

Nunzio Lanotte Sophie Lem Sportivi ad alta tecnologia

La scienza che aiuta a costruire i campioni

Chiavi di lettura a cura di
Federico Tibone e Lisa Vozza

indice

<i>Introduzione</i>	5
1. L'allenamento dei campioni	9
2. Il ciclismo: ora e sempre, pedalare	41
3. Il nuoto, uno sport a parte	79
4. Il calcio, sport e spettacolo	113
5. Lo sci: dove la tecnologia fa la differenza	141
<i>Epilogo: Uno sguardo allo sport di domani</i>	175
<i>Ringraziamenti</i>	184
<i>Per saperne di più</i>	186
9 miti da sfatare	188
Forse non sapevi che...	192
<i>Fonti delle immagini</i>	196
<i>Indice analitico</i>	198

Introduzione

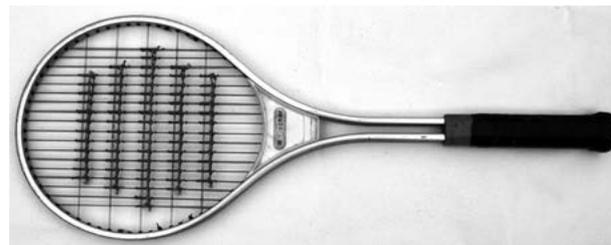
A Eric Sabino

Correva l'anno 1977. Il tennista argentino Guillermo Vilas era in una condizione di forma strepitosa. Aveva vinto il Roland Garros, l'US Open e altri tornei, mettendo a segno una striscia di ben 46 vittorie consecutive, un record mai più battuto fino ai giorni nostri.

Nel torneo di Aix-en-Provence Vilas era arrivato in finale senza difficoltà, ed era già pronto alla vittoria numero 47. Ma lo aspettava un'amara sorpresa.

L'avversario era il rumeno Ilie Năstase, celebre per la sua eccentricità e per gli scherzi che organizzava, non meno che per lo straordinario talento.

In quell'occasione Năstase si presentò in campo con una racchetta dalla stranissima incordatura, che passerà poi alla storia dello sport come «incordatura spaghetti».



Frutto degli esperimenti del tedesco Werner Fischer, questa incordatura prevedeva una serie di rinforzi e nodi che conferivano alla palla effetti imprevedibili, in grado di disorientare anche il tennista più esperto.

Grazie a quest'arma segreta Năstase vinse i primi due set, e portò Vilas a un tale livello di esasperazione da indurlo all'abbandono del match.

L'aneddoto è divertente, ma potrebbe essere fuorviante: è molto raro infatti che in campo sportivo la tecnologia si presenti come l'asso nella manica risolutivo, il missile in miniatura uscito dal laboratorio di Q che salva James Bond dalle grinfie del cattivo di turno. Si tratta invece di un esercizio quotidiano e faticoso, proprio come l'allenamento.

Tecnologia significa scegliere i materiali migliori, testarli, raccogliere dati, selezionare quelli importanti, interpretarli. In questo senso si può dire che è l'esatto contrario del doping, a cui talvolta è erroneamente accostata. Il doping è una (fraudolenta) scorciatoia: chi assume sostanze proibite per migliorare le proprie prestazioni non ha certo bisogno di mettersi a fare lunghe analisi biomeccaniche o test in vasca idrodinamica.

Uno scienziato che se ne intende ha detto: «È molto difficile che la tecnologia ti faccia vincere, ma non avere la tecnologia di sicuro ti fa perdere».

Per restare in ambito tennistico, non è certo la racchetta in fibra di carbonio a far vincere un torneo a Rafael Nadal, ma provate voi a giocare contro Federer con una racchetta di legno e poi ne riparlamo.

Nessuna tecnologia, foss'anche la più avanzata, potrà mai sostituire i tre ingredienti indispensabili per vincere nello sport: il talento dell'atleta, l'intelligenza dell'allenatore e le lunghe ore di fatica dell'allenamento.

Nessuna attrezzatura potrà mai trasformare un brocco in Usain Bolt, Michael Phelps o Lindsey Vonn. Tuttavia nello sport ad alto livello non esistono brocchi: ci sono soltanto atleti straordinari in competizione tra loro, e spesso la differenza tra la gloria di Olimpia e l'anonimato si misura in centimetri o in centesimi – talvolta millesimi – di secondo.

È ben noto che c'è tanta tecnologia dietro le vittorie in sport come la Formula 1, il Moto GP o la Coppa America di vela. Meno conosciuto è il fatto che nello sci, nel nuoto o nel ciclismo, per citare soltanto alcuni esempi, ne è entrata ormai quasi altrettanta. In realtà questo processo è in atto da molti anni. Non soltanto la qualità delle attrezzature – racchette, bici, sci, scarpe, imbarcazioni – ha fatto passi da gigante, ma tecnici e atleti hanno a disposizione una quantità enorme di dispositivi di misura della prestazione (metabolometri, cicloergometri, gallerie del vento, programmi software, telecamere speciali e altri ancora).

Esaminare a uno a uno tutti gli sport olimpici, per descrivere nel dettaglio le tecnologie che utilizzano, richiederebbe un libro assai più voluminoso di questo. Abbiamo perciò deciso di iniziare con argomenti di carattere generale, i cui principi si applicano a quasi tutte le discipline, e poi di approfondire lo studio di quattro particolari sport.

Ciclismo, nuoto, calcio e sci: li abbiamo scelti non soltanto per l'elevato contenuto tecnologico, ma perché presi insieme permettono di coprire la maggior parte dei filoni di ricerca e sviluppo presenti nell'odierna tecnologia sportiva. Così per esempio parleremo dell'uso del GPS in relazione al calcio, ben sapendo che questo strumento è utilizzato in molti altri sport, dal canottaggio all'equitazione.

Alla fine del libro cercheremo di immaginare come sarà l'atleta del futuro e daremo qualche consiglio ai giovani lettori che desiderano approfondire questi temi e magari farne un oggetto di studio e lavoro per il loro avvenire.

L'allenamento dei campioni

*Se non puoi misurarlo,
non puoi migliorarlo.*

Lord Kelvin

Lisa Nordén ha perso l'oro nel triathlon ai Giochi di Londra 2012 per 2 centesimi di secondo; Milorad Čavić è arrivato secondo nei 100 delfino a Pechino 2008 per 1 centesimo; nelle stesse Olimpiadi, Josefa Idem ha perso l'oro nel K1 500 m per 4 *millesimi* di secondo.

