

“L’INDUSTRIA  
INFORMA”

i

# La rivoluzione digitale

Fortunata Sciotto, Giovanna Zucchi,  
Daniel Guzzetti, Giorgio Corbucci

G Ital Aritmol Cardiotim 2003;2:98-107

## RIASSUNTO

La tecnologia digitale fa sempre più parte della nostra quotidianità e del nostro modo di essere. Alla base di questo scenario evolutivo si trova il processo che ha trasformato il segnale da analogico in digitale. La digitalizzazione consiste nel tradurre un dato in una sequenza numerica di 0 e 1 (sistema binario). Così codificati, segnali diversi tra loro (immagini fisse o in movimento, suoni, testi scritti) diventano omogenei e si possono gestire contemporaneamente, in modo flessibile e veloce, mantenendone inalterata la stabilità e la qualità nel tempo.

L’Analisi Digitale dei Segnali (*Digital Signal Processing*, DSP), a partire dagli anni Sessanta e Settanta, ha dato un significativo impulso all’elettronica e ai computer, aprendo le porte della scienza a nuove opportunità e infinite applicazioni.

Attualmente i computer sono utilizzati in moltissimi campi della medicina. In particolare, sono tre le principali tipologie di dati che vengono acquisiti, manipolati e archiviati: dati alfanumerici, immagini medicali e segnali fisiologici.

La tecnologia digitale DSP applicata allo stimolatore cardiaco si traduce nell’elaborazione digitale dei segnali intracardiaci e nella possibilità di decidere la terapia non solo in presenza del segnale, ma in base alla sua morfologia. Ad esempio, il pace-

Vitatron Medical Italia

maker del prossimo futuro potrà discriminare tra un'onda P e un'onda del campo lontano ventricolare. Sicuramente sarà un dispositivo rivoluzionario: non esisteranno più i periodi refrattari, né i blanking; non sarà più necessario ottimizzare la programmazione della sensibilità.

**Parole chiave:** pace-maker, tecnologia digitale, elaborazione dei segnali, applicazioni cliniche innovative.

**N**el 1995 Nicholas Negroponte, teorico e ricercatore presso il MIT-Massachusetts Institute of Technology, pubblica "Essere Digitali" e introduce gli sviluppi e gli effetti delle nuove tecnologie sul nostro mondo.<sup>1</sup> Oggi il suo libro è diventato uno slogan per descrivere la rivoluzione tecnologica che ha modificato significativamente la nostra realtà sociale, economica, interculturale.

## Vivere nell'era digitale

La tecnologia digitale fa sempre più parte della nostra quotidianità e del nostro modo di essere. Lo dimostrano i risultati di analisi di mercato condotte, a livello sia internazionale sia nazionale, sui consumi legati a Internet e a settori come quello della telefonia cellulare.<sup>2</sup> I dati presentati evidenziano anche una crescente comprensione e consapevolezza da parte degli utilizzatori di queste tecnologie emergenti.<sup>3</sup>

Alla base di questo scenario evolutivo si trova il processo che ha trasformato il segnale da analogico in digitale. La digitalizzazione consiste nel tradurre un dato in una sequenza numerica di 0 e 1 (sistema binario). Così codificati, segnali diversi tra loro (immagini fisse o in movimento, suoni, testi scritti) diventano omogenei e si possono gestire contemporaneamente, in modo flessibile e veloce, mantenendone inalterata la stabilità e la qualità nel tempo.

La "svolta" digitale vede una progressiva interazione-integrazione di settori che per molto tempo si sono sviluppati separatamente. Informatica, Telecomunicazioni, Media, Elettronica stanno convergendo verso un insieme di prodotti e di servizi che cambiano radicalmente il nostro modo di lavorare e di vivere.<sup>4</sup> Telefono

cellulare, CD, Internet, agende palmari, DVD, lettori MP3, videocamere, fotocamere digitali, televisione via satellite e via cavo sono solamente alcune delle numerose applicazioni di questa tecnologia "sintetica". Il concetto di sintesi rispecchia pienamente l'identità di questi nuovi strumenti integrati e interattivi, flessibili e dinamici. Allo stesso tempo sottintende la velocità nel gestire e trasmettere i dati, con un'accelerazione dei processi comunicativi (sms, e-mail) e una maggiore quantità di informazioni scambiate attraverso una compressione dei dati (con algoritmi specifici). Il termine sintetico indica infine la possibilità di ricreare immagini e oggetti molto vicini all'originale.<sup>5</sup>

Il senso dell'innovazione digitale è complesso e non interessa solo la natura hardware o software degli oggetti, ma anche il ruolo dell'utilizzatore. Il consumer non è soltanto un fruitore, ma è un soggetto attivo che vive in prima persona l'onda del cambiamento tecnologico sperimentando il *digital life style*.<sup>6</sup>

### La globalizzazione

Internet è una delle maggiori espressioni dell'era digitale. Il collegamento in rete restringe gli spazi mettendo in comunicazione luoghi remoti tra loro, nel commercio (e-business, shopping on line, conferenze on line) come nei servizi al cittadino (telelavoro, telemedicina, home banking).

