

Heart Rate Variability: impariamo ad ascoltare il nostro cuore

di *Franco Missoli*



Iniziamo ad occuparci questo mese di un argomento molto interessante che coinvolge medicina, salute ed elettronica: l'Heart Rate Variability (HRV), una tecnica di misurazione ed analisi della variabilità della frequenza cardiaca con implicazioni in cardiologia, psicofisiologia, psicologia, psicoterapia, medicina olistica e medicina dello sport. In questa prima puntata approfondiremo l'aspetto scientifico di questa tecnica mentre sul prossimo numero presenteremo un'apparecchiatura in grado di rilevare e registrare i parametri cardiaci necessari per effettuare diagnosi e

valutazioni. A tale scopo verrà utilizzato un software specifico in grado di fornire importanti informazioni sulla nostra salute e sul nostro stato psicofisico. Al contrario di altre apparecchiature di misurazione che utilizzano particolari e sofisticati sensori, nel nostro caso facciamo uso di una economica fascia toracica trasmettente impiegata di solito nei cardiofrequenzimetri per fitness e di un'apparecchiatura portatile wireless con registrazione dei dati su SD-Card. Col nostro dispositivo è possibile registrare i dati relativi ad intervalli molto brevi (pochi minuti) ma anche a quelli di intere

giornate. Le informazioni registrate su SD-Card possono essere successivamente trasferite su PC dove programmi più o meno complessi (o specifici per un certo tipo di analisi) effettuano l'elaborazione dei dati. Il formato utilizzato è un comune file con estensione txt; al limite il file può essere inviato tramite internet o posta elettronica ad un laboratorio o ad uno specialista per l'analisi ed il responso.

Introduzione all'Heart Rate Variability (HRV)

Noi siamo abituati a considerare sano ed efficiente un cuore che abbia un ritmo "regolare". Al con-

fatto: le "aritmie" sono variazioni macroscopiche del ritmo cardiaco. In presenza di un episodio aritmico, il tempo che passa tra una contrazione cardiaca e l'altra varia in modo apprezzabile rispetto al tempo precedente e a quello successivo. Non è questo il fenomeno che chiamiamo "variabilità del battito cardiaco". La variabilità del battito cardiaco si riferisce a differenze molto piccole tra un battito e l'altro, ma è importantissimo che esse ci siano. Un cuore sano ed efficiente avrà battiti sempre diversi, e saranno tanto più diversi quanto più il cuore è sano e funzionale.

Per meglio spiegarci: anche a riposo

- Il livello della frequenza cardiaca in b/m: all'aumentare dei battiti al minuto, la variabilità diminuisce rapidamente.
- Gli errori comportamentali: droghe, fumo, eccesso di caffè o alcol, insufficienti ore di sonno, stress, affaticamento eccessivo, riducono la variabilità del battito cardiaco.
- La genetica: possiamo nascere con una variabilità più o meno ampia.
- La sedentarietà: ci muoviamo poco e quel poco magari in automobile.
- Le condizioni di salute: diverse patologie sono indagate usando

La Heart Rate Variability (HRV) è una metodica per misurare ed analizzare la variabilità della frequenza cardiaca che sta assumendo una grande importanza in numerosi ambiti applicativi riguardanti, oltre alla cardiologia, anche la psicofisiologia, la psicologia, la psicoterapia, la medicina olistica e la medicina dello sport. Approfondiamo la conoscenza della HRV e realizziamo un semplice dispositivo in grado di rilevare e registrare su SD-Card la distanza esatta fra un battito cardiaco e l'altro. Successivamente un software elaborerà i dati fornendo delle importanti informazioni sul nostro stato psicofisico. Prima puntata.

trario, pensiamo che un cuore abbia qualche problema, più o meno grave, quando il suo ritmo non è regolare: in altre parole quando riscontriamo in esso le cosiddette "aritmie". Non siamo in errore. Solo il cardiologo potrà stabilire se le aritmie ci sono, se sono irrilevanti o se devono esser trattate con un'adeguata terapia. Dobbiamo tuttavia tenere in considerazione un

e con frequenza costante media nel tempo (ad esempio 70 b/m), i tempi che separano i battiti cardiaci sono sempre diversi l'uno dall'altro. Ed è bene che questa variabilità sia ampia. Fattori che influiscono sulla variabilità della frequenza cardiaca sono:

- L'età: purtroppo con il trascorrere degli anni, la variabilità del battito cardiaco si riduce progressivamente.

anche la variabilità della frequenza cardiaca.

Il caos, i frattali e il cuore

La scoperta del caos deterministico in fisica ha prodotto una vera e propria rivoluzione, le cui idee risultano così efficaci per il comportamento di certi sistemi della fisica che si è pensato potessero funzionare da metafora per i fenomeni bio- ➤

logici ed anche per il comportamento e la mente dell'uomo.

Improvvisamente nell'osservazione del mondo, le somiglianze divengono più importanti delle differenze. Il caos è più fondamentale dell'ordine. È la situazione più comune in natura, mentre l'ordine è relativamente raro e può essere facilmente distrutto dalla più piccola perturbazione.

La natura stessa usa il caos come parte integrante del suo programma di evoluzione per risolvere il problema di adattare le forme di vita per la sopravvivenza in un ambiente in continua trasformazione, complesso e apparentemente caotico: ogni schema deterministico sarebbe destinato al fallimento; perciò la natura sceglie di combattere il caos con il caos, generando una moltitudine di forme di vita attraverso le mutazioni casuali.

Nel 1900 il fisiologo francese Charles Richet sosteneva che «l'instabilità è la condizione necessaria della stabilità dell'organismo». In altre parole, il caos è malattia secondo la concezione asclepiadea, ma è una forma di salute dinamica per la concezione igeica. Tra gli infiniti modelli di fiocchi di neve, non esiste un modo per essere fiocco di neve "salubre" o "corretto". Il mare non è malato quando è in burrasca. Nel rapporto tra malattia e salute, il modello di sano equilibrio non è stare ben piantato per terra, ma camminare su una fune da

funambolo, cercando continuamente di adattare e correggere le proprie funzioni psicofisiologiche.