Nello sport ad alto livello, può succedere di allenarsi 5–6 ore al giorno per quattro anni, e poi di vedere il proprio sogno infranto per meno di un battito di ciglia. Per questo motivo durante l'allenamento ogni gesto, ogni singola parte della prestazione viene isolata, studiata e misurata: la partenza del nuotatore, la spinta dei bobbisti, l'ultimo appoggio del saltatore. Tutto deve essere perfetto se si vuole vincere.

Ma un atleta non è una macchina, un meccanismo capace di erogare il 100% del proprio potenziale a richiesta, in un qualsiasi momento dell'anno. La misteriosa alchimia di fattori fisiologici e psicologici che gli sportivi chiamano «forma» può raggiungere il livello massimo magari soltanto una volta nella vi-

ta di un campione. Una prestazione eccezionale due mesi prima delle Olimpiadi o dei Mondiali non serve a nulla: il massimo della forma deve coincidere con il giorno X, anzi con l'ora Y di quel giorno.

È questo a rendere così difficile il compito dell'allenatore, e così affascinante la scienza dell'allenamento. L'allenamento di un atleta «da medaglia» è un'avventura pianificata nei minimi dettagli lungo i quattro anni che separano un'Olimpiade dalla successiva, e finalizzata a sprigionarne tutto il talento in una singola gara, che può durare anche soltanto 10 secondi.

In questo capitolo vedremo come la *valutazione funzionale*, cioè la misura dei parametri che «fotografano» la condizione dell'atleta, sia parte integrante dell'allenamento di alto livello. Esamineremo il funzionamento dei sistemi di misura impiegati e conosceremo da vicino alcuni di quei parametri-chiave.

La valutazione funzionale

Per valutazione funzionale si intende la misura di certi parametri fisiologici o meccanici che la teoria dell'allenamento individua come fondamentali per il raggiungimento della performance. Questi parametri sono naturalmente molto diversi per un marciatore, una schermitrice e un canottiere, ma ogni sport ne prevede un certo numero.

Lo staff tecnico – composto generalmente da allenatore e medico, e in molti casi anche da un biomeccanico e da un esperto di statistica – li individua

e stabilisce un calendario di verifiche che forniscano periodicamente indicazioni sullo stato di forma dell'atleta.

Questi dati, conservati su supporto informatico ed analizzati da software specifici, costituiscono la «fotografia» dell'efficacia dell'allenamento e la base per eventuali aggiustamenti (aumento, diminuzione o cambiamento dei carichi di lavoro).

Il ciclo di verifica e regolazione può essere raffigurato come un anello chiuso (figura 1): i parametri indicativi dello stato di forma vengono misurati, e gli allenamenti vengono eventualmente modificati (regolazione) in base a queste misure.

In molti sport ciò che fa di un atleta un campione è soprattutto la *tecnica*, un insieme complesso di co-



Figura 1. L'anello di allenamento e valutazione: l'allenatore prepara un programma di allenamento; l'atleta affronta periodicamente test di valutazione funzionale; i risultati sono analizzati dallo staff tecnico, che può apportare modifiche al programma iniziale al fine di raggiungere la migliore performance nel periodo delle gare più importanti.

ordinazione neuromuscolare, reazione all'imprevisto, capacità di decidere rapidamente una strategia.

In questo libro descriveremo vari metodi utilizzati dagli allenatori per osservare e migliorare la tecnica dei loro atleti, soprattutto attraverso l'uso di riprese video e di software speciali. Se però prescindiamo dai fattori legati alla tecnica, possiamo dire che praticamente tutti gli sport sono basati su una combinazione di tre ingredienti fondamentali: la *forza*, la *velocità* e le *capacità metaboliche*, che per il momento riassumeremo per semplicità con la parola *resistenza*.

Ogni sport richiede un dosaggio diverso di questi ingredienti: la marcia è quasi pura resistenza, il sollevamento pesi quasi pura forza, il salto con l'asta

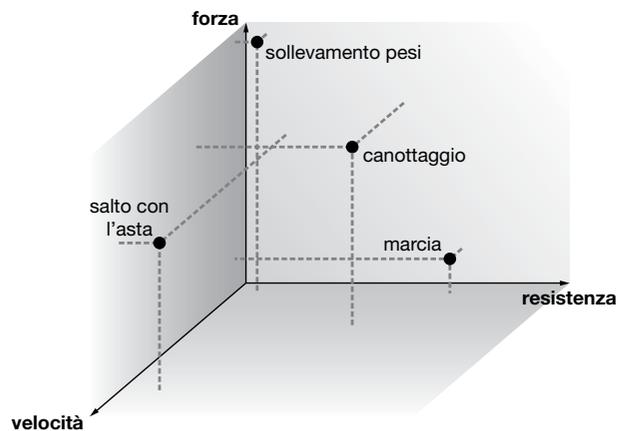


Figura 2. La posizione di alcuni sport sul diagramma forza-resistenza-velocità.

forza più velocità, e così via; ma in sostanza la valutazione funzionale può essere ricondotta a una misura di questi tre fattori e delle loro combinazioni.

Prima di esaminare da vicino questi fattori, dobbiamo però capire in che modo li si può misurare.

I sistemi di misura

Tutti i sistemi di misura di cui parleremo sono basati su microcontrollori o MCU (*microcontroller unit*), dispositivi elettronici miniaturizzati che contengono un processore (CPU, *central processing unit*), un orologio (*clock*), vari tipi di memorie e varie interfacce di comunicazione con l'esterno (I/O).

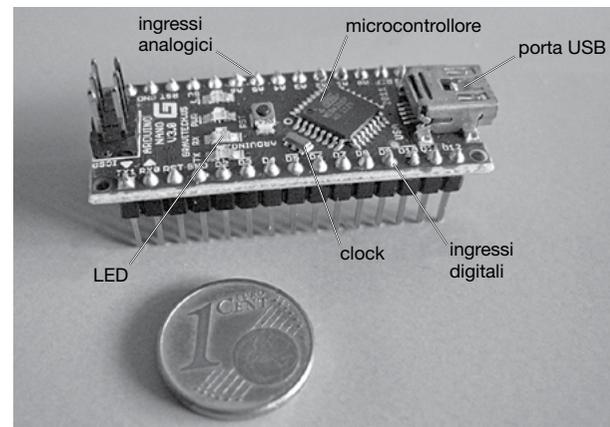


Figura 3. Una scheda elettronica su cui è montato un microcontrollore insieme a interfacce di comunicazione.