### Ridefinizione del tempo

I bit viaggiano ad altissima velocità e accelerano i tempi degli scambi informativi.<sup>5</sup> Le nuove tecnologie consentono di poter acquisire informazioni in tempo reale (informazione on line) e in qualunque momento (banche dati elettroniche hanno tempi di consultazione brevissimi e sono sempre accessibili).

### Bit: piccolo e grande

I dati in formato digitale sono facilmente manipolabili e possono essere compressi senza subire alterazioni a livello dei contenuti. I bit permettono di racchiudere in poco spazio un vasto patrimonio di informazioni, come nel caso delle biblioteche digitali (on line o su supporti di memoria come il CD-Rom).

## Qualità digitale

La risoluzione esprime la capacità di registrare o riprodurre i dettagli più fini. Questo può essere sperimentato per la musica come per le immagini. I CD-Rom, rispetto ai vecchi dischi in vinile, riproducono il suono in modo pulito e in ogni sua sfumatura. Le immagini in formato digitale possono raggiungere una definizione maggiore rispetto alle fotografie tradizionali.

Un'altra caratteristica peculiare delle applicazioni digitali è la stabilità nel tempo: i CD-Rom, rispetto ai dischi in vinile, garantiscono una maggiore integrità delle prestazioni nel tempo.

## Da consumer a prosumer

La rivoluzione digitale conduce da un utilizzo passivo delle tecnologie a un utilizzo interattivo. L'utente interviene direttamente nella selezione e nell'elaborazione delle informazioni, seguendo un proprio percorso, un progetto personale.

La fotografia digitale permette di osservare attentamente la scena da fotografare prima di eseguire lo scatto; riprodurre la foto in tempo reale sul display della fotocamera digitale; disporre e osservare la foto immediatamente dopo lo scatto; cancellare immediatamente le foto che non piacciono; riscrivere sulla pellicola digitale (memoria); elaborare successivamente i soggetti in molteplici modalità.

In medicina, la diagnostica per immagini (TC, RM) consente di generare immagini tridimensionali all'interno delle quali è possibile navigare, per una visione da diverse angolazioni.

## Nuove tecnologie, nuove sinergie

Il mondo delle tecnologie digitali si sviluppa in chiave multimediale, con prodotti che combinano varie applicazioni e funzionalità. Oggi possiamo ricercare alcuni esempi soprattutto nei settori della comunicazione e dell'intrattenimento: cellulari di ultima generazione (terminali con connessione a Internet, fotocamera integrata, capaci di gestire contemporaneamente suoni, immagini, testi), televisione interattiva (pay per view e televisione via cavo interattiva permettono all'utente di scegliere la propria programmazione), l'home video

digitale (il DVD offre dei significativi vantaggi rispetto all'attuale VHS: per esempio una migliore risoluzione video, canali multipli, audio Dolby Digital, una durata maggiore rispetto ai nastri VHS).

Gli sviluppi futuri di queste applicazioni interesseranno il mondo del lavoro, la formazione, i servizi assistenziali, l'home automation.

## Storia della tecnologia digitale: dalla rivoluzione industriale del Settecento ad oggi

La rivoluzione digitale ha origini lontane.<sup>7</sup> Nel Diciottesimo secolo gli artigiani francesi erano estremamente esperti nel produrre al telaio tessuti con decorazioni molto elaborate. Il macchinario utilizzato per la tessitura era "programmato" tramite un metodo che venne perfezionato da Joseph Jacquard all'inizio del Diciannovesimo secolo. Jacquard usò delle schede perforate, i cui buchi servivano per posizionare i fili secondo uno schema preciso. Ogni buco consentiva di inserire nel modello del disegno un uncino con attaccato il filo di stoffa. In assenza del buco, l'uncino non poteva uscire e quindi il filo colorato corrispondente non poteva essere inserito nella trama. Per ogni operazione era fornita una scheda perforata e l'insieme di tutte le schede costituiva il programma completo del processo di tessitura.

Le schede perforate attirarono l'attenzione dei produttori di macchine calcolatrici. Nel 1890 il Censimento degli Stati Uniti d'America fu eseguito con l'aiuto di macchine calcolatrici progettate da Hermann Hollerith, un inventore che aveva adattato il sistema delle schede perforate alle particolari esigenze del censimento. Hollerith aggiunse un dispositivo elettrico per rilevare la presenza dei fori nelle relative schede. L'analisi dei dati del censimento fu completata in un decimo del tempo che sarebbe stato richiesto col metodo usato precedentemente. Il successo stimolò Hollerith a cercare altre applicazioni per questa tecnologia. Egli fondò una società per produrre macchine contabili, che in seguito diventò la International Business Machine (IBM) Corporation.

