



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Biomedica

Progetto Swim4all: aspetti biomedici cardiaci e motori in
soggetti con disabilità motoria

The Swim4all project: biomedical cardiac and motor aspects in motor
disabilities

Relatore:
Prof.ssa Laura Burattini

Rapporto Finale di:
Elena Novelli

Anno Accademico 2020/2021

ABSTRACT

Il nuoto è una disciplina che richiede abilità e competenze molteplici ma allo stesso tempo è una delle attività fisiche meno gravate da contrindicazioni e può essere perciò praticata da chi possiede limitazioni delle capacità di esecuzione delle attività necessarie alla partecipazione a determinati settori o ambienti della vita, ovvero quelle che comunemente vengono definite disabilità. Nello specifico in soggetti che presentino disabilità fisiche come paralisi cerebrale, distrofia muscolare, lesioni del midollo spinale ed amputazione di arti il nuoto rappresenta un'attività che permette un ottimo rinforzo muscolare, con ripercussioni positive su mobilità, equilibrio e respirazione a fronte di un limitato sovraccarico di muscoli ed articolazioni grazie alle proprietà di galleggiamento dell'acqua e alla resistenza idrodinamica. Inoltre, tale attività contribuisce a ridurre i sintomi di ansia e depressione comuni in questi soggetti, a favorire l'interazione sociale se svolta in gruppo nonché a rafforzare il fitness cardiovascolare favorendo, ad esempio, una migliore ossigenazione e una migliore circolazione sanguigna.

Data l'importanza che il nuoto riveste per questi soggetti, risulta importante quindi osservare ed analizzare la risposta che atleti con questi tipi di disabilità presentano dopo un'attività di tale tipo andando a monitorare un tipico allenamento in piscina. A questo scopo vengono presi come indici per lo studio parametri cardiaci e biomedici quali la frequenza cardiaca e la variabilità del ritmo cardiaco (ed in particolare le loro variazioni in funzione dell'attività fisica) grazie alle informazioni che questi restituiscono riguardo al fisiologico funzionamento del cuore e del sistema nervoso.

Nell'ambito del progetto Swim4all si è quindi monitorato l'allenamento di un nuotatore di 25 anni affetto da tetraparesi spastica in encefalopatia congenita, una particolare forma di paralisi cerebrale. Le acquisizioni elettrocardiografiche prima e dopo l'allenamento sono state effettuate utilizzando lo strumento tascabile Kardia prodotto dalla Alivecor. Il tacogramma è stato analizzato tramite il software Kubios sviluppato dall'Università della Finlandia orientale proprio per l'analisi della variabilità del ritmo cardiaco. Dall'analisi dei dati ottenuti si evidenzia come l'atleta presenti una risposta simpato-vagale paragonabile con le aspettative riguardanti un soggetto normodotato sano in particolare per quanto riguarda il rapporto LF/HF e la variabilità del ritmo cardiaco prima e dopo l'allenamento.

L'atleta si presentava però poi in una situazione di tachicardia sia nella fase precedente che in quella successiva all'allenamento ma la quantità di dati a disposizione non ha permesso di collegare questo fatto alla particolare disabilità fisica.

INDICE

Introduzione	I
1. Sistema cardiovascolare	1
1.1 Elettrocardiogramma	5
1.2 Tacogramma.....	8
2. Nuoto	11
3. Nuoto nella disabilità motoria	17
3.1 Classificazione disabilità.....	17
3.2 Aspetti motori.....	23
3.3 Benefici psichici del nuoto.....	26
3.4 Aspetti cardiovascolari.....	28
4. Monitoraggio durante l'allenamento in piscina	32
Studio 1.....	33
Studio 2.....	36
Studio 3.....	40
5. Esempio di monitoraggio cardiaco computerizzato di un soggetto con disabilità motoria praticante il nuoto	44
5.1 Materiali e Metodi.....	44
5.1.1 KardiaMobile 6L.....	44
5.1.2 Analisi dati: Kubios.....	47
5.2 Risultati.....	51
5.3 Discussione.....	60
Conclusioni	II
Riferimenti.....	III

Introduzione

È noto come l'attività fisica in generale sia fondamentale per il benessere psicofisico delle persone grazie ai numerosi benefici che essa comporta. Tali vantaggi sono particolarmente importanti non solo per i normodotati ma anche, e soprattutto, per tutti coloro che presentino disabilità di vario genere a causa dei disturbi ad esse collegati. Nel caso specifico delle disabilità fisiche quali mancanza di controllo dei movimenti, carenza muscolare e totale o parziale perdita di arti però, la maggior parte delle attività svolte su terra presenta limitazioni troppo grandi (in termini, ad esempio, di resistenza e tono muscolare richiesti e sollecitazione su segmenti corporei) per lo svolgimento. Grazie alle particolari caratteristiche del mezzo fisico in cui si svolge invece, il nuoto è una delle attività meno gravate da controindicazioni e permette ad atleti professionisti e non l'esecuzione di un'attività fisica intensa riducendo al contempo al minimo il rischio di infortuni.

Tra i vari benefici che comporta, il nuoto permette di migliorare le capacità vitali generiche e rafforzare o aumentare il range di movimenti possibili nonché di prevenire varie tipologie di disturbi secondari alla disabilità e di rinforzare il fitness cardiovascolare. Oltre a ridurre i sintomi di ansia e depressione, rappresenta anche poi uno stimolo al miglioramento di se stessi e al superamento dei propri limiti se svolto in ambito agonistico.

Data l'importanza di tale sport e la sua conseguente diffusione, il progetto Swim4all nasce con lo scopo di andare a monitorare allenamenti in piscina di soggetti con varie tipologie di disabilità fisica che pratichino già il nuoto a livello agonistico. In particolare, viene posta l'attenzione su aspetti biomedici e cardiaci, quali le variazioni della frequenza cardiaca e della variabilità del ritmo cardiaco (osservabili tramite elettrocardiogramma e tacogramma) grazie all'informazioni che questi restituiscono sul funzionamento del cuore e del sistema nervoso, per osservare la risposta di questi atleti ad uno stress rappresentato da un'attività fisica così comunemente praticata.

Nello specifico, nell'ambito di questo progetto e in linea con le sue finalità, si è voluti andare a monitorare l'allenamento di un nuotatore affetto da tetraparesi spastica in encefalopatia congenita registrando ed analizzando un tracciato elettrocardiografico ottenuto prima e dopo l'allenamento stesso.

1. Sistema cardiovascolare

Il cuore (figura 1) è un muscolo involontario striato localizzato all'interno della cavità toracica tra i polmoni, nella zona chiamata mediastino. Della grandezza di un pugno e localizzato per 2/3 nella parte sinistra di tale zona, in esso si possono identificare un'ampia porzione superiore denominata base dalla quale partono i principali vasi (che verranno descritti in seguito), ed un'estremità inferiore chiamata apice che si posiziona immediatamente al di sopra del diaframma. Le dimensioni tipiche di un cuore adulto sono di circa 13 cm per quanto riguarda la distanza tra base ed apice e diametro di 9 cm in corrispondenza della base ^[1].

Il cuore è posto in un sacco chiamato pericardio, il quale è formato da uno strato esterno fibroso ed uno strato interno sieroso. Tale sacco è ancorato al diaframma e allo sterno anteriormente tramite legamenti e ha il compito di isolare il cuore dagli altri organi e di ridurre l'attrito durante il suo movimento meccanico impedendo tuttavia un movimento di espansione eccessivo ^[1].

La parete cardiaca è costituita da 3 strati. Lo strato più esterno è occupato dall'epicardio, chiamato anche pericardio viscerale, il quale è una membrana sierosa disposta sulla superficie del cuore, mentre, a ricoprire la parte interna delle cavità, troviamo l'endocardio, il quale poi si continua con il rivestimento interno dei vasi sanguigni. Tra questi due strati è disposto il miocardio, formato da muscolo cardiaco e costituente la maggior parte della massa del cuore. In particolare, il miocardio è formato da cellule chiamate miocardiociti le quali a loro volta possono essere distinte in 3 tipologie differenti: miocardio di lavoro composto da materiale contrattile, particolari cellule dotate di autoeccitazione chiamate cellule nodali ed il tessuto di conduzione composto da cellule adibite ad una efficace propagazione dell'eccitazione a tutto il miocardio di lavoro ^[1].

Altra componente importante del cuore è lo scheletro fibroso, struttura di collagene e fibre elastiche, che funge da sostegno, supporto strutturale e da isolante tra le camere. Una delle caratteristiche principali del cuore è infatti quella di essere suddiviso in 4 cavità. Le cavità superiori, situate a livello della base, sono chiamate atri. Sono costituite da pareti sottili in virtù del loro carico di lavoro relativamente leggero dovuto al fatto che il loro compito consiste nel ricevere il sangue di ritorno dai vasi afferenti (vena cava superiore ed inferiore per l'atrio destro e vena polmonare per l'atrio

sinistro) ed inviarlo alle camere sottostanti, ovvero i ventricoli. Tali cavità inferiori sono più grandi e presentano una parete più spessa (soprattutto il ventricolo sinistro) rispetto agli atri in quanto loro compito sarà l'eiezione del sangue dal cuore verso i grandi vasi efferenti (arteria polmonare per il ventricolo destro e aorta per il ventricolo sinistro) ^[1].

Atri e ventricoli sono separati tra di loro da orifizi coperti da valvole il cui compito è garantire l'unidirezionalità del flusso e che sono composte da lamine fibrose di tessuto chiamate cuspidi. In particolare, atrio e ventricolo destro sono separati dalla valvola tricuspide mentre tra atrio e ventricolo sinistro è interposta la valvola bicuspidale o mitrale. Delle corde tendinee filiformi ancorano le valvole ai muscoli papillari localizzati sul pavimento pelvico i quali si assicurano che le valvole non si rovescino o sporgano eccessivamente negli atri ^[1].

Anche arteria polmonare ed aorta sono separate dai ventricoli tramite valvole che hanno la stessa funzione del caso atrioventricolare. In base alla posizione si avrà in questo caso la valvola semilunare polmonare e la valvola semilunare aortica ed entrambe sono formate da 3 cuspidi ^[1].

Esternamente la separazione delle 4 camere è delimitata da solchi principalmente ricoperti da tessuto adiposo. A separare atri e ventricoli è il solco coronario dal quale poi si estendono obliquamente verso il basso, in direzione dell'apice, il solco interventricolare anteriore e il solco interventricolare posteriore. Internamente invece la parte destra e la parte sinistra del cuore sono divise da un setto composto in prevalenza da componente muscolare ^[1].

Tale divisione si rispecchia e trova giustificazione nel fatto che seppur anatomicamente simili, parte destra e sinistra del cuore sono funzionalmente diversi. La parte destra del cuore si occupa infatti della circolazione polmonare, ovvero del trasporto di sangue ai polmoni dove avviene lo scambio dei gas e del suo ritorno al cuore dove, tramite la parte sinistra che si occupa della grande circolazione o circolazione sistemica, può essere poi inviato a tutto l'organismo ^[1].