Il microcontrollore è montato insieme ad altri componenti su schede elettroniche (chiamate anche *DAQ board*), come nella figura 3. Costituisce così un vero e proprio computer, piccolissimo e specializzato nel compiere soltanto alcuni tipi di operazioni.

Le caratteristiche che definiscono un microcontrollore sono la potenza di calcolo, le dimensioni della memoria, il numero di interfacce di comunicazione (o ingressi) e la loro natura (analogica o digitale), il numero di bit.

La miniaturizzazione e la caduta del prezzo di questi componenti elettronici hanno contribuito alla diffusione della tecnologia in ambito sportivo, come del resto è accaduto in tutti gli altri settori della società.

Soltanto trent'anni fa un sistema di acquisizione dati per uso sportivo aveva le dimensioni di un armadio. Oggi una potenza di calcolo molto superiore può stare tranquillamente in uno smartphone del peso di pochi grammi.

Una MCU è in grado di gestire rapidamente enormi quantità di informazioni, di immagazzinarle in uno spazio molto ridotto e di comunicarle all'esterno, generalmente a un personal computer, secondo lo schema della figura 4.

Dal momento che una CPU può elaborare soltanto informazioni che riceve sotto forma di segnale elettrico digitale, nelle misurazioni si usano per prima cosa *trasduttori* o *sensori*, cioè dispositivi che trasformano la grandezza fisica da misurare – per esempio una forza, una temperatura o un'accelerazione – in una differenza di potenziale elettrico.

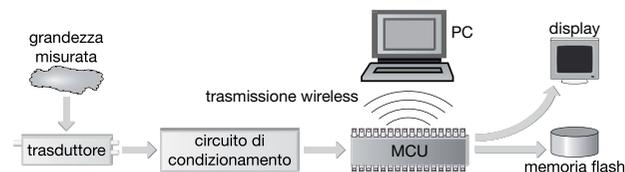


Figura 4. Gli elementi principali di un sistema di misura.

Se il segnale è troppo debole o sporcato da disturbi esterni, viene poi amplificato e filtrato tramite il *condizionamento del segnale*.

L'*amplificatore* è un dispositivo che riceve in ingresso un segnale e produce in uscita lo stesso segnale moltiplicato per un fattore detto guadagno (naturalmente, se il segnale in ingresso è disturbato da rumore e interferenze, questi disturbi si ritroveranno, amplificati, anche in uscita).

Il segnale amplificato è trattato con un *filtro*, un circuito elettronico che permette di eliminare le parti di un segnale che non sono di interesse e che dipendono da fenomeni estranei alla misura effettuata, come le vibrazioni o le interferenze elettromagnetiche. Molto utilizzati sono i filtri passa-basso, che rendono il segnale più «liscio» eliminando le alte frequenze.

In campo sportivo un esempio classico di questo tipo di condizionamento del segnale è l'EMG o elettromiografia di superficie, un procedimento adottato comunemente per misurare l'attività dei muscoli durante lo sforzo. Si basa sull'acquisizione di segnali

provenienti dai muscoli per mezzo di elettrodi (generalmente tre) applicati alla pelle. L'elettromiografia consente per esempio di verificare se un arto infortunato ha recuperato tutta la sua funzionalità dopo la rieducazione.

La stessa tecnica consente anche di identificare quali muscoli entrano in azione, e in quale ordine, quando l'atleta compie un movimento complesso.

Il segnale elettrico generato dal muscolo è assai debole, con ampiezza dell'ordine del millivolt; è



Figura 5. Sopra: elettrodi per l'elettromiografia senza fili. Sotto: elettrodi classici applicati al braccio di uno schermatore; l'amplificatore e il filtro sono all'interno della cartuccia visibile in basso.

dunque necessario amplificarlo immediatamente, per evitare l'accumulo di disturbi durante il trasferimento verso il microcontrollore. Inoltre, siccome la frequenza di interesse è compresa tra 50 e 400 Hz, si usa un filtro passa-banda, che lascia passare soltanto le frequenze comprese fra questi due valori.

In questa fase si tratta ancora di un segnale analogico, ossia di una tensione il cui valore varia con continuità tra un massimo e un minimo che dipendono dal tipo di trasduttore (com'è noto *Natura non facit saltus*: per passare da un valore a un altro, grandezze come una forza o una temperatura attraversano tutti i livelli intermedi).

Il processore però non può trattare segnali analogici, perché è formato da una serie di «microinterruttori» elettrici che prevedono soltanto due possibili valori: 0 se l'interruttore è aperto, 1 se è chiuso. Prima dell'elaborazione i valori misurati vanno dunque espressi come sequenze di 0 e di 1, in formato binario.

La trasformazione da segnale analogico a digitale avviene tramite una serie di operazioni. La prima è il *campionamento*: a intervalli regolari si legge il valore del segnale e lo si mantiene costante per il successivo intervallo di tempo, come nella figura 6a.

Naturalmente tutte le variazioni del segnale analogico comprese tra due istanti di campionamento vanno perse in questo processo. Perciò, più piccolo è l'intervallo di campionamento – e quindi più elevata la *frequenza di campionamento* – migliore sarà la corrispondenza tra il segnale analogico e la sequenza campionata.

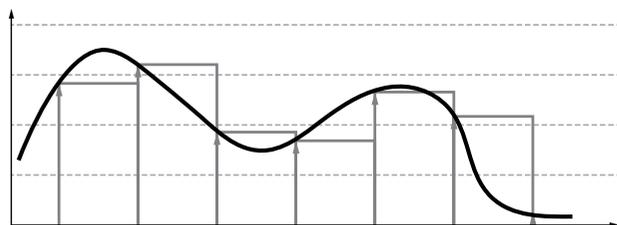


Figura 6a. Un esempio di campionamento di un segnale analogico.