La teoria del caos suggerisce che non si possono sempre prevedere gli effetti a lungo termine delle nostre azioni e che è quindi meglio essere aperti e flessibili. Così come la natura sopravvive grazie alla biodiversità, è fondamentale avere una varietà di idee e approcci; quando si chiude una via, la natura ha molte altre strade tra cui scegliere. Questo dovrebbe insegnare a tutti noi, che un'eccessiva specializzazione porta alla morte.

Fino al 1980 gli specialisti dei diversi settori, erano convinti che i sistemi biologici potessero avere una sola soluzione: tendere verso uno stato di equilibrio e, di conseguenza, la presenza di fluttuazioni disordinate, imprevedibili e caotiche veniva attribuita a cause esterne o patologiche, eccezionali, normalmente assenti; in medicina, ad esempio, si ipotizzavano errori nella recessione del numero di casi di malattia, crisi epilettiche, aritmie cardiache, e così via. Negli anni successivi si è cominciato a ipotizzare che queste variazioni "caotiche" possano essere inerenti ai sistemi, ovvero contenute nei modelli teorici deterministici che descrivono l'evoluzione dei sistemi stessi. Questo nuovo modo di pensare ha portato a risultati inaspettati, in particolar modo nelle scienze mediche.

Molti ricercatori sono convinti che il caos procura al corpo umano una flessibilità che gli permette di rispondere a stimoli diversi. Si considerino ad esempio le proprietà elettrofisiologiche del cuore; come è noto, la funzione fisiologica del cuore è di pompare sangue in tutto il corpo. Perché questo accada, un'eccitazione elettrica, che si origina in zone specializzate del muscolo cardiaco, si diffonde in tutto il miocardio attivando così la

contrazione muscolare. Nel campo della fisiologia cardiaca, recentemente è stato introdotto l'impiego di tecniche di analisi spettrale ed è solo dal 1990 che la dinamica non lineare e la teoria del caos sono state riconosciute come estremamente promettenti ed impiegate in studi cardiologici. Era ora che i medici si svegliassero dal loro torpore e cominciassero ad avvalersi delle scienze fisico-matematiche. Come vedremo, è il normale ritmo cardiaco ad essere caotico e non la fibrillazione. Questa affermazione prende lo spunto teorico dal fatto che il sistema di generazione del ritmo cardiaco è formato da un oscillatore periodico controllato da una molteplicità di meccanismi non lineari (ormoni, sistema simpatico e parasimpatico...).

Si è confrontato, per esempio, lo spettro di frequenza di un elettrocardiogramma di soggetti normali e di soggetti malati di cuore. Si è osservato che gli ECG (ElettroCardioGramma) dei primi presentavano delle irregolarità su scale che vanno da qualche secondo a qualche giorno, mentre quello dei cardiopatici presentavano uno spettro molto più piatto. A dimostrazione, si è osservato che alcune persone molto malate hanno dei battiti cardiaci molto regolari prima del decesso. Infatti il ritmo cardiaco si deve adeguare all'attività dell'organismo (respirazione, attività mentale, ecc.). Questo aggiustamento produce un ritmo irregolare. In alcune malattie il cuore perde la capacità di adattarsi all'attività dell'organismo e perciò presenta un ritmo estremamente periodico; nello stress questo fenomeno è accentuato.

Nelle figure della pagina seguente la frequenza cardiaca viene mostrata in grafici della serie temporali (a sinistra), in spettri di Fourier (al centro) e rappresentazioni nello spazio delle fasi (a destra). Una fre-

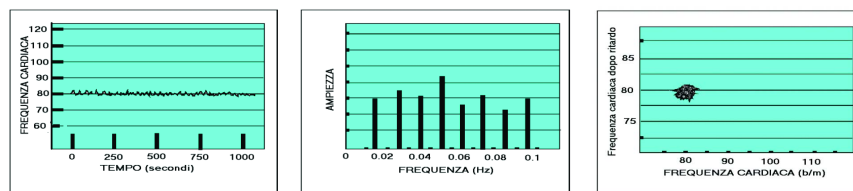


quenza registrata 12 ore prima di un arresto (in alto) è quasi costante: lo spettro è piatto e la traiettoria nello spazio delle fasi fa pensare a un attrattore a punto fisso. Una frequenza che precede di 9 giorni una morte cardiaca improvvisa (al centro) è abbastanza periodica: nello spettro vi è un solo picco e nello spazio delle fasi si ha traiettoria a ciclo limite. La frequenza di un cuore sano (in basso) appare erratica: ha spettro e una traiettoria del tipo ad attrattore strano.

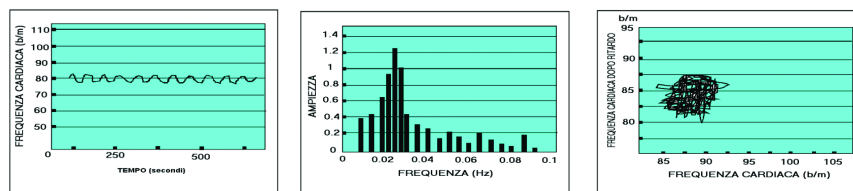
Questa rivoluzione scientifica ci fornisce una lezione di primaria importanza: leggi semplici non sostengono necessariamente comportamenti semplici.