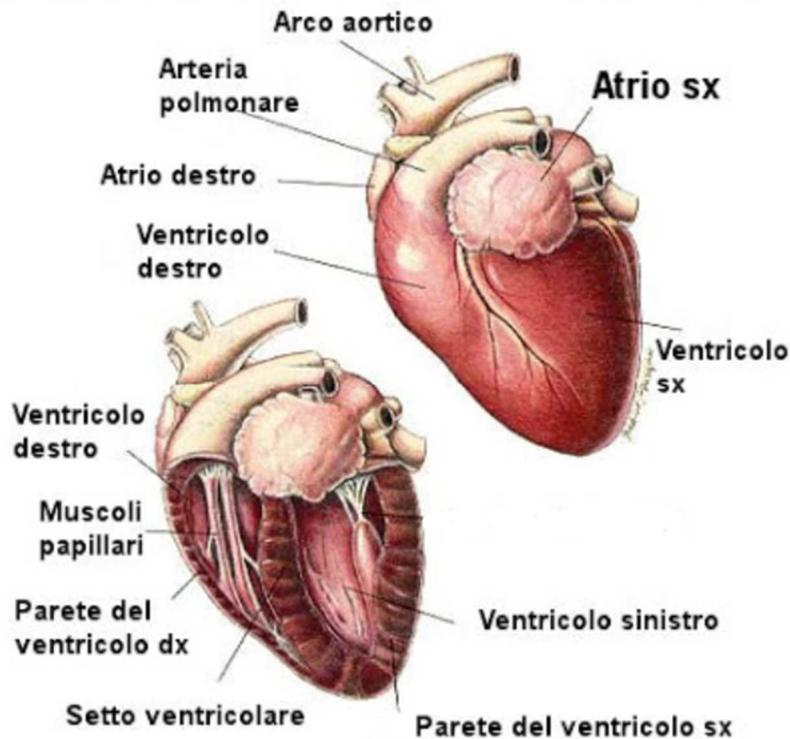


Figura 1: Anatomia del cuore

Più nel dettaglio (figura 2) il sangue che ha circolato nell'organismo ritorna al cuore, carico di anidride carbonica, tramite la vena cava superiore e inferiore ed entra nell'atrio destro facendo aumentare la pressione di quest'ultimo fino a che questa non sarà maggiore di quella del ventricolo sottostante. A questo punto, tramite l'apertura della valvola tricuspide, il sangue fluisce nel ventricolo destro e nel momento in cui questo si contrae (sistole) attraversa la valvola polmonare e, passando attraverso l'arteria polmonare destra e sinistra, raggiunge i polmoni dove rilascia l'anidride carbonica e assume ossigeno. Il sangue proveniente dai polmoni torna poi all'atrio sinistro e per lo stesso principio della parte destra passerà attraverso la valvola mitrale per andare a riempire il ventricolo sinistro. Nel momento in cui la pressione all'interno di questa camera eguaglia quella dell'arco aortico, si ha l'apertura della valvola aortica e la conseguente eiezione del sangue nell'aorta ascendente tramite la quale raggiungerà le arterie adibite al trasporto del sangue a tutti gli organi dell'organismo nei quali, grazie ai capillari (i vasi più piccoli) cederà ossigeno e si caricherà di anidride carbonica ^[1].

Il cuore può essere perciò visto come composto da due pompe in serie (parte sinistra e parte destra) nelle quali il sangue viene tenuto completamente separato.

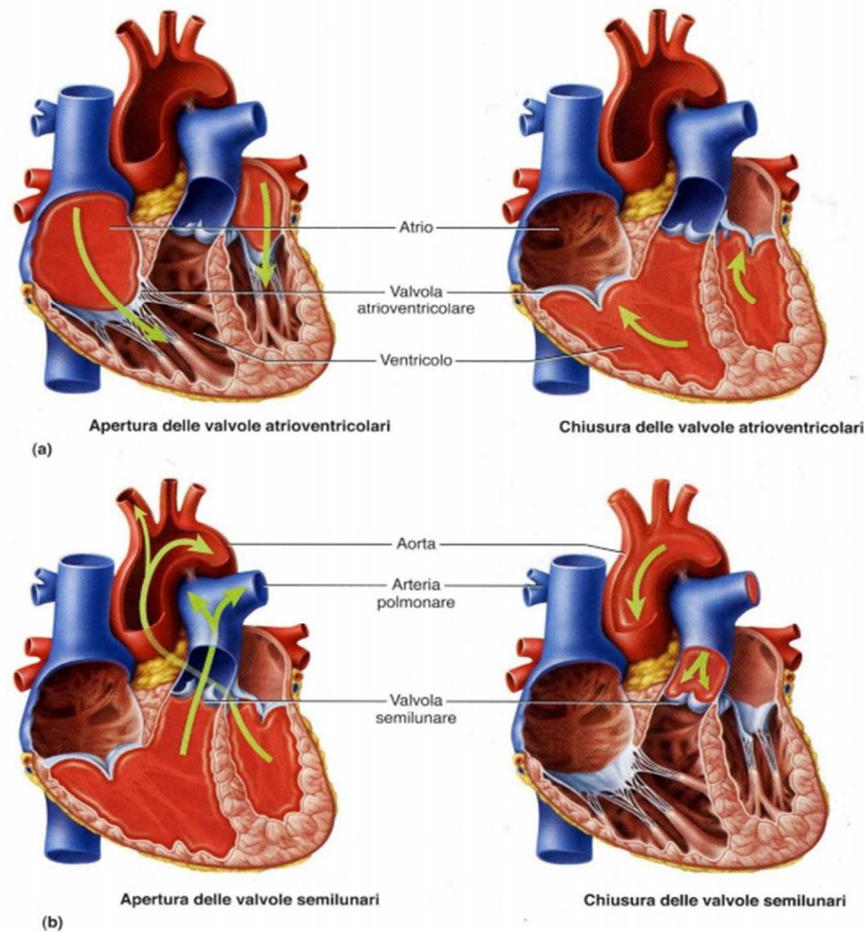


Figura 2: Schema di circolazione del sangue nel cuore con focus su apertura e chiusura delle valvole

Naturalmente anche il cuore stesso ha bisogno di energia per il suo funzionamento (quindi ossigeno e nutrimento) e ciò gli viene fornito tramite un proprio sistema di arterie chiamate coronarie. Queste si originano dall'aorta in prossimità del ventricolo e si dividono in coronaria destra, la quale irrorla la parete posteriore del miocardio, e coronaria sinistra, la quale a sua volta è differenziata in arteria discendente anteriore e arteria circonflessa che si occupano del trasporto di sangue alla parte anteriore e laterale del cuore [1].

La circolazione è resa possibile dalla particolarità di alcune cellule cardiache (cellule nodali) che hanno perso la capacità contrattile specializzandosi invece nella generazione e conduzione di segnali elettrici responsabili dello stimolo a cui si deve la contrazione delle camere.

Da un gruppo di queste cellule chiamato nodo senoatriale (SA), poste in prossimità della vena cava sotto l'atrio destro e capaci di depolarizzarsi autonomamente (quindi di aumentare il proprio potenziale a cavallo della membrana cellulare facendo entrare nelle cellule ioni positivi grazie ad un corredo di canali ionici voltaggio-dipendenti per il sodio e per il potassio), parte infatti un potenziale d'azione. Tale eccitazione si propaga attraverso gli atri determinando la depolarizzazione e la successiva contrazione di queste cavità. Il segnale raggiunge poi un altro gruppo di cellule nodali posto nell'estremità inferiore del setto interatriale chiamato nodo atrioventricolare (AV) il quale riorganizza il segnale e fa sì che questo venga trasmesso al fascio His (che si differenzia in branca destra e branca sinistra) in direzione dell'apice del cuore. La contrazione ventricolare avverrà solo dopo che l'impulso depolarizzante sarà trasmesso, tramite le fibre del Purkinje, a tutto il miocardio ventricolare [1].

Fondamentale è quindi il ruolo del SA che funge da pacemaker generando impulsi elettrici ad una frequenza compresa tra 60 e 100 bpm determinando così il ritmo cardiaco.

1.1 Elettrocardiogramma

Dall'integrazione dei potenziali d'azione presenti nei diversi siti del miocardio si origina il tracciato che costituisce lo strumento di indagine di maggiore importanza per il cuore: l'elettrocardiogramma (ECG) [1].

Tale tracciato viene ottenuto tramite l'utilizzo di uno strumento chiamato elettrocardiografo, inventato nel 1887 da Waller e perfezionato da William Einthoven, che registra non il movimento meccanico di contrazione e rilassamento del cuore ma appunto l'ampiezza degli eventi elettrici in funzione del tempo che precedono queste fasi. Solitamente però, questi segnali elettrici non vengono registrati direttamente sulla superficie del cuore ma sulla pelle tramite l'utilizzo di un certo numero di elettrodi connessi tra loro per mezzo di un preciso schema di derivazioni. Lo schema maggiormente utilizzato si avvale di 12 derivazioni in cui 3 misurazioni sono ottenute facendo la differenza di potenziale tra elettrodi posti sugli arti (triangolo di Einthoven con derivazioni bipolari) e le restanti 9 ottenute invece tramite il confronto con un elettrodo che funge da potenziale di riferimento [1].

In virtù della semi-periodicità del segnale cardiaco, l'ECG assume un andamento caratteristico e facilmente riconoscibile dove le curve presenti (chiamata onde) e gli intervalli tra queste sono precisamente correlati ad eventi del ciclo cardiaco.

Facendo riferimento alla figura 3 si ha infatti, come conseguenza dell'attivazione dell'SA, la generazione dell'onda P corrispondente alla fase di depolarizzazione atriale e alla loro successiva contrazione. Il passaggio dell'impulso depolarizzante tra nodo AV, setto, apice e base genera il così detto complesso QRS dopo il quale si ha la sistole ventricolare e la conseguente eiezione del sangue nelle arterie principali. Durante questa fase avviene anche la ripolarizzazione atriale ovvero il ritorno del potenziale a cavallo della membrana a valori negativi grazie all'uscita di ioni positivi dovuta sempre ai canali ionici voltaggio-dipendenti. Questa fase è però nascosta dal complesso QRS in quanto caratterizzata da un valore di ampiezza minore (infatti in corrispondenza del picco R si raggiunge il valore massimo di ampiezza del ciclo cardiaco che può essere compreso tra 1 e 3 mV). Per ultimo si ha l'onda T che corrisponde alla fase di ripolarizzazione ventricolare. Tutte le camere sono così nella fase di rilassamento (diastole) e pronte per un nuovo ciclo ^[1].