Dal 1937 la tecnologia delle schede perforate, assieme ai meccanismi elettrici ideati da Hollerith, si dimo-

strò così efficiente che molti ingegneri ne suggerirono l'utilizzo in combinazione con la più recente forma di macchina calcolatrice che Howard Aiken, professore di matematica applicata dell'Università di Harvard, stava progettando. Egli elaborò un piano specifico al fine di sviluppare calcolatori meccanici che potessero lavorare su problemi matematici in maniera sequenziale. Successivamente, con il supporto dell'International Business Machine Corporation, dell'Università di Harvard e con l'assistenza di quattro collaboratori della IBM, costruì il primo computer moderno. Questa macchina, chiamata Automatic Sequence Controlled Calculator (anche conosciuta come Harvard Mark I computer) fu presentata ad Harvard nell'agosto del 1944. Le istruzioni e i dati erano inseriti nel computer tramite un nastro di carta perforato. I componenti logici digitali erano realizzati sulla base di principi elettrici, elettronici e meccanici. Le operazioni erano invece controllate tramite interruttori e relais. Il Mark I era in grado di eseguire 200 addizioni per minuto e poteva eseguire calcoli trigonometrici di seno e coseno in circa un minuto. Sebbene la macchina fosse di enormi dimensioni e limitata per quanto riguarda velocità e flessibilità, se comparata ai computer attuali, era la prima a possedere effettivamente tutte le caratteristiche di un moderno computer.

Il primo computer elettronico al mondo adatto a un uso generico fu costruito nel 1946 da Eckert e Mauchly dell'Università di Pennsylvania. La risposta, quasi immediata, dei componenti elettronici adoperati per il loro ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) rese possibile moltiplicare due numeri a dieci cifre in 30 millisecondi, cento volte più veloce dei tre secondi del Mark I. L'ENIAC era composto di 18.000 valvole e 6000 interruttori per essere in grado di eseguire 5000 addizioni per secondo. Le sue dimensioni erano enormi: occupava il perimetro di un'intera stanza di 9 per 15 metri circa, pesava 30 tonnellate e richiedeva la presenza di 80 ventilatori perché i componenti non si riscaldassero troppo.

Lo sviluppo tecnologico dell'elettronica ebbe un'accelerazione negli anni Sessanta e Settanta quando i computer cominciarono a raggiungere una potenza di calcolo che apriva nuovi spiragli nel mondo della scienza: l'Analisi Digitale dei Segnali (*Digital Signal Processing*, DSP).

L'analisi digitale dei segnali si differenzia dalle altre branche dell'Informatica proprio per l'unicità del tipo di dati utilizzati: i segnali. In molti casi questi segnali sono prodotti da sensori che misurano caratteristiche del mondo reale: vibrazioni sismiche, immagini, onde sonore. Il DSP è l'unione della matematica, degli algoritmi e delle tecniche impiegate per analizzare questi segnali dopo che sono stati convertiti in forma digitale. L'analisi può avere vari obiettivi: miglioramento dell'immagine, riconoscimento e generazione del parlato, compressione di dati per la trasmissione e l'immagazzinamento, ecc.

A causa dell'elevato costo dei computer, all'inizio la tecnologia DSP fu sviluppata solo nell'ambito di quattro aree "critiche": radar e sonar, a tutela della sicurezza nazionale; ricerche petrolifere, fonti di ingenti profitti; esplorazioni spaziali, dove i dati sono insostituibili; imaging medicale, per salvare vite umane. La rivoluzione dei personal computer degli anni Ottanta e Novanta permise di impiegare questa tecnologia in altri campi. Più che essere guidato da necessità militari o governative, il DSP andò incontro a uno sviluppo motivato da logiche commerciali.

I settori in cui oggi viene applicata la tecnologia DSP sono vari, come molteplici sono gli obiettivi del suo utilizzo:<sup>8</sup>

- Settore spaziale: miglioramento di immagini spaziali, compressione dei dati, analisi con sensori intelligenti eseguite tramite l'uso di sonde spaziali.
- Settore commerciale: compressione di suoni e immagini per presentazioni multimediali, effetti speciali dei film, videoconferenze.
- Settore telefonico: compressione della voce e dei dati, riduzione dell'effetto eco, multiplexing di segnali, filtraggio.
- Settore militare: radar, sonar, comunicazione criptata.
- Settore industriale: prospezioni minerarie e petrolifere, controllo e monitoraggio di processi, test non distruttivi, CAD e strumenti di disegno.
- Settore scientifico: analisi e registrazioni sismiche, acquisizione di segnali di varia natura e tipologia, analisi in frequenza, modellazione e simulazione.
- Settore medicale: imaging diagnostico (tomografia computerizzata, risonanza magnetica nucleare, ultrasonografia), immagazzinamento e ricerca di immagini, analisi elettrocardiografica ed encefalografica.

## Il DSP in medicina

Attualmente i computer sono impiegati in moltissimi campi della medicina. In particolare, in ambiente ospedaliero, sono tre le principali tipologie di dati che devono essere acquisiti, manipolati e archiviati: dati alfanumerici, immagini medicali e segnali fisiologici.<sup>9</sup>

I dati alfanumerici includono il nome del paziente, l'indirizzo, il codice identificativo, i risultati dei test di laboratorio e le note del medico curante. Le immagini, rese possibili dall'analisi digitale dei segnali, comprendono radiografie, scansioni con tomografia computerizzata, risonanza magnetica e ultrasuoni. I segnali fisiologici monitorati più comunemente sono invece l'elettrocardiogramma, l'elettroencefalogramma e la pressione sanguigna.