Il cuore, centro funzionale dell'apparato circolatorio, è un muscolo striato involontario dalle dimensioni di una grossa mela che pompa cinque litri di sangue al minuto. Nel cuore le strutture frattali hanno un ruolo vitale nella meccanica della contrazione e nella condizione dello stimolo elettrico eccitatorio, per esempio, una rete frattale d'arterie e vene coronarie trasporta sangue da e verso il cuore. Alcuni studiosi hanno recentemente utilizzato la geometria frattale per spiegare alcune anomalie nelle modalità del flusso sanguigno coronarico, la cui interruzione può causare l'infarto miocardico. Inoltre un intreccio frattale di fibre di tessuto connettivo all'interno del cuore lega le valvole mitrale e tricuspide al muscolo sottostante; se questi tessuti dovessero rompersi, vi sarebbe un forte rigurgito di sangue dai ventricoli agli atri, seguito da insufficienza cardiaca. Infine quest'architettura casuale è evidente anche nelle ramificazioni di certi muscoli cardiaci. Se si ascolta il cuore con un fonendoscopio o si rileva il polso, il ritmo cardiaco sembra essere regolare, per un individuo a riposo l'intensità e la frequenza delle pulsazioni sembrano abbastanza costanti

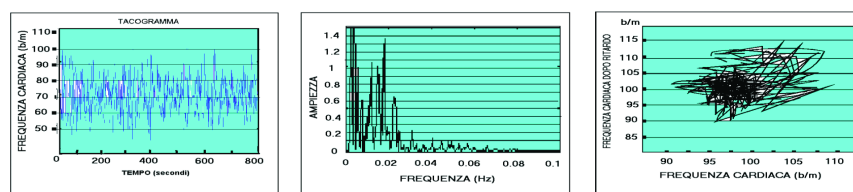
Frequenza cardiaca registra 12 ore prima di un arresto



Frequenza cardiaca che precede di 9 giorni una morte cardiaca



Frequenza cardiaca di un cuore sano

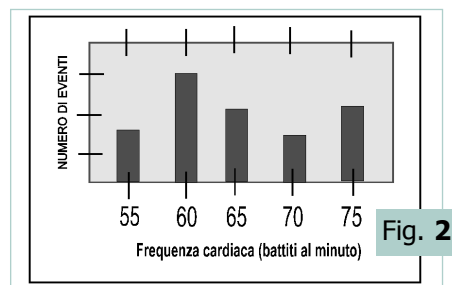
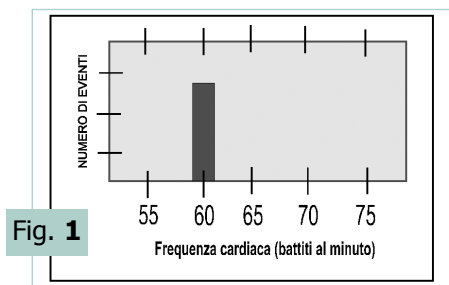


e per questo motivo i cardiologi descrivono ordinariamente la frequenza cardiaca normale come "ritmo sinusale normale".

Un'analisi più attenta rivela che individui sani hanno frequenze cardiache che variano considerevolmente anche a riposo, in giovani adulti sani, la frequenza cardiaca, che in media è circa 60 battiti il minuto, può variare addirittura di 20 battiti il minuto nel giro di pochi secondi; in una giornata la frequenza cardiaca può passare da 40 a 180 battiti il minuto.

Per almeno mezzo secolo i medici hanno interpretato le fluttuazioni della frequenza cardiaca in termini di omeostasi (il mantenimento interno di uno stato stabile, nonostante le variazioni dell'ambiente esterno). I sistemi fisiologici normalmente si comportano in modo da ridurre la variabilità e mantenere costanti le funzioni interne. Secondo questa teoria qualsiasi variabilità fisiologica, inclusa la frequenza cardiaca, dovrebbe ritornare al suo stato stazionario dopo

essere stata perturbata. Il principio dell'omeostasi suggerisce che le variazioni della frequenza cardiaca sono semplicemente risposte transitorie ad un ambiente oscillante; si potrebbe immaginare che nella malattia o nella vecchiaia, l'organismo perda la capacità di mantenere una frequenza cardiaca costante a riposo e che quindi la variabilità aumenti. Ma le cose si presentano altrimenti a chi misuri scrupolosamente i normali intervalli tra battiti cardiaci e li registri in tutto l'arco della giornata e la serie temporale ottenuta sembra irregolare e, a prima vista, completamente casuale. Esaminando però il grafico a differenti scale temporali emergono alcune caratteristiche: se ci si concentra sulla serie temporale relativa all'arco di poche ore, si riscontrano fluttuazioni rapide, le cui escursioni e la cui sequenza sembrano in qualche modo simili a quelle trovate in serie temporali più lunghe; a scale temporali ancora più ristrette (minuti) è possibile osservare fluttuazioni ancora più rapide, che ➤