Proprio in virtù della peculiarità di questo tracciato, una prima diagnosi di disturbi della funzionalità cardiaca può essere eseguita individuando irregolarità nella forma dell'ECG (dopo aver provveduto all'eliminazione di componenti di disturbo come respirazione e rumore di linea tramite opportune operazioni di filtraggio).

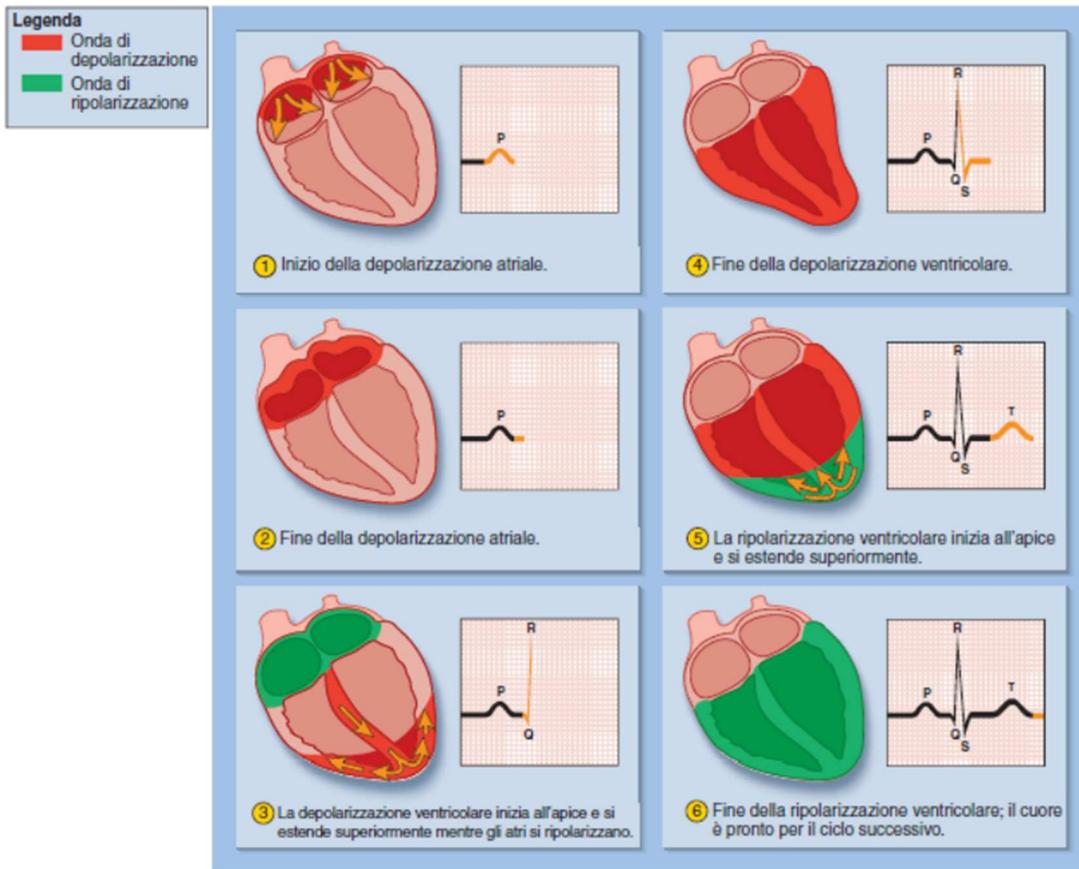


Figura 3: Generazione del tracciato elettrocardiografico in relazione alle fasi di stimolazione cardiaca

Una prima tipologia di disturbo che può essere analizzato è rappresentata dalle aritmie, ovvero alterazioni del normale ritmo di contrazione cardiaca. Nel caso, infatti, di aritmia sopraventricolare (S), è possibile riconoscere sul tracciato elettrocardiografico un intervallo RR più corto rispetto ai precedenti seguito poi solitamente da uno più lungo. Ciò è dovuto al fatto che alcune cellule presenti negli atri non attendono il segnale del nodo senoatriale e fanno partire un impulso prematuro (da qui la minore distanza dalle onde del periodo precedente) in direzione del nodo atrioventricolare con conseguente contrazione asincrona e meno efficiente degli atri. Tale tipo di aritmia non è però particolarmente grave in quanto una volta arrivato al nodo AV, l'impulso verrà riorganizzato da quest'ultimo e trasmesso correttamente ai ventricoli che si contrarranno e genereranno un normale complesso QRS. Ad essere invece molto più grave è l'aritmia ventricolare dove un battito prematuro, che avviene con la stessa modalità del caso sopraventricolare salvo interessare in questo caso cellule dei ventricoli, fa sì che l'efficienza del cuore sia bassissima e la morfologia del battito venga meno completamente.

Gli atri non sono infatti praticamente utilizzati e i ventricoli non bene organizzati con conseguente difficoltà nella corretta eiezione del sangue per la normale circolazione. La morfologia di queste aritmie è riassunta in figura 4.



Figura 4: Tracciato elettrocardiografico in presenza di un'aritmia sopraventricolare (1) e ventricolare (2)

1.2 Tacogramma

L'analisi del tracciato elettrocardiografico risulta anche essere un importante strumento per lo studio indiretto e non invasivo del sistema nervoso. Il cuore è infatti innervato dal sistema nervoso centrale autonomo che tramite la sinergia delle sue componenti (simpatica e parasimpatica) regola il ritmo cardiaco, facendo in modo che tale muscolo sia contemporaneamente in grado di mantenere un proprio equilibrio a discapito di fattori alteranti esterni, e di adattarsi a varie condizioni/esigenze. In particolare, il sistema simpatico si attiva in situazioni di stress e provoca un aumento della frequenza e forza di contrazione cardiaca, della pressione arteriosa e della glicemia, mentre il sistema parasimpatico o basale provoca una diminuzione di questi fattori con la finalità dell'immagazzinamento di riserve energetiche.

Una buona variabilità del ritmo cardiaco (*heart rate variability* o HRV) può essere quindi presa come indice di salute e del corretto funzionamento del sistema nervoso e può essere studiata tramite l'analisi degli intervalli RR dell'ECG.

Tali intervalli (espressi in ms) possono essere rappresentati in funzione del tempo (ma in questo caso la serie così ottenuta non è campionata uniformemente e si deve perciò

operare un passaggio ulteriore di ricampionamento) oppure, più comunemente, in funzione di numeri successivi di battito ed in questo caso il tracciato ottenuto viene chiamato Tacogramma.

Per evidenziare al meglio le componenti del sistema nervoso, di tale tracciato viene calcolata la trasformata di Fourier (rappresentazione nel dominio della frequenza che conserva le proprietà del segnale originale; possibile perché in questo caso il campionamento è subito uniforme) e poi valutato il suo modulo al quadrato. Si ottiene così lo spettro di potenza del Tacogramma nel quale si possono individuare 3 regioni distinte (figura 5) delimitate da altrettante sottobande di frequenza. La prima di queste, caratterizzata da valori di frequenza estremamente bassi (chiamata infatti *very low frequency* o VLF) non è collegata a fenomeni riguardanti né la parte simpatica né la parte parasimpatica del sistema nervoso ma a fenomeni non lineari associati alla teoria del caos. Di maggiore interesse sono invece la regione a bassa frequenza (LF) associata al sistema simpatico, e quella ad alta frequenza (HF) associata all'attività del sistema parasimpatico. In particolare, è interessante il rapporto tra queste due regioni (LF su HF) che in condizioni normali dovrebbe essere circa pari ad 1. Nel caso invece in cui il valore sia molto maggiore, ciò potrebbe indicare una lesione al sistema simpatico e lo stesso vale per il parasimpatico nel caso di rapporto molto minore di 1.

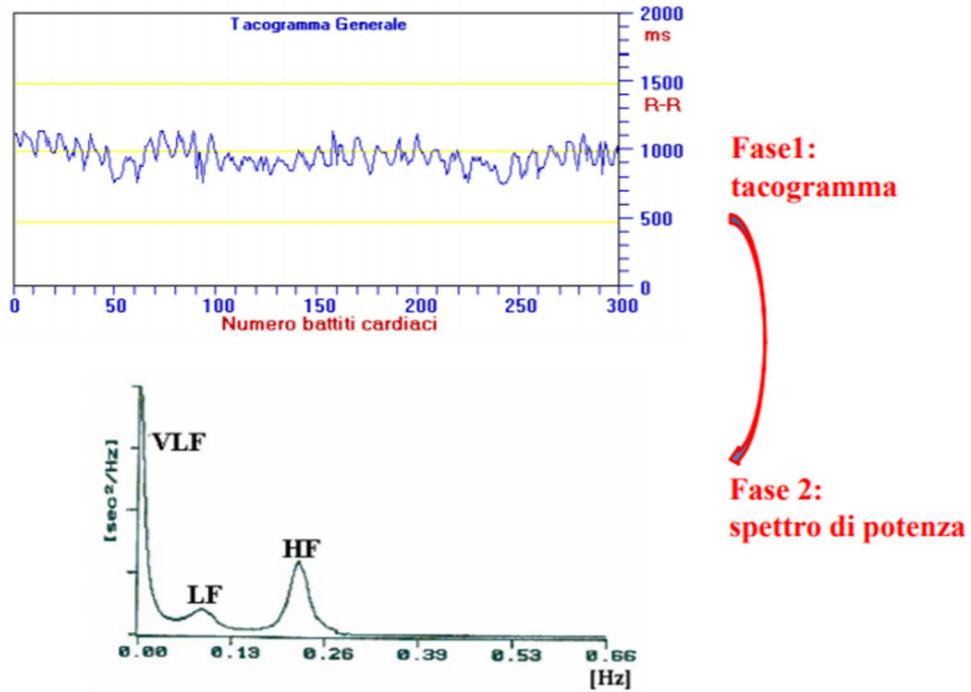


Figura 5: Rappresentazione del tachogramma in funzione del numero di battiti cardiaci e del suo spettro di potenza

2.Nuoto

Il nuoto è una attività fisica diffusa su scala planetaria, grazie ai numerosi benefici che essa comporta e anche grazie all'ampia platea di persone che possono praticarla [2]. Convenzionalmente tale disciplina può essere svolta in quattro modalità diverse (anche definiti stili): crawl, dorso, rana e delfino.

Il crawl è lo stile di nuoto più veloce e semplice, infatti è quello in pratica sempre utilizzato nelle gare di stile libero ed è perciò solitamente indicato con quest'ultimo termine. La propulsione avviene con un movimento quasi alternato di braccia e gambe (le prime più importanti delle seconde) entrambe sempre distese, mentre il corpo è in posizione orizzontale prona e subisce un leggero rollio durante la bracciata, facilitando così anche la rotazione della testa necessaria alla respirazione [3].

La posizione orizzontale del corpo è mantenuta anche nello stile dorso, anche se in questo caso esso sarà supino e la testa sarà leggermente più inclinata rispetto allo stile libero per mantenere il volto completamente fuori dalla superficie dell'acqua e garantire quindi una respirazione continua. La propulsione avviene come nel caso dello stile libero anche se qui il movimento rotatorio delle braccia sarà opposto (antiorario) [3].