Ognuno dei dati sopracitati è manipolato con sistemi differenti: i dati alfanumerici sono normalmente archiviati in un database nel server centrale dell'ospedale, le immagini sono spesso archiviate su lastre fotografiche (anche se in alcuni casi si sta diffondendo la codifica digitale con significativi vantaggi: la consultazione può avvenire da qualunque postazione collegata alla rete dell'ospedale, l'immagine in questo formato non è soggetta a degradazione col passare del tempo), mentre i segnali fisiologici, spesso controllati durante le operazioni chirurgiche, necessitano di un'analisi in tempo reale. Proprio in quest'ultimo caso il DSP rappresenta un'importantissima risorsa.

Lavorare con la tecnologia DSP presenta importanti opportunità. Le principali sono:

- Il segnale elettrico generato dai trasduttori, una volta convertito in digitale, non si degrada nei vari passaggi di manipolazione e può essere rigenerato ed elaborato un numero infinito di volte, senza perdere alcuna delle informazioni originariamente presenti in esso.
- L'elaborazione di un segnale in forma digitale è più semplice e flessibile di quella analogica.
  - I filtri analogici infatti sono implementati tramite strutture hardware fisse basate su circuiti elettrici attivi o passivi e operano su segnali continui. I filtri digitali sono invece realizzati tramite programmi software e lavorano su sequenze numeriche (il segnale originale campionato e convertito).

Il grosso vantaggio è costituito dalla possibilità di realizzare anche filtri complessi, che possono essere modificati via software.

- L'analisi nel dominio delle frequenze, rispetto alla più usuale analisi nel dominio del tempo, è decisamente di più semplice implementazione e anche molto più flessibile (personalizzabile).
- L'analisi del segnale può essere eseguita in maniera così dettagliata da poter estrarre la totalità delle informazioni contenute nella morfologia, riducendo in questo modo sia i falsi positivi sia i falsi negativi.
- Il segnale digitale si presta a elaborazioni che ne riducono la dimensione effettiva (compressione), consentendo quindi di immagazzinare un maggior numero di dati rispetto a quello che si potrebbe ottenere in analogico.

Il DSP è una metodologia estremamente potente, che si può sfruttare solo con l'impiego di tecnologie avanzate; l'analisi in "tempo reale" dei segnali e il riconoscimento delle informazioni utili richiedono infatti una capacità di calcolo notevole.

## Il pacemaker digitale

*Che cosa significa realizzare un pace-maker con tecnologia digitale? L'elaborazione digitale dei segnali può migliorare le prestazioni e l'affidabilità di uno stimolatore cardiaco?*

L'introduzione di una nuova tecnologia in medicina avviene di solito quando questa si è dimostrata sicura e affidabile, in particolare quando è stata applicata e utilizzata con successo in altri settori. Così è stato anche per la tecnologia digitale nel campo dell'elettrostimolazione. La tecnologia digitale ha realmente rivoluzionato il nostro modo d'essere e di operare nella vita di tutti i giorni, dove possiamo sperimentarne la velocità, la flessibilità, la stabilità e la qualità nel tempo, e quindi l'affidabilità.

*Come mettere in atto le potenzialità della tecnologia digitale in uno stimolatore cardiaco?*

Si può prendere in esame il funzionamento dei pacemaker attualmente in commercio e confrontarlo con quello di un dispositivo nel quale i segnali sono elaborati in maniera digitale, cioè con tecnologia DSP.



## Il DSP nel Medical Imaging

Nel 1895, Röntgen scoprì che i raggi X potevano passare attraverso un sostanziale strato di materia. La medicina fu quindi rivoluzionata dalla possibilità di "guardare" all'interno del corpo umano: nel giro di pochi anni sistemi radiografici a raggi X si diffusero in tutto il mondo. Sebbene avesse avuto un grosso successo, la radiografia a raggi X era limitata da quattro problemi, risolti solamente con l'avvento del DSP:<sup>8</sup>

1. Strutture sovrapposte nel corpo si nascondono una dietro l'altra (ad esempio alcune parti del cuore non sono visibili perché possono rimanere nascoste dietro alle coste).
2. Non sempre si riescono a distinguere tessuti simili (ad esempio si discrimina facilmente l'osso dal tessuto molle, ma è molto difficile distinguere un tumore dal fegato).
3. Le radiografie mostrano la sola anatomia del corpo e non la fisiologia (la radiografia di una persona viva è molto simile a quella di una morta).
4. L'esposizione ai raggi X può causare tumori e deve quindi essere limitata e adoperata solamente se strettamente necessaria.

Il primo problema fu risolto nel 1971 con l'introduzione della prima scansione tomografica computerizzata. Tale metodologia è un tipico esempio d'elaborazione digitale di segnali. I raggi X attraversano la sezione del corpo da analizzare da varie direzioni. Invece che formare banalmente l'immagine su di una lastra, i raggi X uscenti dal corpo sono misurati, convertiti in digitale e memorizzati in un computer. Queste informazioni sono poi usate per *calcolare* le immagini che rappresentano sezioni del corpo che normalmente non si sarebbero potute ottenere. Oltretutto queste immagini hanno una risoluzione maggiore, che consente una migliore diagnosi. L'impatto della tomografia computerizzata (TC) fu importante tanto quanto l'introduzione iniziale della radiografia a raggi X e, in pochi anni, tutti i maggiori ospedali si dotarono di un'apparecchiatura per TC. Nel 1979 due dei maggiori collaboratori, Hounsfield e Cormack, ricevettero il premio Nobel per la Medicina.