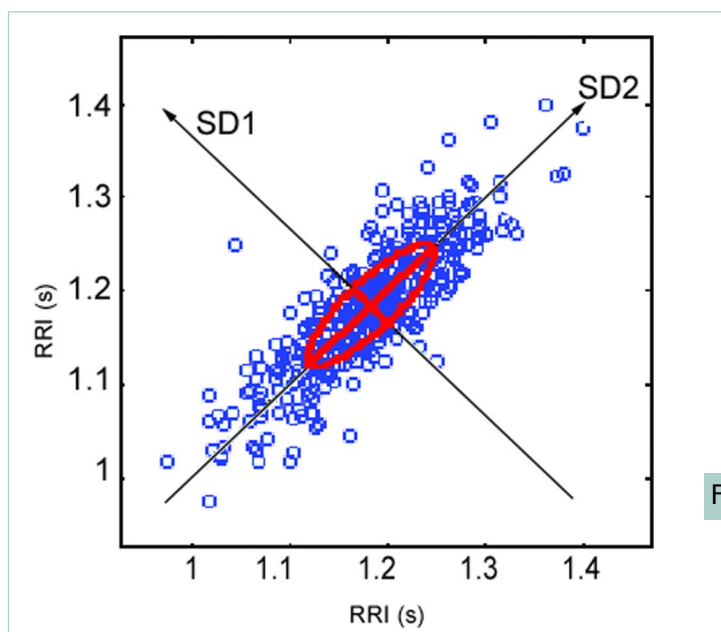


sembrano sempre molto simili all'andamento iniziale. In conclusione le fluttuazioni tra battiti contigui in scale temporali differenti appaiono autosimili, esattamente come le ramificazioni di un frattale geometrico e questo risultato suggerisce che i meccanismi di controllo della frequenza cardiaca possono essere intrinsecamente caotici: in altre parole la frequenza può oscillare considerevolmente, anche in assenza di stimoli esterni fluttuanti, anziché portarsi ad un omeostatico stato stazionario. Un metodo per stabilire se le variazioni nella frequenza cardiaca siano caotiche o periodiche è quello di calcolare lo spettro di Fourier della serie temporale. Lo spettro di Fourier di una forma d'onda qualsiasi (come una serie temporale) rivela la presenza di componenti periodiche, se una serie temporale mostra una frequenza cardiaca di un battito esatto al secondo, lo spettro relativo sarebbe costituito da un unico picco situato alla frequenza di 1 Hz (Fig 1). D'altra parte, una serie temporale di battiti cardiaci caotici dovrebbe generare uno spettro costituito sia da picchi alti, sia da altri picchi non meglio connotati; in realtà l'analisi spettrale della frequenza cardiaca normale mostra un ampio spettro che ricorda una situazione caotica. (Fig 2).

Un altro strumento per analizzare le dinamiche dei sistemi complessi non lineari è la rappresentazione nello spazio delle fasi o spazio degli stati: questa tecnica segue i valori delle variabili indipendenti che cambiano nel tempo. Il gran nume-

ro di variabili indipendenti presenti in molti sistemi complessi le rende non immediatamente identificabili e misurabili, per tali sistemi la rappresentazione nello spazio delle fasi può essere realizzata usando il metodo delle delay maps (Fig. 3). In essa l'ascissa d'ogni punto corrisponde al valore di una variabile in un certo istante, mentre l'ordinata crea il valore della stessa variabile dopo un ritardo costante; una serie di questi punti in tempi successivi delinea una curva o traiettoria che descrive l'evoluzione del sistema. Per identificare il tipo di sistema dinamico, caotico o periodico, si determinano le traiettorie per differenti condizioni iniziali e successivamente si cerca un attrattore, una regione dello spazio delle fasi che attrae le traiettorie. Il tipo più semplice d'attrattore è il punto fisso, che descrive un sistema il quale evolve sempre verso il singolo

stato, in questo spazio delle fasi vicino all'attrattore al punto fisso, tutte le traiettorie convergono verso quel singolo punto. Una forma più complicata d'attrattore è il ciclo limite, che corrisponde ad un sistema il quale evolve verso uno stato periodico; nello spazio delle fasi vicino a questo ciclo limite le traiettorie seguono un percorso regolare che può essere circolare o ellittico. Altri attrattori definiti "strani", descrivono sistemi che non sono né statici né periodici; nello spazio delle fasi vicino questo attrattore, due traiettorie che presentano condizioni iniziali in concreto identiche e divergono rapidamente e su lunghe distanze temporali divengono molto differenti: un sistema di questo tipo è detto caotico. Numerosi studi hanno analizzato la rappresentazione dello spazio delle fasi per il battito cardiaco normale e i risultati mostrano un comportamento più simile ad un attrattore strano che non ad un attrattore periodico, caratteristico di un processo realmente regolare. Queste osservazioni concordano con le indagini cliniche che hanno dimostrato come la dinamica di un battito cardiaco normale possa essere caotica. Il meccanismo responsabi-



le di una variabilità caotica nella frequenza cardiaca dell'individuo sano, nasce probabilmente nel sistema nervoso. Il nodo senoatriale (il pacemaker naturale del cuore), vale a dire una piccola zona in cui sono localizzate alcune cellule che, contraendosi leggermente prima delle altre, innescano le contrazioni in tutto il muscolo cardiaco, riceve il segnale dalla parte involontaria del sistema nervoso, detto autonomo. Questo, a sua volta, ha due componenti: il sistema parasimpatico e quello simpatico; la stimolazione parasimpatica diminuisce la frequenza di scarico delle cellule del nodo senoatriale, mentre una stimolazione simpatica ha l'effetto opposto; queste due componenti agiscono come un continuo tiro alla fune sul pacemaker. Le fluttuazioni della frequenza cardiaca nei soggetti sani sono il risultato di questo continuo alternarsi di stimoli.

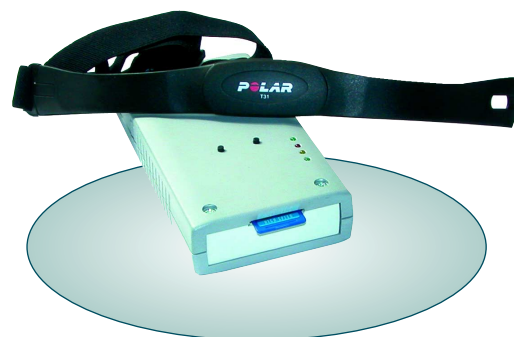
Molte patologie mostrano un aumento di periodicità e una diminuzione di variabilità. Le prime indicazioni del fatto che perfino il cuore sul punto di fermarsi può comportarsi con periodicità, vengono dall'analisi di Fourier su forme d'onda di elettrocardiogrammi durante tachicardia parossistica o fibrillazione ventricolare, ritmi molto rapidi che assai frequentemente portano all'arresto cardiaco: l'attività di fibrillazione all'interno del cuore è un fenomeno molto più periodico di quanto si ritenesse. Uno studio retrospettivo sugli elettrocardiogrammi di persone che avevano avuto gravi patologie cardiache ha permesso di scoprire che la frequenza cardiaca di tali pazienti spesso diventava meno variabile del normale in un momento qualsiasi, da minuti a mesi, prima della morte per arresto cardiaco. Numerosi altri ricercatori sono arrivati alla stessa conclusione: Kleiger e collaboratori hanno dimostrato per la prima volta come i pazienti

con una deviazione standard della frequenza del battito cardiaco inferiore a 50 ms, presentino un rischio di morte quattro volte superiore rispetto ai soggetti con valori superiori ai 100 ms. Questo valore prognostico risultava, in questo studio, indipendente da quello della frazione di elezione e della presenza d'aritmie ventricolari. Questi dati sono stati successivamente confermati in diversi altri studi clinici.