Uno stile molto tecnico è invece la rana in cui il corpo, in decubito prono, è leggermente inclinato. I movimenti di spinta delle braccia e delle gambe in questo caso partono da una posizione di quest'ultimi raccolta vicino al corpo e procedono verso l'esterno in maniera simultanea e sempre sullo stesso piano [3].

L'ultimo stile utilizzato è il delfino o farfalla, il quale è riconosciuto essere un'evoluzione dello stile rana. La particolarità di questo stile, in cui il corpo è in posizione orizzontale prona, risiede nel fatto che entrambe le braccia e le gambe eseguono movimenti simultanei e simmetrici [3].

Nella classificazione degli sport proposta da Mitchell et al. (figura 1), dove le principali discipline vengono classificate in base al livello di intensità della componente statica e dinamica richiesta per eseguire quella attività durante la competizione, il nuoto viene posto tra gli sport a moderata componente statica ed a elevata componente dinamica [4]. Come in tutti gli sport, infatti, l'attività sportiva coinvolge in generale sia componenti statiche (associate al concetto di potenza) che dinamiche (associate invece alla resistenza), nonostante queste siano considerabili come "poli opposti".

Tali componenti determinano le esigenze cardiovascolari dello sport stesso [4].

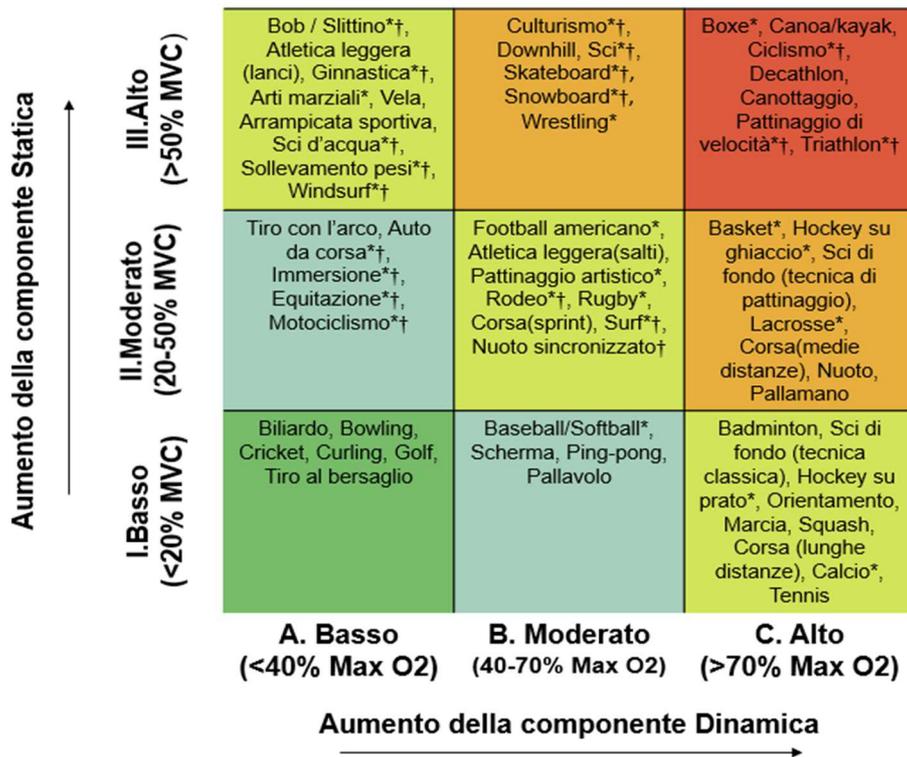


Figura 6: Classificazione degli sport di Mitchell.
MVC=contrazione massima volontaria
MaxO₂=consumo massimo di ossigeno
† aumento del rischio in caso di sincope cardiaca
* pericolo di collisione tra corpi

Ciò si traduce nel caso del nuoto, secondo la classificazione fornita, con il fatto che durante la pratica natatoria si rileva nell'uomo un moderato aumento del carico di pressione arteriosa sistolica, diastolica e media (fenomeno associato alla staticità) e un elevato aumento del consumo di ossigeno e di frequenza e gittata cardiaca (tipico di un esercizio dinamico) [4].

Per quanto riguarda la muscolatura coinvolta, il movimento armonico e coordinato del corpo umano all'interno dell'acqua richiede, come già illustrato nella presentazione degli stili, l'azione combinata degli arti inferiori, di quelli superiori e anche della zona del così detto "core" necessaria per il collegamento e coordinamento di tutti i gruppi muscolari che vengono impiegati [5].

Nel nuoto i muscoli assolvono sia il compito di garantire il movimento di una sezione corporea, sia quello di stabilizzare l'intero corpo stesso. Un esempio di muscolo che svolge l'azione di movente è il grande dorsale, responsabile del movimento delle braccia attraverso l'acqua durante la fase propulsiva di tutti e quattro gli stili (crawl,

dorso, rana e delfino). Un esempio invece di muscolatura il cui compito principale è la stabilizzazione è proprio quella della fascia addominale/toracica (core) [5].

Entrambe le funzioni sono fondamentali, perciò notevole e sempre ampio (anche se leggermente differente a seconda degli stili) sarà l'impegno osteo-artro-muscolare necessario a garantire sia la stabilità (e quindi il galleggiamento) che la propulsione all'interno di un fluido che offre una resistenza all'avanzamento, avendo sempre come fine la massimizzazione dell'efficacia dell'azione attraverso l'acqua [5].

In figura 2 sono rappresentate le posizioni assunte dal corpo nei vari stili con in evidenza le principali fasce muscolari utilizzate.

Sia la fase di galleggiamento sia, soprattutto, la fase di propulsione richiedono una certa energia per essere compiute [2]. Come in tutti gli sport, nel nuoto il corpo utilizza tre principali sistemi per produrre l'adenosina trifosfato (ATP), ovvero l'energia, che alimenta la contrazione muscolare e permette quindi il movimento.[6][7] Questi sistemi sono: il sistema anaerobico lattacido, il sistema anaerobico glicolitico e il sistema aerobico [8]. Tutti e tre i sistemi lavorano insieme (e quindi il loro contributo energetico sarà sommato) per garantire un continuum energetico volto a supportare tutte le prestazioni, anche se con contributo diverso a seconda del tipo di evento [6][7]. Ciascuno di questi sistemi è caratterizzato infatti da una sua costante di tempo e quindi, la velocità alla quale questa energia, o potere metabolico, viene prodotta e si esaurisce dipende dalla durata dell'esercizio [6].

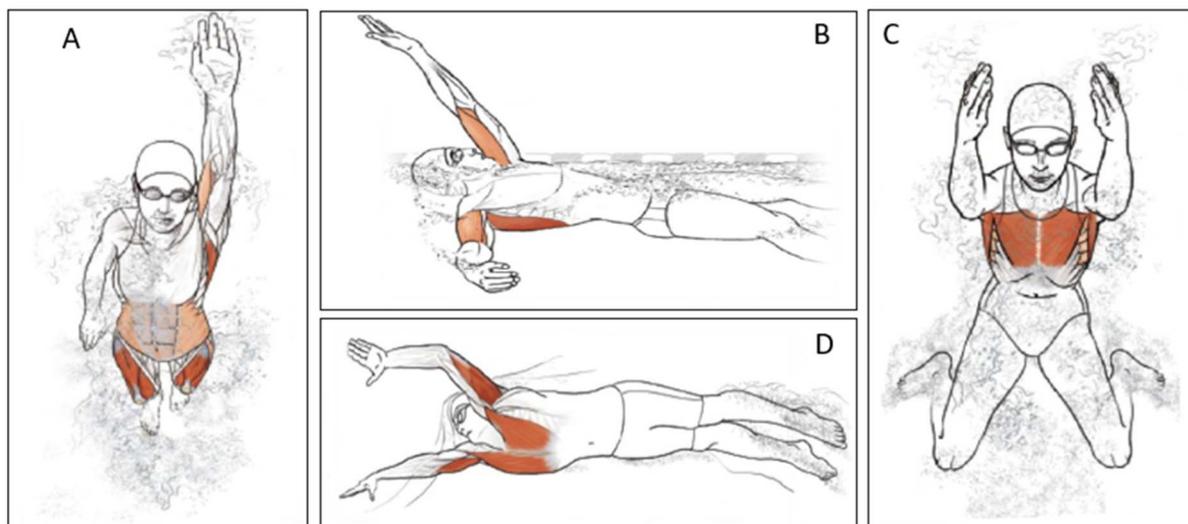


Figura 7: Stili del nuoto con evidenziati i principali gruppi muscolari utilizzati
A: stile libero B: dorso C: rana D: delfino [5]

Ad esempio, il sistema anaerobico alattacido (anche chiamato ATP-PC) che fa affidamento per la produzione di energia alla fosfocreatina (PC) presente nei muscoli, riesce a fornire energia solo per i primi 12 secondi dell'attività e rappresenta il fornitore di energia predominante solo nelle gare ad alta intensità e breve durata (ad esempio nei 50 m) ^{[6][7]}. Questo perché le riserve di PC sono molto limitate e quindi si esauriscono velocemente. Associato invece sia alle gare di sprint che alle medie distanze (100m e 200m) è il sistema anaerobico lattacido il quale supporta l'attività ad alta intensità fino a 2-3 minuti dal suo inizio ^[6]. In questo caso l'energia è prodotta dalla scissione del glicogeno che oltre a produrre ATP produce però anche acido lattico, il quale accumulandosi nei muscoli inibisce la scissione di ulteriore glicogeno andando ad interferire con la contrazione muscolare ^[7]. Il sistema aerobico (che ricava energia dai carboidrati e dai grassi) infine è il principale responsabile del contributo energetico nelle gare di lunga distanza (superiori ai 400m e quindi anche a 3 minuti di durata) ^[6]. Come riassunto in Tabella 1 quindi, tanto più l'attività sarà breve tanto più per la produzione di energia ci si baserà sulle fonti anaerobiche, il contributo delle quali diminuisce all'aumentare della distanza ed è sostituito dal sistema aerobico che progressivamente invece aumenta la sua rilevanza ^[8].