Gli altri tre problemi sono stati risolti utilizzando sorgenti d'energia diverse dai raggi X: onde radio e onde sonore. In queste nuove tecnologie il DSP gioca ancora una volta un ruolo fondamentale. Ad esempio la risonanza magnetica nucleare sarebbe ancora un sogno senza l'elaborazione digitale dei segnali.

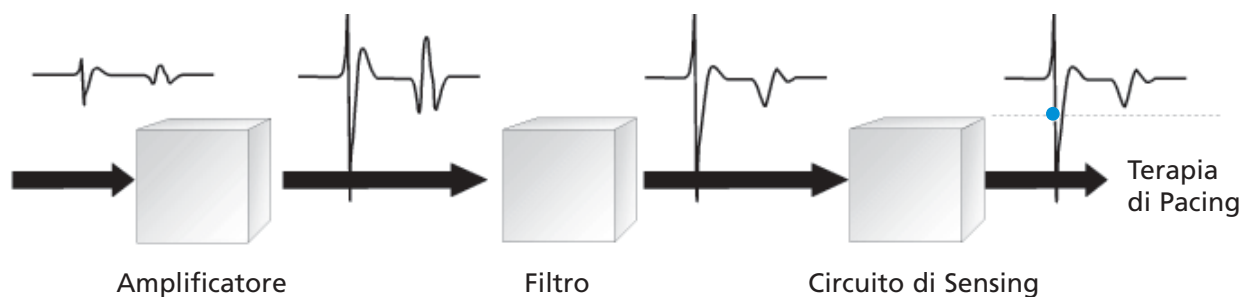
## Segnale-Informazione-Sensing

Funzione principale ed essenziale di un pace-maker è la generazione di impulsi elettrici per il ripristino e il mantenimento della corretta funzionalità cardiaca. L'intervento del pace-maker è richiesto soltanto in assenza di ritmo spontaneo appropriato, così che il dispositivo non entri mai in competizione con l'attività intrinseca del cuore. Il pace-maker perciò non rappresenta un semplice generatore di impulsi elettrici, ma un dispositivo elettronico dotato di un circuito per la stimolazione e di un altro, ugualmente importante, con funzione di sensing, per la rilevazione dell'attività cardiaca intrinseca, quando presente.

Il pace-maker lavora comunicando continuamente con il cuore del paziente: l'impulso elettrico erogato dallo stimolatore in un particolare momento della sequenza dei cicli cardiaci è la risposta ai segnali provenienti dal cuore, che il pace-maker riceve come input. Comunicare significa scambiare informazioni; il segnale proveniente dal cuore ha un contenuto informativo: per esempio, la camera cardiaca, dal quale proviene il segnale, si è depolarizzata.

In genere, in che modo avviene lo scambio d'informazioni?

Si comunica producendo variazioni in opportune grandezze fisiche. Affinché la comunicazione abbia luogo è necessario che l'utilizzatore dell'informazione sia in grado di attribuire un significato alla variazione rilevata. Una qualunque grandezza fisica variabile nel tempo che sia, per natura o per convenzione, "significativa", in quanto apportatrice di informazione, viene detta "segnale".<sup>10</sup> Un esempio espressivo a tal proposito è il segnale ECG di superficie, proiezione su un piano definito dalla derivazione scelta della depolarizzazione e della ripolarizzazione cardiache. La sequenza degli eventi cardiaci è resa visibile dalla variazione nel tempo del segnale elettrico proveniente dal cuore. La morfologia, l'ampiezza e la durata della deflessione del segnale dall'isoelettrica permettono di identificare sull'ECG di superficie gli eventi cardiaci: onda P-depolarizzazione atriale, complesso QRS-depolarizzazione ventricolare e così via. Il medico che osserva un ECG di superficie sa leggere nella morfologia, nella durata e nell'ampiezza del segnale la funzionalità cardiaca, e decide di conseguenza le terapie opportune. Analogamente, il segnale endocavitario proveniente dal cuore



**FIGURA 1** Elaborazione analogica dei segnali.

viene utilizzato dal pace-maker per decidere se, quando, dove e come intervenire. Il segnale intracardiaco è una grandezza fisica che trasporta sempre una pluralità di informazioni.

In che modo il pace-maker legge il segnale? Qual è l'informazione utilizzata dal dispositivo? Il pace-maker è in grado di rilevare correttamente il segnale intracardiaco e leggerne e/o interpretarne correttamente il contenuto informativo?