In certi casi la variabilità globale della frequenza era ridotta, in altri comparivano oscillazioni periodiche della frequenza che poi s'interrompevano improvvisamente. In modo quasi identico il sistema nervoso può mostrare perdita di variabilità e insorgenza di periodicità patologiche in disordini come l'epilessia, il morbo di Parkinson e la sindrome maniaco-depressiva; in particolar modo nel caso in cui l'organismo sia attaccato dallo stress, sia psicologico che fisiologico.

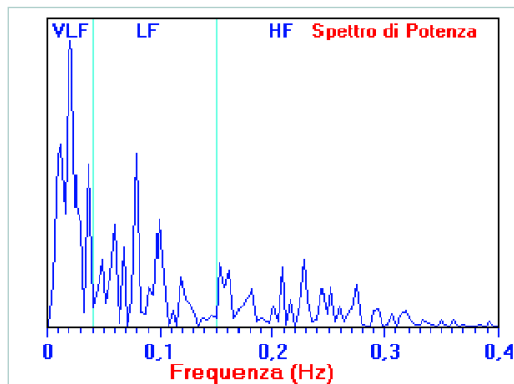
Il sistema cardiovascolare è caratterizzato da una complessa rete d'afferenze localizzate a livello dei vasi, del muscolo cardiaco, scheletrico e dei polmoni, che permettono un continuo controllo dei parametri biochimici ed emodinamici. Il controllo è affidato al sistema nervoso autonomo che attraverso le due componenti simpatica e parasimpatica risponde a ciascuna seppur lieve modificazione dell'apparato cardiovascolare, con una reazione di segno contrario volta a mantenere l'omeostasi del sistema. La variabilità dei cicli cardiaci dipende dalla continua modificazione del controllo autonomo battito-battito della funzione del nodo del seno in risposta a variazioni chimiche e pressorie. Esiste una variabilità della frequenza cardiaca dovuta alla componente oscillatoria ed in particolare alle variazioni sincrone con il respiro e con il tono vasomotore ed esiste una variabilità circadiana associata alle variazioni del ciclo

cardiaco in risposta all'attività fisica, allo stato di sonno o di veglia. Come abbiamo già riferito, la frequenza cardiaca può essere precisata come il numero medio di battiti cardiaci al minuto. Questo numero per esempio, 70 b/m, è solo un valore medio, perché in realtà il tempo che intercorre fra un battito cardiaco e l'altro non è costante, ma cambia in continuazione. La Heart Rate Variability (HRV) è una metodologia per misurare ed analizzare la variabilità della frequenza cardiaca e sta assumendo una grande importanza, in quanto da queste misure, è possibile dedurre molte informazioni, per esempio si può valutare il



rischio di aritmie cardiache e di infarto, ed anche il bilanciamento dell'attività fra il sistema nervoso Simpatico e Parasimpatico. La HRV è nata all'origine nell'ambito della cardiologia ma numerosi studi scientifici negli ultimi anni hanno mostrato la sua importanza come indicatore attendibile anche in altri ambiti applicativi riguardanti per esempio, la psicologia, la psichiatria, la psicoterapia, la medicina olistica e la medicina dello sport, ed il numero di campi applicativi sta crescendo continuamente. Gli studi clinici pubblicati sulla HRV hanno infatti riguardato i seguenti argomenti:

- Cardiologia
- Ipnosi
- Ansia
- Stress
- Psichiatria



VLF (Very Low Frequency) frequenze comprese fra 0.01 e 0.04 Hz. La banda VLF è dovuta in parte all'attività del sistema Nervoso Simpatico ed è influenzata dalle preoccupazioni e dallo stress.

LF (Low Frequency) frequenze comprese fra 0.04 e 0.15 Hz. La banda LF viene considerata principalmente dovuta all'attività del Sistema Nervoso Simpatico e all'attività di regolazione dei barocettori.

HF (High Frequency) frequenze comprese fra 0.15 e 0.4 Hz. la banda HF viene considerata espressione dell'attività del Sistema Nervoso Parasimpatico. Questa banda di frequenze subisce una elevata influenza da parte del ritmo e profondità della respirazione.

- Terapie psicologiche
- Asma
- Gravidanza
- Diabete
- Sovrallenamento dello sportivo

Dal 1980 a oggi, sono circa 2130 le pubblicazioni al riguardo dell'HRV, e gli scienziati del nostro Paese sono i più numerosi.

La HRV è la naturale variabilità della frequenza cardiaca in risposta a fattori quali il ritmo del respiro, gli stati emozionali, lo stato di ansia, stress, rabbia, rilassamento, pensieri, etc. In un cuore sano, la frequenza cardiaca risponde velocemente a tutti questi fattori, modificandosi a seconda della situazione, per meglio far adattare l'organismo alle diverse esigenze cui l'ambiente continuamente ci sottopone. In generale un individuo sano mostra un buon grado di variabilità della frequenza cardiaca, cioè un buon grado di adattabilità psicofisica alle diverse situazioni. La HRV è correlata alla interazione fra il Sistema Nervoso Simpatico e Parasimpatico. In particolare, il Sistema nervoso Simpatico, quando viene attivato, produce una serie di effetti quali l'accelerazione del battito cardiaco, la dilatazione dei bronchi, l'aumento della pressione arteriosa, la vasocostrizione periferica, la dilatazione pupillare, l'aumento della sudorazione. I mediatori chimici di queste risposte vegetative sono la noradrenalina, l'adrenalina, la corticotropina, e diversi corticosteroidi. Il sistema

Simpatico è la normale risposta dell'organismo a una situazione di allarme, lotta, stress. Al contrario, il Sistema Nervoso Parasimpatico (chiamato anche Attività Vagale), quando viene attivato produce un rallentamento del ritmo cardiaco, un aumento del tono muscolare bronchiale, dilatazione dei vasi sanguigni, diminuzione della pressione, rallentamento della respirazione, aumento del rilassamento muscolare, il respiro diventa più calmo e profondo, i genitali, mani e piedi diventano più caldi. Esso agisce attraverso il tipico mediatore chimico acetilcolina. Il Sistema Parasimpatico rappresenta la normale risposta dell'organismo ad una situazione di calma, riposo, tranquillità ed assenza di pericoli e stress. Il nostro corpo, in ogni momento, si trova in una situazione determinata dall'equilibrio o dalla predominanza di uno di questi due sistemi nervosi. La capacità dell'organismo di modificare il proprio bilanciamento verso uno o l'altro sistema, è molto importante ed è un meccanismo fondamentale che tende all'equilibrio dinamico dell'organismo sia dal punto di vista fisiologico che psicologico. Da ciò la grande importanza di avere oggi uno strumento scientifico come la HRV in grado di valutare lo stato relativo del sistema nervoso Simpatico e Parasimpatico.