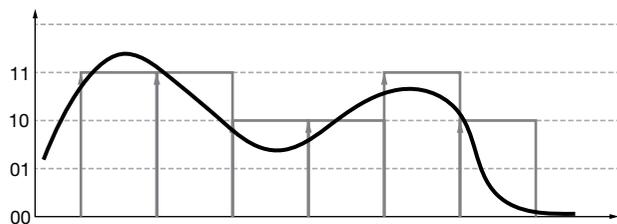


Figura 6b. Questo segnale analogico è stato quantizzato e ricondotto a soli quattro valori: 00, 01, 10, 11.

Si opera poi la *quantizzazione*: ogni valore della sequenza campionata viene riportato al valore più vicino compatibile con il numero di interruttori (cioè bit) impiegati.

Nel caso ipotetico di due soli bit, il segnale può assumere soltanto quattro valori, come mostra la figura 6b: tutti e due aperti (00), primo aperto e secondo chiuso (01), primo chiuso e secondo aperto (10), tutti e due chiusi (11). Se il numero di bit è più elevato, l'errore di quantizzazione è più piccolo.

A questo punto il segnale analogico è stato trasformato in una sequenza di numeri – nel nostro caso: 11, 11, 10, 10, 11, 10 – ed è pronto per essere trattato dal processore. Quest'ultimo, il vero cuore del microcontrollore, è in grado di eseguire operazioni matematiche sui dati acquisiti, di scriverli su una memoria e/o di trasmetterli all'esterno attraverso una porta di comunicazione, via cavo o in modalità wireless.

La comunicazione tra i trasduttori e il microcontrollore, o *telemetria*, può avvenire anch'essa senza fili. In questo caso però a ogni trasduttore è abbinato un minuscolo microcontrollore, con batteria e trasmettitore, capace di elaborare autonomamente il segnale, di convertirlo in forma digitale e di trasmetterlo all'unità centrale. Nei prossimi capitoli vedremo alcuni esempi di questo tipo di struttura, chiamata *wireless sensor network* o WSN.

Le misure fisiologiche nello sport

Ogni sport è diverso dagli altri e possiede caratteristiche che lo rendono unico. Per questo motivo è rarissimo trovare atleti che raggiungano i massimi livelli in più di una disciplina. Tuttavia gli studiosi si sono resi conto che esistono «famiglie» di sport che presentano somiglianze quanto al tipo di impegno che richiedono agli atleti.

Non sempre questa divisione in famiglie è intuitiva: lo sci di fondo per esempio assomiglia più alla maratona che alla discesa libera, e i tuffi sono più

simili alla ginnastica che al nuoto. Queste differenze ed affinità sono legate al modo in cui l'organismo dell'atleta funziona durante lo sforzo.

Alla base di qualsiasi movimento umano c'è la contrazione dei muscoli, che dal punto di vista chimico si basa su una molecola chiamata ATP (adenosina trifosfato). Il processo di scomposizione e ricostituzione dell'ATP è molto complesso, ma per ciò che ci interessa basterà dire che esistono tre tipi di metabolismo diversi:

metabolismo anaerobico alattacido: serve esclusivamente per gli sforzi brevissimi, con una durata massima di 10–15 secondi; è il tipo di sforzo compiuto per esempio da un centometrista, da un saltatore o da un portiere nel calcio;

metabolismo anaerobico lattacido: è utilizzato negli sforzi intensi ma relativamente brevi, di durata compresa tra i 20 e i 45 secondi; implica la formazione e l'accumulo nei muscoli di un sale, il lattato, la cui concentrazione dà un'idea dell'intensità dello sforzo; il quattrocentista è un classico utilizzatore di questo metabolismo;

metabolismo aerobico: è quello che prevale negli sforzi di durata superiore ai 4–5 minuti; per funzionare necessita dell'immissione nell'organismo di una grande quantità di ossigeno attraverso la respirazione; sport come lo sci di fondo o la marcia si basano quasi esclusivamente su questo metabolismo.

Si possono paragonare questi tre tipi di metabolismo a tre combustibili usati per i motori d'automobile: rispettivamente l'alcol, la benzina e il gasolio.

Naturalmente nella grande maggioranza degli sport i diversi tipi di metabolismo, in particolare il

secondo e il terzo, coesistono. Pensiamo per esempio al ciclismo, sport tipicamente aerobico ma che può comportare accelerazioni molto intense in occasione di sprint e fughe. O al rugby, con l'alternarsi degli scatti, delle mischie e di fasi di recupero. È un po' come se il veicolo umano avesse a bordo tre serbatoi, e funzionasse a seconda delle circostanze con una miscela formata prevalentemente di alcol, di benzina o di gasolio.

VO₂max, il segno del campione

Valutare le capacità metaboliche significa quindi considerare un insieme piuttosto complesso di fenomeni che si verificano in conseguenza degli sforzi a cui è sottoposto l'atleta.

A seconda del tipo di sport, medici ed allenatori puntano la propria attenzione sull'efficienza del metabolismo aerobico, sulla transizione dal metabolismo aerobico a quello anaerobico, sull'accumulazione di lattato e così via.

Di tutti i parametri metabolici, il più celebre e studiato è probabilmente il massimo consumo di ossigeno, indicato con il simbolo VO₂max. Si tratta della massima quantità di ossigeno che l'organismo riesce a consumare nell'unità di tempo; lo si misura in litri al minuto, o in ml/kg/min se lo si considera in relazione alla massa corporea dell'atleta.

Il VO₂max è considerato dagli scienziati il miglior indicatore della capacità di un atleta di eccellere nel-

le specialità aerobiche come la maratona, il ciclismo o lo sci di fondo. Un giovane uomo non allenato ha in media un $VO_2\max$ di circa 45 ml/kg/min, una giovane donna di circa 38 ml/kg/min. I campioni dello sport, tuttavia, raggiungono valori molto superiori: i migliori corridori sulle lunghe distanze hanno $VO_2\max$ di 85 ml/kg/min, ed esistono rarissimi casi di atleti che superano i 90 ml/kg/min. Il più alto valore mai registrato appartiene allo sciatore di fondo norvegese Bjørn Dæhlie, vincitore di otto ori olimpici, con 96 ml/kg/min.

Il valore del $VO_2\max$ dipende quasi completamente dalle doti innate dell'atleta, e l'allenamento può aumentarlo soltanto in misura limitata. Quello che in effetti l'atleta riesce a fare, allenandosi, è andare più forte consumando la stessa quantità di ossigeno o – per dirla più correttamente – diminuendo il proprio costo energetico.