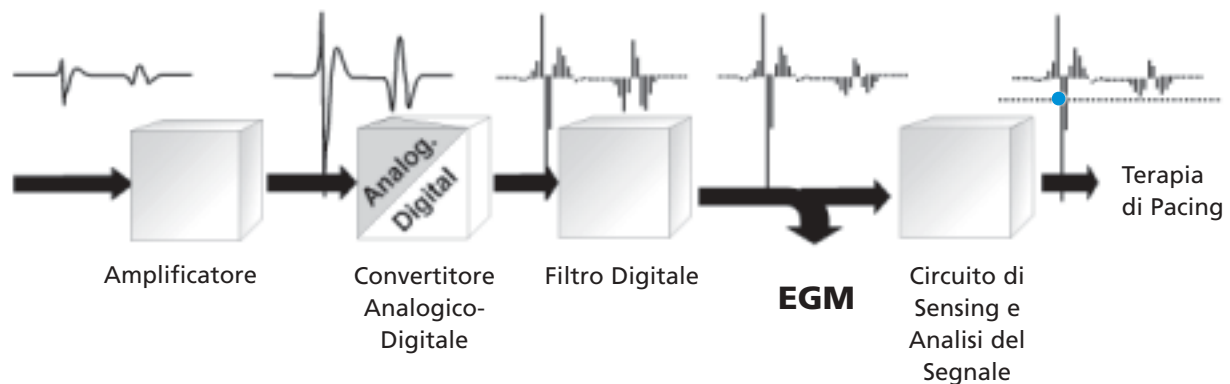
### Tecnologia analogica

Attualmente gli stimolatori standard si preoccupano solo di sapere se il potenziale endocavitario c'è o non c'è, nessuno si preoccupa di capire anche com'è. Il segnale che il pace-maker riceve dall'elettrocatteter è un segnale elettrico analogico, vale a dire un segnale che varia con continuità nel tempo. Il segnale analogico può assumere tutti gli infiniti valori compresi in un certo intervallo. Perché ci sia comunicazione, passag-

gio d'informazione tra la sorgente e l'utilizzatore, un segnale deve essere trasmesso ed eventualmente elaborato. Durante la trasmissione il segnale analogico subisce per sua natura delle distorsioni, inoltre vi si possono sovrapporre dei disturbi, segnali omogenei indesiderati, ma non completamente eliminabili. Un esempio molto espressivo di questo è il sensing atriale: al segnale proveniente dalla depolarizzazione atriale si possono sommare segnali della stessa natura elettrica, provenienti dalla vicina camera ventricolare (sensing del campo lontano ventricolare) e/o dai tessuti circostanti il cuore (miopotenziali). In tal modo l'informazione contenuta nel segnale utile è distorta. L'elettrocatteter atriale riceve e trasporta al pace-maker un segnale con un contenuto informativo non strettamente "atriale". L'informazione così ricevuta può determinare l'intervento del pace-maker con una terapia non appropriata dal punto di vista clinico, ma corretta per il dispositivo. Il rilevamento dei miopotenziali può essere interpretato come una tachiaritmia atriale in atto e



**FIGURA 2** Segnale analogico vs. digitale.



**FIGURA 3** Elaborazione digitale dei segnali.

determinare l'inibizione atriale, la commutazione di modalità di stimolazione in un pace-maker doppia camera, l'attivazione di algoritmi e sistemi di monitoraggio delle aritmie atriali in modo assolutamente non appropriato. È comprensibile come la funzione di rilevamento dell'attività intrinseca cardiaca costituisca il punto cruciale per i progettisti hardware e software dei pace-maker. Il corretto funzionamento del pace-maker e l'erogazione di una terapia di stimolazione appropriata dipendono esclusivamente da un esatto rilevamento dei segnali cardiaci intrinseci, ovviamente quando presenti.

Per raggiungere l'obiettivo di un buon sensing, l'hardware dei pace-maker è dotato di filtri per discriminare i segnali utili e il software rende disponibile una serie di parametri, quali il periodo refrattario, il blanking, la sensibilità e la polarità di sensing, per nascondere o evitare il rilevamento dei segnali indesiderati. I periodi refrattari e i blanking non eliminano il problema dei disturbi che si sommano al segnale utile; semplicemente impediscono al dispositivo di "vedere", cosa di per sé non corretta. In realtà il dispositivo dovrebbe sempre "vedere" ed essere in grado di interpretare in tempo reale il ritmo cardiaco. Nonostante i filtri e una buona programmazione del pace-maker, il problema del corretto rilevamento dei segnali rimane tuttora il punto debole del sistema e mostra i limiti della tecnologia attualmente in uso negli stimolatori cardiaci che utilizzano ed elaborano in modo analogico i segnali.