Tabella 1: Contributi del sistema energetico relativo alle massime prestazioni in una serie di eventi di nuoto ^[6]

Distanza (m)	Anaerobico alattacido (%)	Anaerobico lattacido (%)	Aerobico (%)
50	15-80	2-80	2-26
100	5-28	15-65	5-54
200	2-30	25-65	5-65
400	0-20	10-55	25-83
800	0-5	25-30	65-83
1500	0-10	15-20	78-90

In generale la richiesta energetica del nuoto, paragonata ad esempio a quella della corsa, è di circa quattro volte superiore, con un rendimento complessivo inferiore al 10% per lo spostamento in avanti principalmente per via della mancanza di appoggi stabili in acqua [2]. Il costo energetico della pratica natatoria nel soggetto di sesso femminile è circa i 2/3 di quello del maschio per via della maggiore presenza nelle donne di massa grassa rispetto alla quantità di massa magra che fa sì che venga richiesta meno forza per rimanere a galla [2][7][9]. Naturalmente il nuotatore allenato o che pratica tale attività con regolarità è in grado, a parità di spesa energetica, di mantenere una velocità maggiore rispetto al nuotatore amatoriale [9]; inoltre il costo energetico varia a seconda dello stile: per tutti lo stile più dispendioso è il delfino, seguito da rana, dorso e stile libero [7].

Nel nuoto l'energia metabolica è principalmente utilizzata per generare la forza propulsiva necessaria a superare la resistenza idrodinamica dell'acqua, o drag (solitamente indicata con F_d) [7][8]. In accordo con la seconda legge di Newton, particolareggiata al caso in esame (Eq.1), una forza di propulsione (F_p) almeno pari a F_d deve essere raggiunta per garantire una velocità costante e quindi l'avanzamento [9].

$$F_p - F_d = ma \quad (\text{Eq.1})$$

(dove m è la massa del corpo e a è l'accelerazione). In particolare, F_d , che è legato al quadrato della velocità della nuotata e quindi cresce con essa [10], può essere visto come somma di tre componenti [7][8]. La prima e più importante componente è data dalla resistenza di forma o pressione, che dipende, come suggerisce il nome stesso, dalla forma del corpo e dai suoi effetti sull'acqua. Tale componente, infatti, come esplicitato dalla formula che la determina (Eq.2), dipende oltre che dalla densità dell'acqua (ρ) e dalla velocità (v), anche dal coefficiente di resistenza idrodinamica (C_d) e dalla proiezione dell'area frontale (A) [8].

$$\text{Resistenza di forma} = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \quad (\text{Eq.2})$$

In particolare, dagli ultimi due fattori (per via della loro definizione) si evince come tale resistenza aumenti all'aumentare della forma e dimensione del corpo, della porzione di corpo immersa e dell'angolo di attacco alla superficie dell'acqua [8]. Ciò giustifica nuovamente perché lo stile libero sia considerato lo stile energeticamente meno dispendioso e più veloce. La posizione che qui il corpo assume è tale, infatti, da ridurre al minimo (rispetto agli altri stili) sia C_d che A e quindi in generale la resistenza di forma [8].

Un altro contributo alla resistenza idrodinamica totale è dato dalla resistenza d'attrito (F_f) la quale dipende dall'attrito tra la pelle e la superficie dell'acqua ^{[7][8]}. Per ridurre tale forma di resistenza, i nuotatori si depilano e utilizzano costumi che coprono porzioni più estese possibile di pelle ^[8]. L'ultimo tipo di resistenza che contribuisce alla F_d totale è la resistenza d'onda (F_w) la quale dipende strettamente dalla deformazione della superficie dell'acqua. Questa tende infatti ad accumularsi davanti al nuotatore durante il suo avanzamento e a lasciare degli spazi dietro creando così un moto ondosso responsabile di una grande resistenza ad alta velocità ^{[7][8]}.

Il nuoto è quindi una disciplina che richiede abilità e competenze molteplici, che spaziano dalla capacità di equilibrio alla capacità di ritmo, dalla rapidità di reazione alla velocità, dalla forza alla resistenza, dalla abilità di orientamento alla mobilità articolare ma che soprattutto, essendo una delle attività fisiche meno gravate da controindicazioni, può essere praticata tanto da soggetti sani quanto da persone affette da vario tipo di patologia comportando grandi benefici, estetici ma soprattutto fisiologici ^[2].

3. Nuoto nella disabilità motoria

3.1 Classificazione disabilità

L'attività di nuoto per le persone con disabilità è stata definita come la capacità di dominare l'elemento acqua, dislocandosi in modo sicuro e indipendente sotto e sull'acqua utilizzando la propria capacità funzionale e rispettando i propri limiti ^[11].

Prima di andare a trattare però nello specifico il mondo della disabilità nel nuoto, risulta utile andare a dare una definizione di disabilità e dei fattori ad essa associati.

Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) per disabilità si può intendere sia la sofferenza cronica dovuta ai sintomi di una malattia, sia la completa incapacità, o le limitazioni delle capacità, di esecuzione delle attività necessarie alla partecipazione a determinati settori o ambienti della vita ^[12]. Questa definizione, posta in termini di capacità-contesto-interazione, vuole mostrare come non esista una disabilità generale ma solo una disabilità correlata al contesto, concetto che ha molteplici conseguenze per la diagnosi e l'assistenza ^[12].

In quest'ottica, oltre alla diagnosi vera e propria della malattia risulta quindi fondamentale riuscire a valutare lo stato di salute funzionale di un soggetto, quindi le effettive conseguenze della patologia in relazione alla mobilità e alla vita quotidiana. È l'OMS stessa ad applicare per prima questo concetto affiancando alla decima versione della Classificazione Statistica Internazionale delle Malattie e dei Problemi di Salute Collegati (ICD-10), la Classificazione Internazionale del Funzionamento, della Disabilità e della Salute (ICF) ^[13]. La prima ha il compito, infatti, di fornire una "diagnosi/definizione" di malattie, disturbi o altre condizioni di salute, ma tali informazioni non sono ritenute sufficienti per la gestione sanitaria, per prevedere il ritorno al lavoro o la probabilità di integrazione sociale e perciò sono arricchite dalle informazioni aggiuntive fornite dall'ICF sul "funzionamento" andando a fornire un quadro più ampio sulla salute delle persone ^[13]. Funzionamento è un termine generico utilizzato dall'OMS per descrivere ciò che una persona con una determinata condizione di salute fa o è in grado di fare nella vita di tutti i giorni ^[13].

L'ICF è costituita da due parti: funzionamento e disabilità e fattori contestuali. Ogni parte consiste di due componenti, ognuna delle quali è a sua volta costituita da diversi domini e, all'interno di ogni dominio, da categorie, che sono le unità di classificazione ^[13]. La salute e gli stati relativi alla salute di un individuo possono essere registrati selezionando il codice o i codici di categoria appropriati e con l'aggiunta di qualificatori,

che sono anche loro codici numerici, che specificano l'entità del funzionamento o della disabilità in quella categoria o la misura in cui un fattore ambientale è un facilitatore o una barriera ^[13].

La struttura dell'ICF è riassunta in Tabella 2.

Tabella 2: Struttura della Classificazione Internazionale del Funzionamento, della Disabilità e della Salute (ICF) ^[13].

	Parte 1: Funzionamento e disabilità		Parte 2: Fattori contestuali	
Componenti	Funzioni e strutture corporee	Attività e partecipazione	Fattori ambientali	Fattori Personali
Domini	Funzioni corporee Strutture corporee	Aree della vita (compiti, azioni)	Influenze esterne su funzionamento e disabilità	Influenze interne su funzionamento e disabilità
Costrutti	Cambiamenti nelle funzioni corporee (fisiologico) Cambiamento nelle strutture corporee (anatomico)	Capacità di eseguire compiti in un ambiente standard Performance Eseguire compiti nell'ambiente attuale	Impatto facilitante o ostacolante delle caratteristiche fisiche o sociali del mondo e degli atteggiamenti	Impatto delle caratteristiche della persona
Aspetto Positivo	Integrità funzionale e strutturale	Attività Partecipazione	Facilitatori	Non applicabile
	Funzionamento			
Aspetto Negativo	Menomazione	Limitazione dell'attività Limitazione della partecipazione	Barriere/Ostacoli	Non applicabile
	Disabilità			

Sempre in quest'ottica un'altra classificazione importante, la cui struttura è riassunta in Tabella 3, è quella fornita dalla scala *functional independence measure* (FIM) che misura l'indipendenza funzionale nelle persone con disabilità. Questa valutazione fa riferimento a temi come la capacità di prendersi cura di se stessi, il controllo degli sfinteri, mobilità, comunicazione e integrazione sociale. Distribuiti nei macro-temi indicati, vengono valutate 18 attività totali e il punteggio ottenibile dal soggetto varia da 18 a 126 punti in quanto per ogni elemento viene assegnato un punteggio da 1 a 7 ^[11]. Nello specifico 1 corrisponde alla necessità di assistenza completa da parte del soggetto, mentre 7 significa autosufficienza completa. I punteggi 1 e 2 vengono quindi assegnati ai soggetti che riescono ad eseguire meno del 50% delle attività e necessitano di assistenza continua, i punteggi da 3 a 5 ai soggetti che riescono a svolgere più del 50% delle funzioni e i punteggi più alti sono per i soggetti che riescono a svolgere l'attività con l'utilizzo di dispositivi o per un tempo limitato ma comunque senza bisogno di nessun aiuto esterno ^[11].

Tabella 3: Struttura della classificazione FIM ^[11].

Attività		Livelli di punteggio	Range di punteggio
Cura della persona 1 Nutrirsi 2 Rassettersi 3 Lavarsi 4 Vestirsi dalla vita in su 5 Vestirsi dalla vita in giù 6 Igiene perineale	Locomozione 12 Cammino-Carrozzina 13 Scale	7 Autosufficienza completa 6 Autosufficienza con adattamenti/ ausili 5 Supervisione/Adattamenti 4 Assistenza minima 3 Assistenza moderata 2 assistenza intensa 1 Assistenza completa	Motorio (temi 1-13): 13-91
			Cognitivo (temi 14-18): 5-35
			Totale (temi 1-18): 18-126
Controllo sfinterico 7 Vescica 8 Alvo	Comunicazione 14 Comprensione 15 Espressione		
Mobilità(trasferimenti) 9 Letto-sedia-carrozzina 10 W.C 11 Vasca o doccia	Capacità relazionali-cognitive 16 Rapporto con gli altri 17 Soluzione di problemi 18 Memoria		

Anche nel mondo dello sport per persone disabili gli atleti sono sottoposti ad una classificazione a tutti gli effetti basata sul funzionamento, in quanto più che sull'origine o tipologia della disabilità il focus è puntato sull'impatto che la stessa ha sull'esecuzione dello specifico sport. La classificazione viene eseguita allo scopo di garantire una concorrenza equa, in modo tale che la vittoria di un atleta venga determinata dalla sua preparazione, dalla sua potenza, resistenza, dalla sua abilità e dalla sua capacità tattica e di concentrazione ^[14]. In generale il raggruppamento degli atleti in base al loro grado di limitazione funzionale derivante dalla disabilità è chiamato "Classe Sportiva" ^[14]. Attraverso la classificazione, viene stabilito se gli atleti siano idonei o meno a competere in uno sport paralimpico e viene determinata la classe sportiva di appartenenza ^[15]. Nel caso specifico del nuoto, all'interno delle classi sportive vi è poi una differenziazione in base allo stile della gara: si identificano con la lettera "S" lo stile libero, dorso e farfalla, con "SB" lo stile rana e infine con "SM" gli eventi misti ^[15].