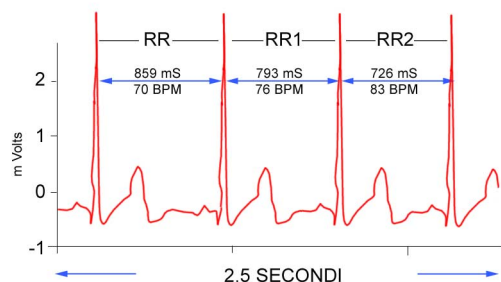
Mediante l'analisi di Fourier, qualunque segnale, per quanto irregolare, può essere scomposto in una

somma di funzioni cosinusoidi di diverso periodo e fase. Lo spettro di potenza è una rappresentazione sintetica delle cosinusoidi che compongono il segnale. Lo spettro di frequenza di una singola funzione cosinusoidale appare come un picco unico di grand'altezza (tutta la potenza del segnale è concentrata in una sola frequenza). Se facciamo una similitudine con il sistema auditivo, una singola cosinusoidale può essere considerata come l'analogo di un suono puro, ad esempio quello di un diapason. Lo spettro di frequenza di un rumore bianco, ad esempio il suono proveniente da un televisore al termine delle trasmissioni, è completamente piatto: questo rumore è chiamato rumore bianco ed è caratterizzato dalla presenza di tutte le frequenze possibili (udibili e non).

L'analisi dinamica del battito cardiaco

La fondazione sperimentale della dinamica e la definizione di alcuni dei concetti fondamentali della descrizione dinamica dei fenomeni come il concetto di velocità e accelerazione risalgono al lavoro di Galileo, mentre la definitiva fondazione di una trattazione matematica dei fenomeni dinamici inizia da Newton.

Non è un caso che la nascita della scienza moderna si faccia coincidere con la fondazione sperimentale e quantitativa dei concetti della dinamica: infatti, la possibilità di una



L'intervallo RR è definito come la distanza intercorrente fra due picchi consecutivi del grafico EGG. la sequenza temporale che ci è servita per indagare le caratteristiche statiche e dinamiche, non è altro che la sequenza dei valori numerici associati alla lunghezza di tali intervalli. Ogni intervallo RR corrisponde quindi al tempo intercorrente fra due battiti cardiaci consecutivi.

descrizione temporale dei processi naturali è stata sempre identificata come il marchio caratteristico dell'impresa scientifica.

La dinamica quantitativa ha risolto con grande successo, nei suoi primi tre secoli di esistenza, problemi che si riferivano a dei componenti piuttosto semplici come il movimento oscillatorio di un pendolo o le orbite dei pianeti attorno al sole. Per questi fenomeni gli scienziati hanno fornito delle descrizioni matematiche sommamente chiare ed eleganti che garantivano una capacità previsionale quasi assoluta. Altri fenomeni naturali sono sfuggiti per secoli ai tentativi di una descrizione dinamica esauriente per il loro carattere irregolare e quindi difficilmente prevedibile. Esempi di questi fenomeni sono le turbolenze dell'idrodinamica (in medicina i vortici che si creano nella circolazione sanguigna), il tempo atmosferico, ma anche la semplice interazione gravitazionale quando i corpi interessati ad interazioni non trascurabili siano più di due. Quasi tutti i sistemi di interesse biomedico ricadono in questa categoria di sostanziale imprevedibilità e questo è uno dei motivi che spiegano l'ancora scarsa matematizzazione delle scienze della vita. Ciononostante la scienza medica ha sempre avuto uno stretto rapporto con le descrizioni dinamiche: le malattie vengono descritte in termini di "decorso", cioè di andamento temporale, ed il riconoscimento di uno stato patolo-

gico viene risolto in una "prognosi" in una previsione cioè della velocità del raggiungimento di uno stato stabile (indipendente dal tempo) positivo (guarigione) o negativo (morte). Fondamentale importanza ha ugualmente rivestito l'approccio dinamico allo studio della fisiologia: lo sviluppo dell'organismo dalle fasi embrionali alla vecchiaia e alla morte è stata una delle linee principali di sistematizzazione della conoscenza biomedica.

È indubbio, infine, che l'analisi dei segnali biologici variabili nel tempo come l'elettrocardiogramma o l'elettroencefalogramma costituiscono una insostituibile sorgente di informazione sullo stato fisiopatologico dei sistemi cardiocircolatorio e nervoso.

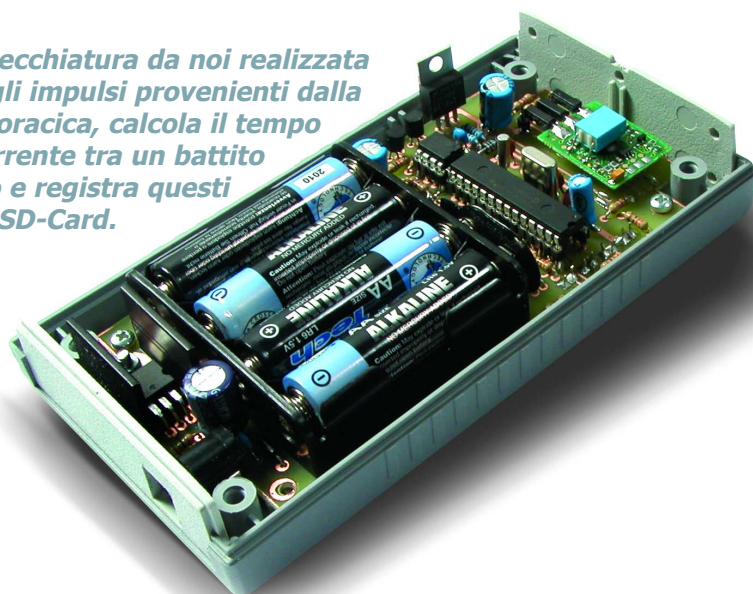
Fino a circa il 1980 l'informazione che i medici utilizzavano dalle