Il metabolimetro

I dispositivi utilizzati per misurare il $VO_2\max$, il costo energetico e altri parametri simili prendono il nome di *metabolimetri*. Questi congegni fanno in pratica per gli atleti ciò che gli analizzatori dei gas di scarico fanno per le automobili.

Un metabolimetro è formato da una maschera con un boccaglio, simile a quella utilizzata dai piloti di caccia, e da un'unità di acquisizione dei dati. Grazie alla progressiva miniaturizzazione dei compo-



Figura 7. Un canottiere che si allena indossando un metabolimetro portatile.

nenti oggi i metabolimetri possono essere indossati dall'atleta durante l'esercizio e trasmettere i dati in tempo reale in modalità wireless, come nell'esempio della figura 7.

All'interno della maschera è contenuta una piccola turbina detta *flussometro*: ruotando genera un segnale elettrico di tensione proporzionale alla velocità di rotazione, a sua volta proporzionale alla quantità d'aria che passa nel tubo. Nell'unità centrale sono invece collocati i misuratori della concentrazione di diossido di carbonio (o anidride carbonica, CO_2) e di ossigeno (O_2).

Le quantità di ossigeno e di CO_2 espirate sono uguali finché l'atleta sfrutta il meccanismo aerobico,

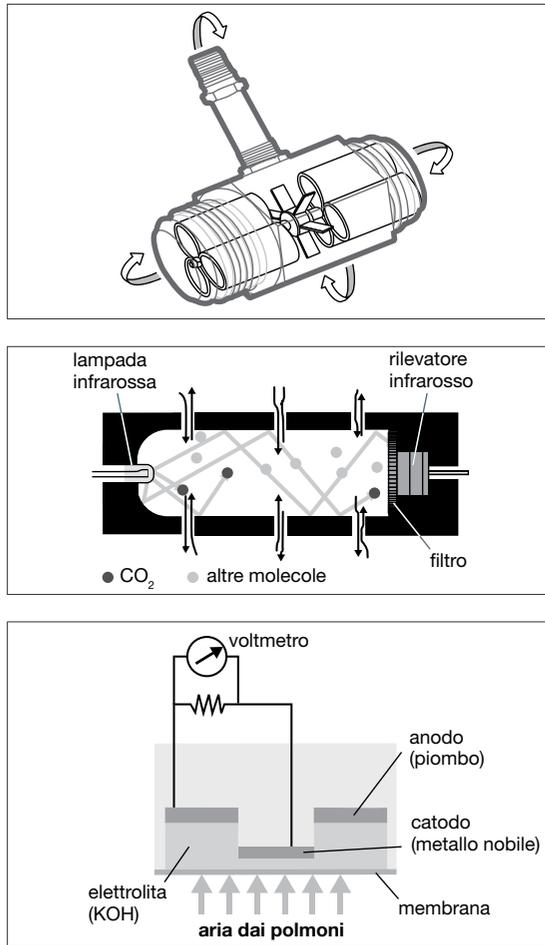


Figura 8. Dall'alto: la turbina per la misurazione del flusso d'aria, il principio di funzionamento del trasduttore di concentrazione di CO_2 e uno schema della cella galvanica per misurare la concentrazione di O_2 .

che trasforma l'ossigeno in diossido di carbonio. Quando l'intensità dello sforzo aumenta, la quantità di CO_2 aumenta più velocemente di quella di ossigeno: è entrato in azione il meccanismo anaerobico, che produce diossido di carbonio senza apporto esterno di ossigeno.

Per misurare la quantità di CO_2 si utilizza la tecnologia NDIR (*Non-Dispersive InfraRed*), illustrata dal disegno centrale della figura 8.

In una camera stagna sono presenti un emettitore ed un rilevatore di raggi infrarossi. L'aria proveniente dai polmoni attraversa la camera. La CO_2 ha la proprietà di assorbire i raggi infrarossi, quindi se la concentrazione di CO_2 è maggiore, sarà minore la quantità di raggi infrarossi che, dopo aver attraversato un filtro, raggiunge il rilevatore. Il rilevatore fornisce una tensione che è proporzionale all'intensità di raggi infrarossi ricevuta, e il segnale viene inviato al microcontrollore.

Per misurare la concentrazione di O_2 si usa invece una cella galvanica a combustibile, schematizzata in basso nella figura 8. Si tratta di una sorta di piccola pila con anodo di piombo e catodo di metallo nobile (rame, argento o oro), e idrossido di potassio come elettrolita. Una parte dell'ossigeno contenuto nell'aria emessa dai polmoni attraversa una membrana ed entra nella cella, dove provoca una reazione di ossidoriduzione: l'elettrodo di piombo cede elettroni al circuito esterno, dove si genera una corrente elettrica che attraversa una resistenza esterna ai capi, della quale si misura la tensione. Quanto maggiore è la

concentrazione di O_2 , tanto maggiore sarà la corrente e quindi la tensione.

Generalmente al metabolimetro è abbinato un *cardiofrequenzimetro*, strumento di cui parleremo tra poco. In questo modo i principali indicatori del funzionamento del sistema cardiaco e polmonare sono monitorati e visualizzati in tempo reale su un PC.

Il lattato, un indicatore dell'intensità dello sforzo

Il metabolimetro, anche nella sua versione portatile, è uno strumento relativamente costoso, interferisce con l'azione dell'atleta e il suo uso richiede una certa competenza.

Un'indicazione più immediata dell'intensità dello sforzo si può ottenere con l'aiuto di un apparecchio che misura la concentrazione di lattato nel sangue, il *lattacidometro*.

Il lattato, un sale dell'acido lattico, è prodotto dal meccanismo anaerobico in quantità proporzionale alla durata e all'intensità dell'esercizio. Alla fine di una seduta di allenamento il medico preleva all'atleta una minuscola quantità di sangue, generalmente da un dito o dal lobo dell'orecchio. Il campione prelevato è poi applicato su una strisciolina che viene inserita nell'apparecchio (figura 9): la concentrazione di lattato nel sangue appare sullo schermo dopo circa un minuto.