Il nuoto paralimpico si rivolge a tre gruppi di disabilità: fisica, visiva ed intellettiva/relazionale. In base al tipo di disabilità l'atleta viene sottoposto ad una specifica valutazione che porterà all'assegnazione della classe sportiva ^[15].

Per quanto riguarda l'assegnazione alle classi sportive riservate agli atleti con disabilità fisica (categoria nella quale rientrano soggetti che abbiano almeno una disabilità tra potenza muscolare ridotta, carenza di arti, differenza di lunghezza delle gambe, bassa statura, ipertonica, atassia o atetosi), la valutazione consiste di tre parti: una valutazione fisica, una valutazione tecnica e una valutazione data dall'osservazione durante la competizione. Quest'ultima è effettuata solo nei casi l'esaminatore non ritenga le prime due valutazioni sufficienti per l'inserimento dell'atleta in una classe ^[15]. Ogni sezione delle valutazioni è pensata per produrre un punteggio e la somma dei punteggi di ogni sessione definirà il punteggio totale dell'atleta e determinerà la sua classe di appartenenza. In particolare, la scala di punteggio è costituita in modo tale che ad un maggior punteggio corrisponda una minore limitazione all'attività data dalla disabilità ^[15].

La valutazione fisica consiste di uno o più test a seconda dell'atleta e della sua disabilità. I principali test che possono essere svolti sono : un test muscolare, un test di coordinamento che consiste nell'esecuzione di determinati movimenti a velocità variabile, un test che misura la gamma funzionale passiva del movimento utilizzando una serie di misurazioni progettate per valutare l'estensione del movimento possibile

in un numero di articolazioni, ed infine test che misurino in centimetri la carenza/perdita di un arto o la differenza di lunghezza tra le gambe o la statura dell'atleta (per valutare la condizione di nanismo) ^[15].

Solo nel caso in cui il soggetto abbia acquisito almeno 15 punti nella parte di valutazione fisica si procede alla valutazione tecnica ^[15].

Questa valutazione, che si svolge in acqua, ha lo scopo di determinare in maniera specifica l'impatto della disabilità nei diversi stili di nuoto. In particolare, viene valutata la capacità dell'atleta di generare propulsione durante la nuotata includendo la capacità di cambiare ritmo, la capacità di controllare il proprio corpo durante il movimento (anche a livello di singoli segmenti corporei con particolare attenzione alla capacità di spinta con le gambe) e la capacità di controllare la respirazione. Infine, vengono valutati anche partenza e virata ^[15].

Il punteggio ottenuto nella valutazione tecnica, sommato a quello ottenuto nella valutazione fisica (e, se effettuata, all'osservazione durante la competizione) divide gli atleti nelle varie classi secondo quanto riportato in Tabella 4.

L'assegnazione in una classe mista (SM) dipende dalla classe S o SB di appartenenza e il risultato del calcolo, se necessario, viene arrotondato all'intero successivo più grande.

Le classi da S (o SB) da 11 a 13 sono invece destinate agli atleti soggetti da disabilità visiva. L'appartenenza ad una classe piuttosto che ad un'altra in questo caso viene valutata in base al risultato ottenuto con il grafico LogMAR per l'acuità visiva e/o in base al diametro del campo visivo ^[15].

Una sola classe (S14) è destinata invece agli atleti con disabilità relazionale o intellettiva. In questo caso l'atleta viene sottoposto ad una serie di test volti a valutare quattro differenti componenti della cognizione sportiva: velocità di elaborazione e concentrazione; memoria e apprendimento; funzionamento esecutivo; e percezione visiva e fluida intelligenza. Anche in questo caso se necessario può essere aggiunta una valutazione basata sull'osservazione durante una competizione ^[15].

*Tabella 4: Classi sportive sulla base dei punteggi ottenuti nelle valutazioni.
Ad un maggior punteggio corrisponde un minore impatto della disabilità sulla disciplina.
S: stile libero, dorso, farfalla. SB: rana ^[15].*

Classe sportiva	Punteggio	Classe sportiva	Punteggio
S1	≤65	SB1	≤65
S2	66-90	SB2	66-90
S3	91-115	SB3	91-115
S4	116-140	SB4	116-140
S5	141-166	SB5	141-166
S6	166-190	SB6	166-190
S7	191-215	SB7	191-215
S8	216-240	SB8	216-240
S9	241-265	SB9	241-275
S10	266-285		

3.2 Aspetti motori

L'attività fisica in generale presenta numerosi vantaggi ed è ritenuta fondamentale nella vita delle persone disabili. Il nuoto in particolare è fortemente consigliato per soggetti che abbiano disabilità fisiche quali ad esempio mancanza di controllo muscolare e dei movimenti (atassia, ipertonìa, atetosi che possono essere causati da paralisi cerebrale), carenza muscolare (partendo dalla distrofia muscolare fino ad arrivare a soggetti tetraplegici o paraplegici per via di una lesione alla colonna vertebrale), o anche parziale o totale assenza di arti ^{[16][17]}. Ciò è dovuto al fatto che un'attività svolta in acqua, per via delle caratteristiche di galleggiamento di quest'ultima, sarà facilitata nei movimenti e sovraccaricherà muscoli e articolazioni (più deboli o fragili rispetto ad un soggetto normodotato) in maniera minore rispetto alla maggior parte delle attività aerobiche svolte su terra, le quali sono di difficile esecuzione per le persone con disabilità fisiche ^[18]. Inoltre, la resistenza idrodinamica offerta (drag) rende molto difficile svolgere esercizi oltre il limite massimale di sopportazione corporeo e perciò si avrà una bassa probabilità di infortuni a fronte però di un ottimo rinforzo muscolare, con ripercussioni positive su mobilità, equilibrio e respirazione.

Come affermato quindi, una prima platea di persone a cui è fortemente consigliata l'attività natatoria è quella dei soggetti che hanno subito una paralisi cerebrale (CP). Questa forma di disabilità, che colpisce soprattutto i bambini, è conseguenza di un danno o disfunzione cerebrale e porta a disturbi neuromuscolari o muscoloscheletrici come tono muscolare anormale, controllo muscolare anormale (con conseguenti spasmi o movimento rallentati), deformazioni ossee, disturbi dell'equilibrio e perdita del controllo motorio selettivo ^{[16][17]}. Il nuoto viene utilizzato in questo caso con lo scopo di mantenere o aumentare il range di movimenti possibili, per rafforzare i muscoli deboli e per rieducare i muscoli paralizzati ^{[16][17]}. Inoltre, il trasferimento di calore nell'acqua risulta notevolmente maggiore che nell'aria (l'acqua può mantenere una temperatura di 32 °C) e ciò diminuisce la spasticità e altri movimenti involontari che contraddistinguono tale patologia aiutando anche a ridurre il dolore ^[17]. Il nuoto nei soggetti con CP, oltre ad essere utilizzato per migliorare le capacità vitali generiche come il mangiare e il parlare, viene anche utilizzato per migliorare la respirazione (funzione che in questi casi è solitamente ridotta per via dei problemi muscolari sopra citati) sfruttando l'azione benefica della pressione idrostatica sui polmoni e sui muscoli

respiratori che si trovano ad essere rinforzati ^[17]. Altro fattore di miglioramento della respirazione è la correzione di posture errate, sempre tramite rinforzo muscolare, le quali vanno ad inficiare negativamente sull'attività respiratoria ^[17].

Il miglioramento della respirazione è fondamentale anche in soggetto affetti da forme di carenza muscolare gravi come la distrofia muscolare di Duchenne (DMD).

La DMD è una miopatia recessiva genetica legata al cromosoma X che colpisce quasi esclusivamente soggetti maschili (in quanto caratterizzati dalla presenza di un solo cromosoma X e quindi con patologia non compensabile come nel caso dei soggetti femminili) e che si verifica a causa di un problema con il gene che produce la distrofina ^[18]. Senza distrofina, una proteina fibrillare del citoscheletro muscolare, le cellule muscolari si danneggiano e muoiono portando a rottura le singole fibre muscolari con ripercussione poi su tutti i muscoli presenti nel corpo umano che saranno quindi indeboliti ^[18].

La malattia tende a progredire piuttosto velocemente e quindi un bambino con DMD è di solito confinato su una sedia a rotelle già dall'età di 12 anni. La maggior parte dei pazienti con DMD poi, muore nella tarda adolescenza o all'inizio dei vent'anni proprio a causa dell'indebolimento dei muscoli respiratori e del diaframma. Un rafforzamento, perciò di questi muscoli tramite il nuoto, uno dei pochi sport praticabili da questi soggetti, ha quindi proprio l'effetto di allungare loro l'aspettativa di vita ^[18].

Altra forma di carenza muscolare, in questo caso però derivante da trauma, è quella relativa a lesioni del midollo spinale (SCI) che tipicamente porta a paralisi degli arti inferiori. A seconda della gravità di tale lesione, si avrà una limitazione delle funzioni motorie e sensoriali al di sotto del livello vertebrale in cui si è verificato il trauma con conseguente limitazione della mobilità generale e indebolimento della salute ^[19].

Il nuoto viene raccomandato per questi soggetti, oltre che per gli aspetti già citati riguardanti il rinforzo muscolare e riduzione della spasticità, anche per prevenire disturbi secondari e piaghe da decubito in quanto si permette al soggetto di non sostare temporaneamente sopra la sedia a rotelle ^[11]. Inoltre, grazie alla turbolenza data dall'acqua durante il movimento in essa, si avrà anche un effetto di diminuzione del gonfiore degli arti ^[19].

Per i soggetti con SCI il nuoto viene anche utilizzato come vera e propria forma di riabilitazione con lo scopo di migliorare la funzionalità motoria e l'indipendenza funzionale. Facendo riferimento, infatti, alla scala FIM precedentemente introdotta, è stato dimostrato da Corte Real da Silva et al. che un programma di nuoto costituito

da due allenamenti a settimana in un range temporale di 4 mesi influisce positivamente sulla funzionalità dei soggetti con SCI più di un semplice programma di riabilitazione ^[11]. I nuotatori hanno presentato infatti, al termine del periodo specificato, aumenti significativi nei punteggi relativi alle capacità di cura del corpo (compreso il bagno e di vestire la parte inferiore del corpo), trasferimenti (compreso letto-sedia-carrozzina, bagno, vasca o doccia), punteggio motorio complessivo e punteggio complessivo. In particolare, questi ultimi 3 aspetti sono risultati migliori rispetto a quelli riportati dai soggetti che hanno svolto un programma di sola fisioterapia ^[11].

L'attività natatoria ha portato quindi ad una massimizzazione della funzionalità residua del sistema motorio e ad una ottimizzazione dei tempi e delle energie spese nello svolgimento delle attività quotidiane ^[11].