sequenze di battiti cardiaci (RR) era solo la loro media su intervalli più o meno lunghi. Questa informazione era collegata a stati piuttosto macroscopici come l'affaticamento, la febbre, l'emozione e così via. Gran parte dell'informazione del segnale costituito dalla sequenza degli intervalli RR era dunque inutilizzata, trascurandone i due seguenti aspetti fondamentali:

- la variabilità dell'intervallo RR, cioè il fatto che, nonostante la definibilità di una frequenza media, gli intervalli RR non sono tutti uguali;
- l'esistenza di leggi temporali (dinamiche) che organizzano questa variabilità differenziandola dal rumore di fondo.

La questione dell'esistenza e della forma della variabilità dell'intervallo RR non è di poco conto in quan- ➤

L'apparecchiatura da noi realizzata riceve gli impulsi provenienti dalla fascia toracica, calcola il tempo intercorrente tra un battito e l'altro e registra questi dati su SD-Card.



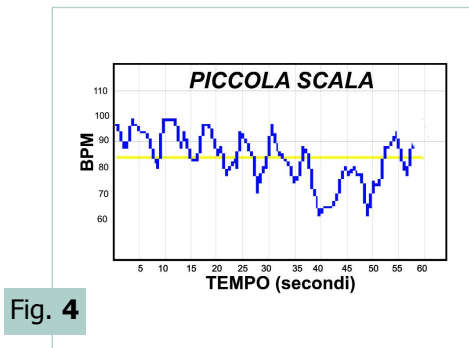


Fig. 4

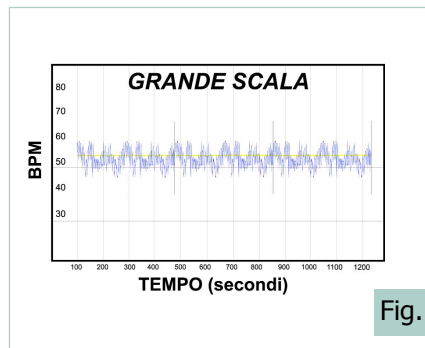


Fig. 5

to la regolazione della frequenza cardiaca si sa da molto tempo essere un crocevia di numerosi sistemi di controllo fisiologico operanti a molteplici scale di tempo: dal semplice respiro a complesse influenze ormonali, al controllo autonomo messo in opera dai sistemi simpatico e parasimpatico. La complessità dei sistemi di controllo della frequenza cardiaca è conseguente alla necessità di “mappare” con efficienza un ambiente mutevole da parte dell’organismo. Il primo aspetto ad essere stato preso in considerazione dai ricercatori è stato il più ovvio e semplice da misurare: la quantità media di variabilità presente in una sequenza di RR misurata dalla deviazione standard. SD (Standard Deviation) della sequenza RR era molto semplice da misurare ed è stata dimostrata essere un indice predittivo di importanti stati fisiologici (analisi dello spazio degli stati) così come le differenze di base (analisi dello spazio dei

sistemi). Notevole è l’assunto che l’infarto è preceduto da una brusca riduzione di SD: l’invecchiamento provoca una lieve ma significativa riduzione della SD così come il sovrallenamento nello sportivo, degli intervalli RR dell’EGC misurato a riposo. Il passo successivo al calcolo della media, ovvero la considerazione della SD, aveva permesso di ottenere informazioni importanti. Il passo ancora successivo fu quello di studiare la distribuzione della variabilità stessa, se cioè le deviazioni della media degli intervalli RR avessero delle lunghezze caratteristiche ed identificabili. Lo strumento per ottenere questo scopo è sotto l’analisi di Fourier della variabilità degli intervalli RR: qui basti dire che l’analisi consente di esprimere la sequenza degli intervalli RR come una somma (composizione) di andamenti regolari con differenti frequenze (periodicità). Di queste differenti frequenze si calcola il peso relativo

nella determinazione del segnale in studio e la distribuzione di pesi è detta “spettro del segnale”. L’analisi spettrale è un passaggio importantissimo che introduce a quello che avevamo indicato come il secondo aspetto dell’informazione portata dal segnale RR: l’individuazione di eventuali regolarità nella variabilità. Non è ancora però, a rigor di termini, un’analisi di tipo compiutamente dinamico. Le regolarità del segnale vengono infatti estratte mediando da un campione che si giudica insieme rappresentativo e corrispondente ad una situazione stazionaria: in altre parole si suppone che nell’intervallo di campionamento il sistema non muti il suo stato fisiologico e che quindi sia lecito considerare le caratteristiche spettrali invarianti. Per i sistemi viventi la caratteristica di stazionarietà è piuttosto difficile da ottenere ed in ogni caso è molto importante poter analizzare quantitativamente situazioni che per definizione non sono stazionarie come ad esempio l’evoluzione di un’ischemia. Nel seguito vedremo come importanti informazioni biologiche possano essere ricavate dall’applicazione della sequenza RR di tecniche che non presuppongono la stazionarietà del segnale come le metodiche di analisi multivariata.

Immaginiamo di voler studiare un processo governato dalla seguente legge funzionale:

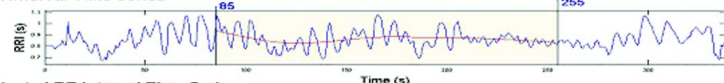
$$Y = 0,01 * x + \text{sen}(10 * x)$$

Come si può apprezzare dalla formula, la funzione è scomponibile in un primo termine lineare ($0,01 * x$) ed in un termine periodico ($\text{sen}(10 * x)$).