È necessario, infine, comprendere quale sia l'informazione che interessa estrapolare dal segnale intracardiaco, cosa interessa conoscere e "vedere" per avere un corretto sensing. L'obiettivo ideale da raggiungere è un pace-maker dotato della stessa capacità di lettura posseduta dal cardiologo davanti a un ECG! La morfologia, la durata e l'ampiezza del segnale ECG permettono all'operatore di valutare e fare una diagnosi del ritmo. Del contenuto informativo associato al segnale intracardiaco il pace-maker attualmente utilizza ben poco. Lo schema relativo all'elaborazione del segnale in un sistema analogico (Figura 1) mostra quale sia l'unica informazione utilizzata. Il segnale attraversa un amplificatore analogico che ne incrementa l'ampiezza; il segnale amplificato attraversa un filtro analogico che ha l'obiettivo di eliminare i segnali indesiderati e lasciar passare quello proveniente dalla camera cardiaca considerata. Il segnale così amplificato e filtrato raggiunge il circuito di sensing: un comparatore pone a confronto il segnale con un valore soglia determinato dalla sensibilità programmata. È importante porre l'accento sul circuito di sensing: tutte le decisioni sulle terapie di stimolazione del pace-maker vengono prese in base all'uscita di tale blocco. Il dispositivo decide di erogare o meno l'impulso, di commutare modalità di stimolazione, di attivare o meno una o più delle tante funzioni presenti negli stimolatori cardiaci unicamente sulla base del sensing. Diversamente il pace-maker torna ad essere il semplice generatore d'impulsi elettrici quale era in origine. Dopo che è avvenuto il sensing, il



resto del contenuto informativo trasportato dal segnale è perso, non utilizzato, se non per periodiche misure dell'ampiezza del segnale atriale o ventricolare. Il segnale fornisce informazioni solamente quando supera la soglia di sensing (sensibilità programmata), permettendo al microprocessore del pace-maker di calcolare il ciclo cardiaco e di stabilire quale terapia di pacing attivare. Nulla rimane della morfologia del segnale. Alcuni pace-maker memorizzano i segnali intracardiaci (EGM) soltanto per fini diagnostici. La memorizzazione è "passiva"; il dispositivo non utilizza il segnale per "decidere" quale terapia erogare.

Il pace-maker non è in grado con la tecnologia analogica di "leggere" la morfologia: non è in grado di discriminare tra un'onda P sinusale e una P retrograda, o da una tachiaritmia o ancora da un'onda del campo lontano ventricolare. Con la tecnologia analogica, la classificazione degli eventi cardiaci è basata unicamente sulla distanza temporale di sensing consecutivi.

### **Tecnologia digitale**

*È possibile migliorare la capacità di sensing dei pace-maker con l'elaborazione digitale dei segnali (DSP)?*

Il termine digitale non deve essere assolutamente confuso con "elettronico". I pace-maker attualmente in commercio sono già dei dispositivi elettronici. L'elettronica si occupa di elaborare, vale a dire trasformare in modo opportuno e trasmettere dei "segnali elettrici": correnti elettriche, differenze di potenziale elettrico, cariche elettriche, ecc.<sup>10</sup> L'elettronica si occupa di elaborare e trasmettere informazioni. I segnali elettrici che trasportano l'informazione possono essere analogici oppure digitali. I pace-maker attualmente ricevono segnali analogici e il loro rilevamento è di tipo analogico.

*Quali sono attualmente le informazioni digitali conservate nella memoria di un pace-maker?* Informazioni diagnostiche legate alla sequenza degli eventi cardiaci, spontanei o indotti dal pace-maker (intervalli cardiaci, percentuale di stimolazione, ecc.); informazioni tecniche sullo stato della batteria e degli elettrocateri. In ultima analisi, informazioni che possono essere conservate in memoria perché sono già in formato numerico. Il microprocessore del pace-maker è un computer in miniatura che elabora informazioni in formato numerico.

Parlare di tecnologia digitale in uno stimolatore cardiaco significa qualcosa di ben diverso. La tecnologia digitale DSP applicata allo stimolatore cardiaco si traduce nell'elaborazione digitale dei segnali intracardiaci! Ecco la grande novità: il pace-maker può decidere la terapia non solo in presenza del segnale, ma in base alla sua morfologia!

È digitale un segnale che assume una quantità numerabile di valori in un certo intervallo (vale a dire che i valori si possono contare). Il segnale digitale è discreto, a differenza di quello analogico che è continuo (Figura 2).

È lecito chiedersi perché, pur avendo a disposizione un segnale analogico con un'infinità di valori, si preferisca trasformarlo in digitale con un numero finito di valori e, apparentemente, con un contenuto informativo minore. La risposta in realtà è molto semplice e deve essere ricercata nella natura stessa del segnale analogico. Durante la trasmissione e l'elaborazione il segnale analogico subisce delle distorsioni e ad esso si sommano disturbi che ne alterano il contenuto informativo. Dal momento che il segnale analogico varia con continuità e tutti i valori che assume sono ugualmente significativi, è necessario che i disturbi e le distorsioni siano piccoli per rendere riconoscibile il segnale utile. I segnali digitali hanno invece la caratteristica fondamentale di poter essere riconosciuti e ricostruiti (rigenerati) rimanendo inalterati nei vari passaggi. Per una migliore comprensione, s'immagini il segnale digitale come una sequenza finita di valori numerici, che facilmente possono essere elaborati da un microprocessore e conservati in una memoria.

Per trasformare un segnale analogico in digitale occorre misurarne il valore (campionamento) a intervalli temporali regolari. Il risultato del campionamento è una sequenza di valori numerici; graficamente una sequenza di punti equidistanti lungo l'asse dei tempi. Congiungendo idealmente i punti ottenuti si ricostruisce il profilo del segnale originario. Il numero dei punti e quindi il grado di risoluzione dipende dalla frequenza di campionamento, vale a dire dal numero di misure compiute nell'unità di tempo.