Il test seguente, destinato ai maratoneti, ci fa capire l'importanza di questa misurazione. L'atleta



Figura 9. Un lattacidometro con un campione di sangue.

corre una serie di ripetute a velocità crescente sui 2000 metri; alla fine di ogni ripetuta si effettua un prelievo. Si trova così che la concentrazione di lattato rimane costante fino a una certa velocità X , poi aumenta. Se ne può allora concludere che X è la velocità massima a cui l'atleta può correre la maratona: a velocità superiori entra infatti in gioco il meccanismo anaerobico, che è insostenibile per una gara di oltre due ore.

Il funzionamento del lattacidometro si basa su una complessa reazione chimica capace di generare una debole corrente elettrica, che viene acquisita e misurata. Si tratta di uno strumento non particolarmente accurato, ma molto diffuso in ragione della sua grande semplicità d'uso.

Il cardiofrequenzimetro

A parte il cronometro, il cardiofrequenzimetro è sicuramente lo strumento di misura più diffuso in campo sportivo. La frequenza cardiaca è infatti un parametro di facile comprensione e di grande importanza, perché legato tra l'altro al passaggio dal metabolismo aerobico a quello anaerobico.

Molti programmi di allenamento sono ormai basati non sulla velocità o sulla distanza (come «percorrere 15 km a 4' al km») bensì sul mantenere per un certo tempo la frequenza cardiaca attorno a un dato valore, per esempio 145 battiti al minuto. Questo consente di dosare esattamente l'impegno dell'atleta indipendentemente da fattori atmosferici, di altitudine o di stato di forma.

I cardiofrequenzimetri oggi costano poche decine di euro. Quelli più diffusi sono formati da una fascia da indossare attorno al torace e da un'unità principale contenuta dentro un orologio da polso, il cui display mostra in tempo reale il valore della frequenza cardiaca e lo registra su una memoria. Alla fine dell'allenamento l'atleta può scaricare i dati su PC e visualizzarli in forma grafica.

La misurazione non richiede un trasduttore: basta un semplice elettrodo, visto che si rileva direttamente l'attività elettrica del miocardio.

La tensione misurata è molto debole, dell'ordine dei microvolt, e dev'essere dunque amplificata. Il segnale viene elaborato dal microcontrollore e inviato all'unità da polso.

La forza

Quando si parla di *forza* in relazione allo sport, viene immediato pensare a discipline come il sollevamento pesi, la lotta o il rugby. Ma la forza può essere definita come la capacità di mettere un corpo in movimento, e tutti gli sport prevedono corpi in movimento; non deve sorprendere dunque che allenamenti specifici per la forza, generalmente svolti in

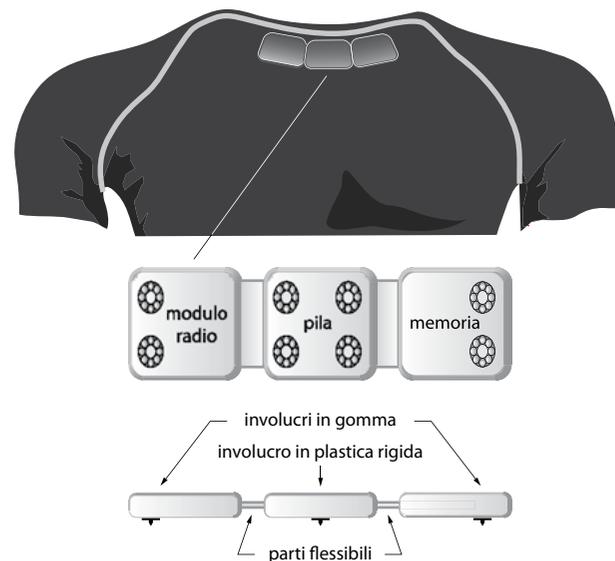


Figura 10. Un prototipo di cardiofrequenzimetro inserito nel colletto di una maglia. Lo strumento è formato da una pila, un microcontrollore con memoria miniaturizzata e un trasmettitore. Gli elettrodi sono integrati direttamente nel tessuto. L'unità centrale può raccogliere in tempo reale i segnali inviati da tutti i giocatori di una squadra.

palestra, facciano parte della preparazione di quasi tutti gli sportivi.

Per misurare la forza di un atleta, il procedimento più semplice consiste nel fargli sollevare pesi. Si tratta tuttavia di un metodo che presenta poco interesse, perché la forza che conta veramente è quella sviluppata compiendo un gesto tecnico come lanciare un giavellotto o spingere un bob. La forza richiesta a un sollevatore di pesi non è la stessa di un pugile o di un ginnasta.

La misura della forza si effettua generalmente in modo indiretto: l'atleta agisce su un oggetto che sotto la sua azione si deforma, la deformazione viene misurata e da essa si risale alla forza applicata grazie alla legge di Hooke, secondo cui sforzo e deformazione sono proporzionali. Ci sono diversi trasduttori capaci di trasformare una deformazione in un segnale elettrico; i più diffusi sono le *celle di carico* (ne parleremo nel capitolo sul nuoto) e gli *strain gauge* o *estensimetri*.

L'estensimetro è un trasduttore analogico formato da una resistenza elettrica applicata su un foglio sottile che può essere incollato su un oggetto con un adesivo speciale. Il filo che costituisce la resistenza è ripiegato molte volte fino a occupare una superficie rettangolare. Questo consente di avere una lunghezza di filo L ragguardevole con un ingombrato ridotto.

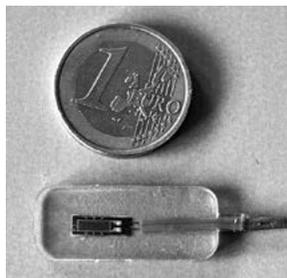


Figura 11. Un estensimetro.

In base alla seconda legge di Ohm, la resistenza elettrica R del filo è proporzionale a L e inversamente proporzionale alla sua sezione s : $R \propto L/s$.

Quando l'estensimetro si deforma, perciò, la sua resistenza cambia. Se l'applicazione della forza allunga lo strain gauge, la lunghezza L del filo elettrico aumenta mentre diminuisce la sua sezione, e R aumenta. Viceversa, se lo strain gauge si accorcia, la sezione s aumenta mentre L diminuisce, e R diminuisce.

La resistenza R è collegata ad altre tre resistenze mediante un circuito detto *ponte di Wheatstone*. All'inizio le quattro resistenze sono uguali e la tensione d'uscita è nulla. Quando R cambia (mentre le altre resistenze rimangono costanti) il ponte esce dalla condizione di equilibrio e la tensione d'uscita cambia.