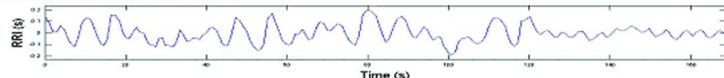
Se realizziamo un grafico della funzione nella piccola scala di variabilità ($0 < x < 2$) risulta evidente solo il carattere oscillante del processo (Fig 4); la stessa funzione graficata sulla grande scala di variabilità ($0 < x < 200$) ci appare essenzialmente come lineare (Fig. 5). Lo stesso



RR Interval Time Series



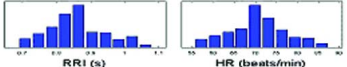
Selected RR Interval Time Series



Time Domain Results

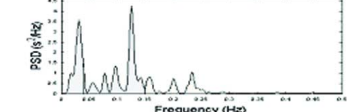
Variable	Units	Value
Statistical Measures		
Mean RR*	(s)	0.868
STD	(s)	0.076
Mean HR*	(1/min)	70.58
STD	(1/min)	6.54
RMSSD	(ms)	53.3
NN50	(count)	52
pNN50	(%)	28.4
Geometric Measures		
RR triangular index		0.110
TINN	(ms)	310.0

Distributions*



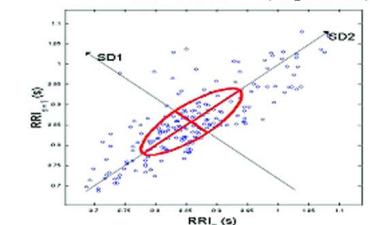
Frequency Domain Results

Non Parametric Spectrum (FFT)

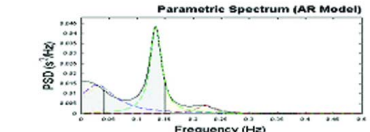


Frequency Band	Peak (Hz)	Power (ms ²)	Power (%)
VLF	0.0313	61	29.7
LF	0.1250	95	49.1
HF	0.2324	37	21.2
LF/HF		2,321	

Poincare Plot* SD1 = 38.0 ms (Short-term HRV) SD2 = 111.5 ms (Long-term HRV)



Parametric Spectrum (AR Model)



Frequency Band	Peak (Hz)	Power (ms ²)	Power (%)	Power (n.u.)
VLF	0.0293	969	34.3	86.0
LF	0.1328	1631	57.9	
HF	0.2248	222	7.8	11.7
LF/HF		7,365		

11-Feb-2006 - HRV Analysis Software v1.1

*Results are calculated from the non-detrended selected RRI signal.

The Biomedical Signal Analysis Group
Department of Applied Physics
University of Kuopio, Finland

I dati (in formato txt) memorizzati sulla SD-Card vengono successivamente trasferiti su un PC dove un apposito programma li elabora. Esistono differenti programmi a seconda del campo di applicazione del test. I programmi più complessi (come quello a lato) forniscono una serie di grafici di facile interpretazione, anche se solo uno specialista può effettuare una valutazione completa dei risultati, in considerazione anche della patologia del paziente.

processo, studiato a due differenti ordini di grandezza ci appare molto differente. La conoscenza dell'espressione fa sì che ci si possa rendere conto del perché di questa differenza, ma se si fosse trattato di risultati empirici, non avendo a disposizione alcun modello funzionale, le cose sarebbero state più problematiche. Un esperimento o una misura condotta alla piccola scala di variabilità, avrebbe fornito nel migliore dei casi, l'idea di una relazione oscillante (o nel caso di uno scarso campionamento, dell'assenza di relazione tra le due variabili); un esperimento o una misura condotto sulla grande scala, avrebbe fatto propendere per una relazione lineare fra le stesse variabili. In entrambe i casi l'estrapolazione diretta della conoscenza ricavata da una scala ad un'altra, avrebbe tratto in inganno. È da notare che questo comportamento deriva dalla presenza di termini non-lineari (l'oscillatore sinusoidale). Un esempio classico di questo tipo in fisiologia è costituito dall'andamento circadiano delle secrezioni endocrine

(oscillatore) sovrapposto all'effetto dello sviluppo della stessa oscillazione (trend lineare). Spesso nel mondo fisico si possono trascurare le interazioni che avvengono a scale molto diverse da quelle del processo in studio per concentrarsi su un'unica scala caratteristica. Ad esempio, se ci interessa la scala molecolare, il legame idrogeno fra due molecole d'acqua in un bicchiere avrà le stesse caratteristiche tra due molecole d'acqua nell'oceano, mentre il fenomeno delle maree (scala macroscopica e interazione gravitazionale) avrà enorme rilevanza per la dinamica dell'oceano e praticamente nulla per l'acqua del bicchiere. Nei sistemi biologici individuare una sola scala rilevante per la comprensione di un fenomeno è più difficile: eventi a livello molecolare possono influenzare il comportamento di un intero organismo e allo stesso modo dinamiche nell'ordine dei millisecondi, come quelle legate alla conduzione nervosa, sono intimamente connesse con processi che si svolgono nell'ordine dei mesi, come l'apprendi-

mento, o negli anni come la senescenza. Non prendere in considerazione la molteplicità delle scale di grandezza coinvolte nello stesso fenomeno, può dar luogo a gravi errori di valutazione. Ricordiamo il motto coniato anni addietro da Franco Missoli, che ormai è diventato un tormentone negli ambienti scientifici: "... misurare per conoscere, conoscere per decidere ...". Concludiamo qui la descrizione della HRV: torneremo sull'interpretazione dei dati registrati in fase di descrizione del software utilizzato per l'elaborazione delle informazioni. Sul prossimo numero analizzeremo in dettaglio l'apparecchiatura da noi messa a punto per la registrazione delle sequenze RR presentando schema elettrico, piano di montaggio e firmware del microcontrollore che gestisce l'intera apparecchiatura.

*Dott. Franco Missoli
AIFM Associazione Italiana di
Fisica Medica
AIM Associazione Informatica
Medica*