Infine, il nuoto è uno degli sport più facilmente praticabili per persone che abbiano subito l'amputazione di un arto a causa di un incidente o di una patologia grave che necessiti della rimozione della zona interessata (tumore, cancrena). Tali amputazioni, che possono essere sia degli arti inferiori che degli arti superiori, a seconda che siano al di sopra o al di sotto dell'articolazione, possono limitare fortemente la mobilità e le funzionalità quotidiane e di conseguenza anche il range di attività svolgibili da tali soggetti, nonostante l'utilizzo di vari dispositivi di ausilio come le protesi ^[20].

Per via delle caratteristiche sopra citate dell'ambiente acquatico invece, il nuoto è un'attività che può essere facilmente svolta da questi soggetti anche senza l'utilizzo di tali strumenti (anche se naturalmente ciò renderà più difficoltosa coordinazione e propulsione), consentendo quindi loro di poter usufruire di tutti i benefici sulla salute che tale attività offre in piena libertà ^[20].

3.3 Benefici psichici del nuoto

Gli effetti benefici delle attività sportive, ed in particolare del nuoto, praticate regolarmente sulla salute generale, sulla prevenzione di numerose malattie e sul benessere fisico, psicologico e sociale sono intensamente promossi e pubblicizzati nella società moderna ^[21].

In particolare, i benefici psicologici e sociali risultano molto più importanti per le persone affette da menomazioni fisiche o disturbi intellettivi rispetto ai normodotati ^[21]. È universalmente riconosciuto infatti come il nuoto riduca l'ansia e i sintomi della depressione, aumenti l'ottimismo e l'autostima (fattore fondamentale per il benessere psicologico in quanto riflette fiducia e confidenza nelle proprie capacità e valore) e aiuti a costruire una forte e positiva relazione con altre persone se svolto in gruppo, migliorando così anche la capacità di interazione sociale generale delle persone disabili ^[21].

Tali benefici elencati migliorano poi considerevolmente, soprattutto nei giovani, se il nuoto viene praticato a livello agonistico. Le caratteristiche emotive, motivazionali e sociali dell'ambiente agonistico possono fornire infatti un prezioso contributo al benessere psicologico individuale delle persone. La competizione fornisce all'atleta un obiettivo da raggiungere e lo spinge a non autocommiserarsi sulle sue condizioni ma a lavorare per superare i propri limiti favorendo quindi anche l'accettazione della patologia. Anche una sconfitta in questo caso avrà molti aspetti positivi in quanto, essendo causata un suo "pari", porterà l'atleta ad una maggiore volontà di miglioramento ^[21].

I benefici riportati dal nuoto sulla sfera psichica hanno trovato giustificazione anche scientifica in quanto è stato dimostrato che il nuoto, soprattutto se svolto in acqua fredda, favorisce il rilascio di beta-endorfine, dopamina e serotonina, ormoni che sono solitamente inibiti dalla risposta infiammatoria conseguente ai sintomi della depressione che colpisce molte persone disabili e che invece sono fondamentali per il benessere mentale ^[22].

Nel caso di bambini e adolescenti con paralisi cerebrale, il nuoto porta giovamento anche nel profilo biopsicosociale per l'influenza positiva che tale attività ha nei confronti dei disturbi da deficit di attenzione. Tale sindrome, oltre ad avere impatti negativi sulle capacità motorie quali coordinazione e controllo motorio fine e globale,

inficia anche sulla scrittura e sull'apprendimento della lingua e quindi un miglioramento delle condizioni in questo senso può portare ad un maggiore inserimento sociale [23].

In generale poi, una volta sperimentati nell'ambiente sportivo, gli atleti sono portati ad estendere gli insegnamenti, i benefici e il loro nuovo atteggiamento positivo anche nella vita di tutti i giorni, aumentando sostanzialmente la loro qualità di vita [21].

Gli aspetti fin qui citati sono particolarmente importanti nel caso di soggetti caratterizzati da disturbi cognitivi quali disturbi dello spettro autistico (ASD). Si ritiene che il nuoto nei bambini con ASD faciliti lo sviluppo del linguaggio e l'autoconsapevolezza, migliori il rendimento scolastico, il comportamento adattivo (in quanto si impara ad utilizzare al meglio il proprio corpo e a ridurre di conseguenza i movimenti stereotipati e ristretti che caratterizzano tale patologia) e fornisca un ambiente appropriato per un primo intervento educativo [24].

L'acqua, inoltre, semplifica la gestione degli aspetti emotivi, aumenta il contatto oculare e quindi riduce la tendenza all'isolamento sociale tipica dei soggetti autistici [24][25]. Un'attività sportiva quale il nuoto viene quindi fortemente consigliata in associazione agli interventi riabilitativi, abilitativi ed educativi nei soggetti affetti da ASD [25].

3.4 Aspetti cardiovascolari

Il nuoto è stato riconosciuto essere un'opzione efficace per il mantenimento e il rafforzamento del fitness cardiovascolare ^[26].

È stato dimostrato infatti che nuotare previene disturbi dovuti alla pressione bassa, migliora l'ossigenazione del sangue e soprattutto in generale la circolazione, grazie alla pressione idrostatica a cui è sottoposto il corpo immerso nell'acqua e anche grazie all'effetto turbolenza che si crea durante la nuotata ^{[26][27]}.

Questi aspetti sono fondamentali soprattutto per quei soggetti che soffrono di carenze muscolari come persone che hanno riportato lesioni alla spina dorsale o hanno subito una paralisi cerebrale le quali, come già affermato e qui nuovamente confermato, trarranno maggiormente beneficio dal praticare questo sport rispetto ad altri.

L'immersione in acqua sottopone il corpo all'azione di forze compressive che portano ad un aumento della pressione nei vasi di capacità (grosse vene), provocando così uno spostamento di volume di sangue nella cavità toracica. Tale spostamento aumenta il ritorno venoso (favorito anche dalla posizione orizzontale che assumono i nuotatori e dal movimento delle gambe utilizzato per la propulsione) facendo quindi sì che venga fornito un carico di sangue maggiore ai ventricoli destro e sinistro con conseguente maggiore pressione di riempimento delle cavità cardiache ^[26].

In accordo poi con la legge di Starling, il volume sistolico (o gittata sistolica, ovvero la quantità di sangue pompata da un ventricolo ad ogni sistole ventricolare) aumenta fino a 75-120 cc con un conseguente incremento pari al 30-60% della gittata cardiaca ^[26]. Tale legge infatti spiega la regolazione eterometrica del cuore, ovvero la sua capacità, dovuta alle caratteristiche elastiche dei vasi, di adattarsi a volumi variabili di afflusso sanguigno. In particolare, più il muscolo cardiaco sarà stirato (come nel caso di un aumento del volume di riempimento), maggiore sarà l'energia con cui questo si contrarrà, pompando così tutto il sangue nelle arterie.

Tale risultato è stato confermato anche tramite l'utilizzo della tonometria ad applanazione. Questa tecnica diagnostica ha evidenziato infatti come l'immersione in acqua produca un aumento dell'ampiezza e della durata delle onde di pressione aortica riflesse, risultato che è da mettere appunto in relazione ad un aumento del carico di lavoro ventricolare sinistro ^[26].

Questi risultati saranno favoriti da una minore temperatura dell'acqua in quanto temperature più alte indurranno una vasodilatazione con conseguente diminuzione di pressione media.

Nonostante la gittata sistolica sia maggiore rispetto ad altri sport aerobici, grazie alla posizione orizzontale assunta dal corpo la quale favorisce il ritorno venoso, il valore della frequenza cardiaca è in realtà minore [26][28][29]. Sono stati effettuati diversi studi su nuotatori normodotati (ad esempio DiCarlo et al. su 34 giovani atleti, o Magel et al. su 7 atleti) che hanno dimostrato, misurando i picchi di frequenza cardiaca nel nuoto e nella corsa su tapis roulant, come il suo valore massimo sia infatti inferiore in media di circa 15 battiti al minuto (bpm) rispetto a quello raggiunto in una corsa di durata temporale simile (figura 3) [26][28][29][30]. Tale differenza può essere osservata già dopo 40 secondi di attività ed inoltre aumenta se si prendono in esame nuotatori che non sono allenati specificatamente anche per la corsa [30].

Ciò potrebbe essere dovuto ancora una volta, come già detto, al maggiore riempimento diastolico dato dalla posizione supina assunta dal corpo ma anche agli effetti trascurabili della gravità di un corpo immerso in acqua e alla conseguente minore percezione del peso corporeo oltre che ai limitati aggiustamenti termoregolatori [26][28][29]. Anche in questo caso poi un ruolo importante potrebbe giocarlo la vasocostrizione periferica dovuta alla temperatura dell'acqua la quale aumenta il volume del sangue centrale e fa rallentare il cuore in modo riflessivo [28].

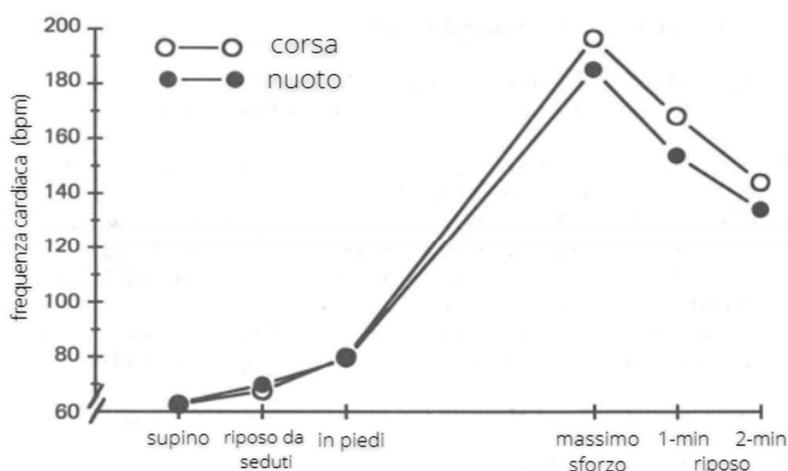


Figura 8: Picco di frequenza cardiaca nel nuoto e nella corsa su tapis roulant. In corrispondenza del massimo sforzo il valore di FC per il nuoto e per la corsa è rispettivamente 186 ± 10 e 197 ± 8 [28].

Un altro aspetto importante è che, grazie sempre all'immersione in acqua e alla conseguente pressione idrostatica, si riscontra anche un aumento della velocità media del sangue dell'arteria cerebrale media (MCV media) e ciò è stato suggerito essere un fattore positivo per i meccanismi di adattamento cerebrovascolare [27].

Nonostante le difficoltà dell'atto respiratorio e alla sua conseguente minore frequenza (tranne che nel caso del dorso dove il volto è sempre fuori dalla superficie dell'acqua) la saturazione dell'ossigeno nel sangue ha in generale lo stesso valore registrato durante la corsa [26][29].