Per beneficiare appieno della trasformazione in digitale del segnale intracardiaco-analogico occorre soddisfare una condizione: il segnale digitale deve trasporta-

re lo stesso contenuto informativo del segnale originario. Tale condizione è soddisfatta utilizzando un'elevata frequenza di campionamento; in genere un segnale è riprodotto in modo accurato quando la frequenza di campionamento è almeno il doppio della frequenza massima intrinseca del segnale analogico da trasformare (teorema di Shannon).

Una volta trasformato il segnale intracardiaco in formato digitale, occorre dotare il pace-maker della capacità di "leggerne" il contenuto informativo, come un cardiologo è in grado di interpretare gli eventi cardiaci su un tracciato ECG. Ai progettisti software è lasciato il compito di rendere il pace-maker capace di leggere e mettere insieme le informazioni derivanti dalla morfologia, dall'ampiezza e dalla durata del segnale digitale. Il pace-maker del prossimo futuro potrà discriminare tra un'onda P e un'onda del campo lontano ventricolare! Sicuramente sarà un dispositivo rivoluzionario: non esisteranno più i periodi refrattari, né i blanking; non sarà più necessario ottimizzare la programmazione della sensibilità, in modo particolare di quella atriale. Questo l'obiettivo da raggiungere; quale lo stato dell'arte?

Prendiamo in esame lo schema a blocchi di un pace-maker realizzato con tecnologia digitale (Figura 3). Molti dei componenti circuitali sono ora di tipo digitale; il primo blocco di amplificazione rimane ancora analogico. Il segnale è trasformato in digitale e filtrato attraverso un convertitore analogico-digitale e un filtro digitale. Il segnale così ottenuto è l'EGM (elettrogramma endocavitario), che può essere visualizzato a monitor e stampato, disponibile in molti pace-maker attualmente in commercio.

Gli stimolatori cardiaci si distinguono per la frequenza con cui campionano il segnale. Un'elevata frequenza di campionamento significa alta risoluzione, elevata qualità del segnale ricostruito e quindi attendibilità, affidabilità.

Allo stato attuale i pace-maker utilizzano il segnale digitale solamente per poter visualizzare sul monitor del programmatore l'EGM; poterlo stampare e conservare nella memoria del dispositivo. Si tratta in ogni caso di una memorizzazione passiva; il microprocessore non utilizza la sequenza di numeri, che rappresentano l'EGM, per prendere una decisione relativamente alla terapia di pacing.

Un pace-maker basato sulla tecnologia digitale "vede" e quindi utilizza per il sensing lo stesso segnale che l'operatore vede sul monitor del programmatore!

Tutti i valori campionati, numerici, possono essere salvati, ma soprattutto elaborati per estrapolare informazioni diagnostiche dal pace-maker stesso. Un esempio semplice è il riconoscimento in tempo reale del *far field* ventricolare rilevato in atrio, che presenta una morfologia molto diversa rispetto ai segnali atriali, evitando così falsi positivi.

Con la tecnologia DSP tutte le informazioni sono in formato numerico e utilizzabili da un veloce microprocessore del pace-maker per elaborare e mettere insieme dati di interesse clinico e tecnico. I risultati di tali elaborazioni ottimizzano anche il follow-up in termini di qualità, tempo e affidabilità.

## Bibliografia

1. Negroponte N. *Being Digital*. New York, Alfred A. Knopf 1995:133-225.
2. Federcomin-Anie in collaborazione con Niche. *L'Italia dell'e-family. Rapporto 2002*. Roma, Federcomin Servizi 2003:5-15.
3. Turani G. È partita la grande rivoluzione digitale. *La Repubblica. Affari & Finanza* 28 ottobre 2002:1.
4. Smau Duemila. *Tecnologie e applicazioni per la casa: mercato e scenari evolutivi*. Milano, Smau 1-17.
5. Bettetini G. *Tecnologie della comunicazione e mutamenti della struttura economica e sociale*. [www.mediamente.it/biblioteca](http://www.mediamente.it/biblioteca), 27 marzo 1998.
6. Negroponte N. *Beyond digital*. [www.wired.com/wired/archive/6.12](http://www.wired.com/wired/archive/6.12)
7. Smith RJ, Dorf RC. *Circuits, devices and systems*. New York, John Wiley & Sons 1992:428-429.
8. Smith SW. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. San Diego, California Technical Publishing 1999: 1-10.
9. Tompkins WJ. *Biomedical Digital Signal Processing*. Englewood Cliffs, Prentice Hall 1993:1-4.
10. Calzolari PU, Graffi S. *Elementi di elettronica*. Bologna, Zanichelli 1984.

## Indirizzo per la corrispondenza

Giovanna Zucchi  
Vitatron Medical Italia Srl  
Via dell'Arcoveggio, 49/5  
40129 Bologna  
Tel.: 051/323186  
Fax: 051/327666  
E-mail: giovanna.zucchi@vitatron.com