La figura 12 mostra un esempio di utilizzo degli estensimetri. Una pagaia da kayak è equipaggiata con quattro speciali strain gauge impermeabili, disposti a ponte di Wheatstone. Durante il passaggio in acqua della pala di destra la pagaia si flette, deformando gli strain gauge corrispondenti (quello dalla

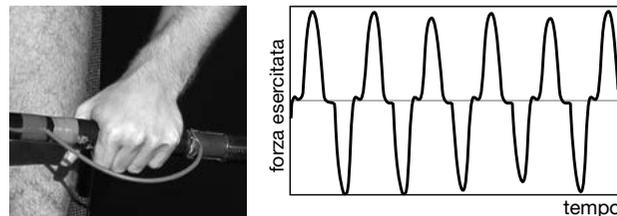


Figura 12. Una pagaia equipaggiata con strain gauge e il grafico della forza esercitata sull'acqua dal canoista.

parte concava si allunga, quello dalla parte convessa si accorcia); i due strain gauge di sinistra rimangono invece indeformati. L'opposto succede poi durante il colpo di pala a sinistra.

Il segnale che si ottiene è molto simile a una sinusoidale: l'ampiezza rappresenta la forza impressa dall'atleta e la frequenza il numero di colpi al minuto. Nella figura 12 le curve sopra lo zero sono i colpi della pala destra, quelle sotto lo zero i colpi della pala sinistra.

La velocità

La velocità è forse il parametro più importante nello sport, ma è anche uno dei più sfuggenti e difficili da misurare. Quasi sempre la si deduce dalla misura dell'intervallo di tempo impiegato per percorrere una distanza nota, ma in questo modo si ottiene una velocità *media*. Spesso invece ai tecnici serve una misura più precisa: un esempio classico è quello della velocità nei primi tre passi di uno sprinter, spesso decisivi nelle gare sui 60 o sui 100 metri.

La velocità *istantanea*, in linguaggio matematico, è la derivata dello spazio rispetto al tempo, oppure l'integrale dell'accelerazione, sempre rispetto al tempo. E in effetti la quasi totalità delle misure di velocità si effettua misurando la distanza percorsa in tanti istanti diversi e poi derivando, oppure misurando l'accelerazione e poi integrando. Queste operazioni sono compiute dal microcontrollore oppure

dal PC su cui i dati vengono acquisiti, e in generale comportano un errore che è tanto più piccolo quanto più elevata è la frequenza di campionamento.

Tra i sistemi più diffusi per misurare una distanza con grande accuratezza c'è l'*encoder ottico* illustrato dalla figura 13.

L'encoder è un trasduttore digitale utilizzato per misurare spostamenti angolari o lineari. Su un asse rotante è montato un disco che ha sulla periferia due corone forate. Una sorgente infrarossa emette luce verso il disco; soltanto quando il raggio incontra un foro, lo attraversa e va a eccitare un fototransistor che genera un impulso elettrico. Si produce quindi un treno di impulsi per ognuna delle due corone; lo sfalsamento tra i loro fori permette di individuare il senso di rotazione. Un circuito nel processore conta gli impulsi e ricostruisce così l'angolo di rotazione in funzione del tempo, permettendo di calcolare la

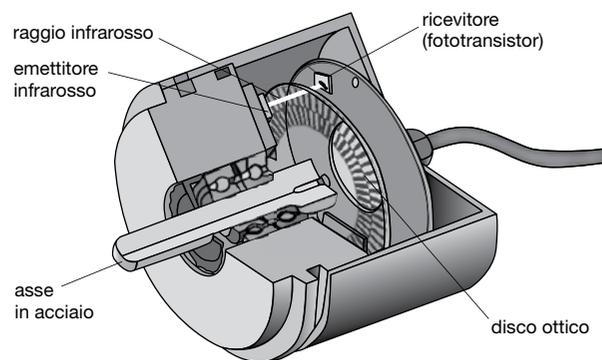


Figura 13. Spaccato di un encoder ottico.

velocità angolare del disco. Quanto più elevato è il numero di fori sulla corona, tanto migliore è l'accuratezza del trasduttore.

Con l'encoder si possono misurare anche le velocità di movimenti lineari, anziché rotatori; in questo caso c'è però l'inconveniente di dover agganciare l'atleta a un filo, con una molla di richiamo.

In alternativa si può usare il GPS (che però non funziona al chiuso, e ha un'accuratezza non sufficiente per misurazioni fini) oppure un *accelerometro*, cioè un sensore che misura l'accelerazione del corpo cui viene applicato.

Abbiamo già detto che la miniaturizzazione e il crollo del costo dei microprocessori sono i fattori che hanno reso alcune tecnologie utilizzabili in campo sportivo; un discorso analogo vale per i sensori. Gli accelerometri utilizzati per applicazioni in campo sportivo fanno parte della famiglia dei MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*). Si tratta di veri e propri meccanismi microscopici: non includono soltanto transistor e componenti elettronici, come i microprocessori, ma anche minuscole leve, ruote, molle, perfino ingranaggi con dimensioni di pochi centesimi di millimetro.

In un accelerometro di tipo MEMS, per esempio, una piccolissima massa mobile è montata su zampette flessibili (figura 14). Quando il sensore è sottoposto a un'accelerazione la massa si sposta, avvicinandosi o allontanandosi da un'altra serie di zampette, che invece rimane fissa rispetto al «telaio» del sensore. La variazione di distanza fa variare

la capacità di un condensatore, generando così un segnale elettrico che è poi amplificato e inviato a un microprocessore.

Una struttura e un funzionamento simili caratterizzano anche i *giroscopi*, che misurano la velocità di rotazione.

Unendo in uno stesso strumento accelerometri e giroscopi si ottiene una *piattaforma inerziale*, capace di misurare in ogni istante posizione, velocità e accelerazione dell'oggetto o dell'atleta a cui è applicata; ne ripareremo nel capitolo dedicato allo sci.

