti sfide per i progettisti e gli ingegneri di oggi.

Bibliografia

- [1] Brandolese C., Fornaciari W.: *Sistemi Embedded*. Pearson Education, Milano, 2007.
- [2] Marwedel P.: *Embedded System Design*. Kluwer Academic Publisher, Boston 2003.
- [3] Vahid F., Givargis T.: *Embedded System Design - A unified Hardware/Software Introduction*. John Wiley & Sons, 2002.
- [4] HiPEAC: European Network of Excellence on High-Performance Embedded Architecture and Compilation. *The HiPEAC Roadmap on Embedded Systems*. Sixth Framework Programme, 2006.
- [5] FAST GmbH: *Study of Worldwide Trends and R\&D Programmes in Embedded Systems in View of Maximising the Impact of a Technology Platform in the Area*. Final Report for the European Commission, Bruxelles 2005.
- [6] MEDEA+ Office: *Design Automation Roadmap e Applications Technology Roadmap*. <http://www.medeaplus.org> Parigi, 2007 (Aggiornato annualmente).
- [7] ITRS: *International Technology Roadmap for Semiconductors*. Web site: <http://www.itrs.net/reports.html> 2007 (Aggiornato annualmente).

CARLO BRANDOLESE, Ricercatore del Dipartimento di Elettronica e Informazione del Politecnico di Milano dal 2004 si occupa di problemi metodologici legati alla progettazione dei sistemi digitali e più in generale dei sistemi embedded. Negli ultimi anni i suoi interessi si sono rivolti in particolare alle problematiche di stima e ottimizzazione della potenza assorbita dalle componenti software dei sistemi misti. Collabora inoltre da più di 10 anni con il Cefriel occupandosi sia di trasferimento tecnologico e sviluppo hardware/software sia di formazione tecnica rivolta a studenti laureati e a professionisti.
E-mail: carlo.brandolese@polimi.it

WILLIAM FORNACIARI è professore associato presso il Politecnico di Milano, Dipartimento di Elettronica e Informazione. Si occupa da circa 15 anni di trasferimento tecnologico con aziende attive nel settore dei sistemi *embedded* e *consumer electronics*. I suoi interessi di ricerca riguardano le strategie per la riduzione del consumo energetico, sotto il profilo sia hardware sia software, le metodologie di progettazione di sistemi misti hardware-software, i sistemi operativi e le reti di sensori wireless. A partire dal 1990 ha collaborato a 7 progetti di ricerca internazionali su tali tematiche. È autore di oltre 100 articoli pubblicati in conferenze/riviste internazionali ed ha ricevuto 4 International Awards. Nel corso del 2007 ha pubblicato il primo libro italiano sui sistemi embedded.
E-mail: william.fornaciari@polimi.it