Il limite principale di questi strumenti è che sono sistemi «a riferimento interno»: per ottenere misure di spostamento e velocità rispetto a un riferimento esterno fisso (come una pista o una vasca) bisogna

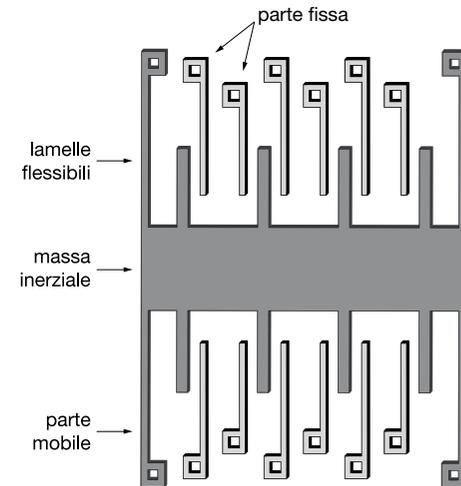


Figura 14. Un accelerometro di tipo MEMS.

elaborare i dati con calcoli matematici che provocano rapidamente l'accumulo di errori non trascurabili (un effetto che in inglese si chiama *drift*, «deriva») e quindi una stima sempre meno corretta. Per questo motivo accelerometri e giroscopi sono spesso abbinati a ricevitori GPS, che misurano in modo autonomo la posizione e la velocità rispetto alla superficie terrestre.

La potenza

La potenza è data dal prodotto della forza di un atleta per la sua velocità. Si tratta di un parametro molto importante: alcune discipline, come il bob o il lancio del peso, richiedono all'atleta di sviluppare una potenza elevatissima per un tempo molto breve; altre invece, come il ciclismo, necessitano di una potenza più bassa ma erogata per un periodo molto lungo.

Tanto per dare un'idea, la potenza di picco di un campione può superare i 1500 W, ovvero i due cavalli vapore (questa unità di misura, pari a circa 735 W, risale ai primordi della Rivoluzione industriale, quando l'utilità di una macchina a vapore era calcolata in base al numero di quadrupedi che poteva rimpiazzare, e al conseguente risparmio di fieno e avena).

Dobbiamo dunque credere che uno di questi atleti sia più potente di una coppia di cavalli da tiro? In realtà non è così. Valori di potenza così elevati possono essere raggiunti dall'uomo soltanto per pochi secondi, mentre 735 W è una stima della potenza media

che un cavallo può fornire *durante tutta una giornata* di lavoro di dieci ore. Il valore massimo per questi animali è in realtà di circa 15 CV, ossia più di 11 kW, ma può essere mantenuto per periodi molto brevi.

In ogni caso, la potenza sviluppabile da un atleta dipende dall'attrezzatura utilizzata nella sua disciplina. Per esempio, durante l'ascensione di un colle impegnativo del Giro d'Italia, come il Gavia o il Mortirolo, i migliori ciclisti arrivano a sviluppare 400 W per un periodo di oltre 20 minuti. Ma la bicicletta è un amplificatore del rendimento della macchina umana: un marciatore non potrebbe mai produrre una potenza simile.

Lo stesso discorso vale per le imbarcazioni: nel canottaggio le leve più lunghe, la presenza di un punto di appoggio e l'uso dei muscoli delle gambe dà la possibilità ai vogatori di sviluppare una potenza (e quindi una velocità) superiore a quella dei canoisti. Così sui 1000 metri un atleta raggiunge una velocità di circa 20 km/h nel canottaggio, 18 km/h in kayak e 16 km/h in canoa canadese, mentre la velocità di un nuotatore è attorno ai 6 km/h. Il «motore» è sempre lo stesso, ma la «trasmissione» cambia in modo significativo.

Esistono vari metodi per misurare la potenza di un atleta. Uno è davvero molto semplice: gli si fa fare un salto e si misura il tempo di volo, per risalire poi alla potenza con una semplice formula matematica (infatti il tempo di volo è proporzionale alla velocità «di decollo» che l'atleta riesce a imprimere al proprio corpo vincendo la forza-peso, e dunque alla

sua potenza). Come dispositivo di misura si può utilizzare una piattaforma inerziale oppure una *cellula fotoelettrica*, il cui raggio si chiude quando l'atleta salta e si riapre quando riatterra.

In tutti e due i casi si ottiene però un valore istantaneo della potenza. Per misurare la potenza media durante sforzi più prolungati esistono dispositivi detti *ergometri*, che variano in base allo sport (figura 15). Ogni atleta ha infatti l'organismo adattato alla disciplina che pratica: non si possono fare test a un canoista mandandolo in bicicletta, o a un nuotatore con un *tapis roulant*, perché non riuscirebbero a esprimere tutto il loro potenziale.

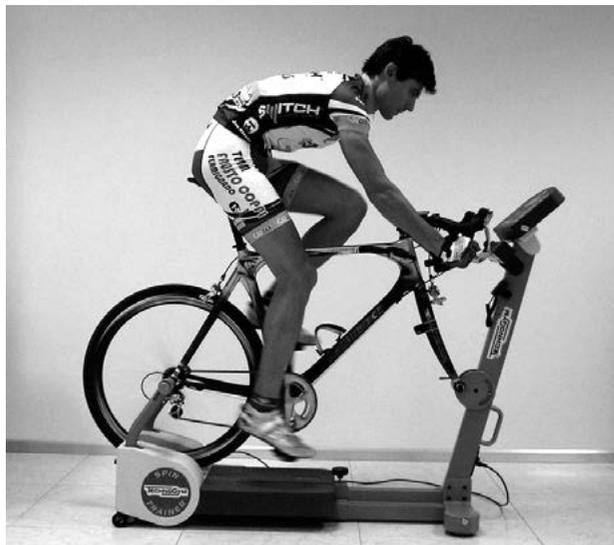


Figura 15. Un atleta sul cicloergometro.

Per misurare la potenza un ergometro deve misurare sia la forza sia la velocità, oppure la coppia e la velocità angolare nel caso di un movimento rotatorio. La velocità, lineare o angolare, viene in genere acquisita tramite un encoder. La forza viene invece impostata dall'utente scegliendo la resistenza di un freno magnetico o meccanico, oppure è direttamente legata alla velocità nel caso di un freno aerodinamico, in cui l'energia viene dissipata da una turbina.

Se a un ergometro si abbinano un metabolimetro e un cardiografometro si ottiene in pratica un *banco di prova* per l'atleta, simile a quelli usati dagli ingegneri per testare i motori. Un test eseguito in questo modo permette di misurare tutti i parametri principali della prestazione dello sportivo: forza, potenza, velocità, VO_2 max e frequenza cardiaca.