Molti studi hanno poi dimostrato che nel nuoto anche il valore della richiesta massima di ossigeno (valore massimo di ossigeno che può essere consumato o VO_2max), è più basso dell'8-10% sempre rispetto ad altri esercizi aerobici [26][29][31][32]. Tramite l'utilizzo di uno spirometro sono stati registrati infatti in molti test valori più bassi di VO_2max in atleti sottoposti a prove di nuoto rispetto a prove di corsa e ciclismo [31][32]. Di nuovo ciò potrebbe essere dovuto alla posizione supina che assumono i nuotatori, la quale richiede minore consumo di ossigeno (circa 15%) rispetto alla posizione eretta in quanto meno gruppi muscolari devono essere utilizzati per mantenere tale posizione (minore dimensione della massa muscolare attiva) con conseguente minore consumo di ossigeno [26].

La massa muscolare utilizzata influisce anche comparando varie tecniche di nuoto. Ad esempio, nello stile libero nuotare utilizzando solo le braccia porta ad un consumo di ossigeno notevolmente minore rispetto all'esecuzione del movimento completo (figura 4) [29]. Vi è anche differenza tra i diversi stili in generale. Un maggiore consumo di ossigeno è infatti associato allo stile rana piuttosto che al dorso o allo stile libero [31]. Naturalmente, anche l'allenamento e la resistenza dell'atleta influiscono sulla capacità di poter sfruttare al meglio la respirazione [31].

Sebbene sia supportata da numerosi studi, tale tesi non è però condivisa da tutto il mondo scientifico. In particolare, tali risultati sono costanti e coerenti per quanto riguarda nuotatori non professionisti ma sono contraddittori per quanto riguarda atleti altamente allenati o d'élite [32]. In alcuni studi non sono state evidenziate infatti in realtà differenze sostanziali, ad esempio, tra nuoto e corsa nello stesso gruppo di soggetti mentre in altri studi la VO_2max registrata era persino maggiore nella prova di nuoto [26][31][32].

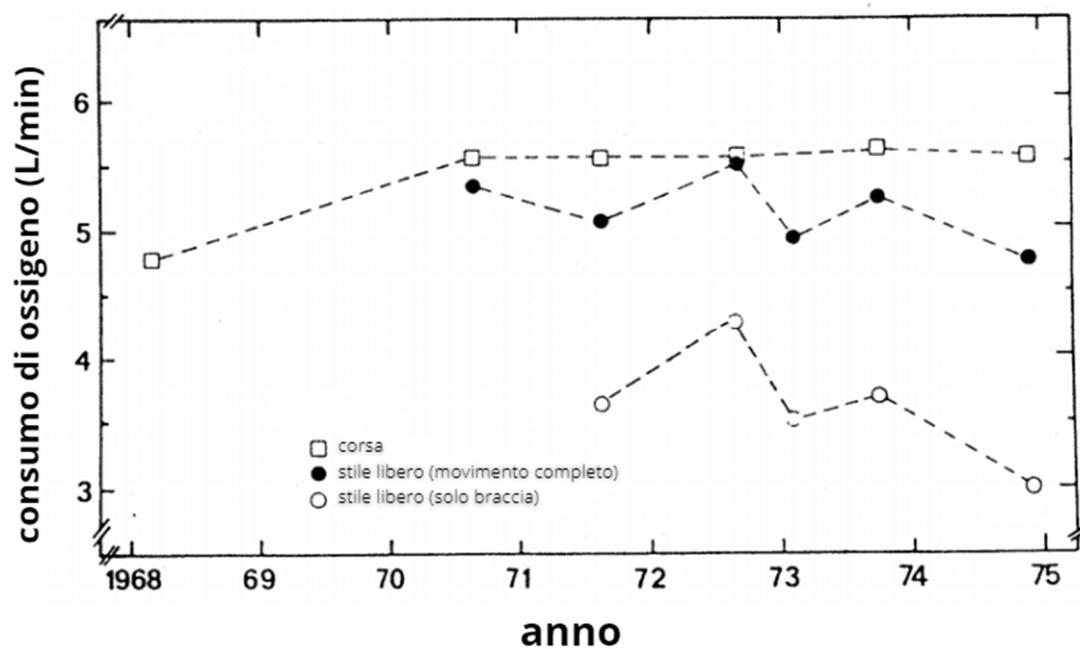


Figura 9: Consumo di ossigeno durante il massimo sforzo in tipologie differenti di esercizio riferito ad uno studio di 8 anni su una popolazione mondiale ^[29].

4. Monitoraggio durante l'allenamento in piscina

Di seguito vengono riportati 3 studi condotti su nuotatori con disabilità fisica nell'ambito di un allenamento in acqua. Tali studi (riassunti in tabella 5) differiscono tra loro per metodi utilizzati ma soprattutto per scopi, in quanto nel primo caso vengono analizzate parametrici biomeccanici, nel secondo parametrici cardiaci, e nell'ultimo studio riportato valori riguardanti la pura performance natatoria.

Tabella 5: Panoramica su studi presenti in letteratura effettuati durante un allenamento in piscina

Articolo	Popolazione	Metodo (strumenti, dati/segnali, indici/parametri)	Risultati
Symmetry in the front crawl stroke of different skill level of able-bodied and disabled swimmers ^[33]	21 nuotatori normodotati 20 nuotatori con disabilità fisiche e motorie	Registrazioni video della bracciata con telecamere Gopro Hero 4, Sony HQ-DNR-1, Sony HDR CX700. Calcolo dell'indice di simmetria	Asimmetria sia nei nuotatori normodotati che nei nuotatori disabili
Daily heart rate variability of Paralympic gold medallist swimmers: A 17-week Investigation ^[34]	1 nuotatore paralimpico con disabilità neuromuscolare 2 nuotatori paralimpici con amputazione	Registrazione della frequenza cardiaca con cintura Suunto Memory e valutazione HRV	Costanza negli indici di HRV nel periodo indicato rispetto ad atleti normodotati ma variazioni in base alla tipologia di disabilità
Supporting front crawl swimming in paraplegics using electrical stimulation: a feasibility study ^[19]	2 nuotatori con lesione a livello Th5/6 e conseguente paralisi degli arti inferiori	Stimolazione elettrica funzionale degli estensori del ginocchio e stimolazione transcutanea del midollo spinale. Stimolatore RehaMove3, Hasomed GmbH. Elettrodi Axelgaard Manufacturing Co. Ltd Media del tempo di percorrenza di 16m con lo stile crawl	Riduzione del tempo medio fino al 19,3% / 20,9% utilizzando contemporaneamente entrambi i metodi di stimolazione

Studio 1: “Symmetry in the front crawl stroke of different skill level of able-bodied and disabled swimmers”

Sebbene il nuoto sia apparentemente uno sport simmetrico, soprattutto nel caso dello stile libero che viene eseguito tramite l'alternarsi delle braccia, la simmetria tra i lati del corpo non è garantita. Sono state osservate, infatti, asimmetrie della cinetica, della coordinazione delle braccia e del rollio delle spalle e dell'anca. Tali asimmetrie possono essere correlate a deficit del controllo motorio, dominanza di un braccio rispetto all'altro o fattori associati alla tecnica di respirazione e alla posizione della testa [33].

L'università di Brasilia in collaborazione con la Manchester Metropolitan University ha sviluppato quindi un test per valutare l'effettiva simmetria della coordinazione temporale nelle fasi della bracciata nello stile libero e le relative caratteristiche dimensionali tra nuotatori di diversi livelli di abilità e nuotatori disabili.

Per tale test sono stati selezionati 41 nuotatori di ambo i sessi, di cui 21 normodotati e 20 con menomazioni fisiche e disabilità motorie, che praticassero nuoto agonistico da almeno tre anni [33].

In particolare, gli atleti disabili (9 brasiliani e 11 britannici) rientravano nelle classi sportive da S5 a S10 definite dal Comitato Paralimpico Internazionale e avevano almeno un deficit tra amputazione a livello del gomito, paralisi cerebrale, artrogriposi, amputazione della gamba doppia a livello del ginocchio, malformazione congenita, nanismo e spina bifida [33].

Per quanto riguarda i nuotatori normodotati, questi invece sono stati divisi in due gruppi in base al livello di abilità definito tramite i record personali degli atleti. Tali gruppi sono stati chiamati G1 (gruppo ad alto livello di abilità) e G2 (gruppo a basso livello di abilità) e comprendevano rispettivamente 11 e 10 partecipanti al test.

Dopo aver raccolto dati antropometrici, informazioni relative alla dominanza delle braccia e preferenze sul lato su cui effettuare la respirazione, agli atleti è stato chiesto per il test di nuotare alla massima velocità per 50m [33].

La performance è stata registrata grazie all'utilizzo di sei videocamere, di cui quattro posizionate sott'acqua e due sopra. Le telecamere erano sincronizzate tra loro tramite un impulso luminoso. Le videocamere utilizzate per la registrazione subacquea dei nuotatori normodotati e disabili brasiliani erano Gopro Hero 4 (con frequenza di acquisizione delle immagini a 60 Hz), mentre i nuotatori disabili britannici sono stati registrati da telecamere Sony HQ-DNR-1 (50Hz), collegate a un dispositivo di

visualizzazione video (GV-HD700). Due videocamere sono state posizionate diagonalmente sul lato destro del nuotatore e due sul lato sinistro, con angoli approssimativi di 90 ° tra loro. Per le registrazioni di superficie sono state invece utilizzate camere Sony HDR CX700 (30Hz) [33].

Come riferimento sono stati disegnati, con pennarello resistente all'acqua, marker sferici di 25mm di diametro sulla falange distale del terzo metacarpo e su entrambi i trocanteri femorali. Sono stati utilizzati anche marker a luci led fissati su appositi costumi da nuoto realizzati per lo studio [33].

Le coordinate bidimensionali dei marker ricavate dalle telecamere sono state filtrate a 7 Hz utilizzando un filtro Butterworth passa-basso (2° ordine) e poi convertite in coordinate tridimensionali utilizzando un algoritmo DLT [33].

Scopo delle misurazioni era quello di calcolare l'indice di simmetria (SI), per determinare la simmetria di coordinazione (Eq. 3). Piccole differenze di forza tra i lati del corpo sono state considerate accettabili e fisiologiche, tuttavia, differenze maggiori del 10% sono state considerate asimmetrie funzionali. In particolare, risultati negativi indicavano asimmetria a sinistra, mentre risultati positivi asimmetria a destra [33].

$$SI = \left(\frac{(Variabile_{destra} + Variabile_{sinistra})}{0.5(Variabile_{destra} + Variabile_{sinistra})} \right) \times 100 \quad (Eq.3)$$

SI è stato calcolato, relativamente alle variabili cinematiche riassunte in tabella 5 (con relativi risultati), considerando un ciclo di bracciate complete scandite dalla fase subacquea, divisa in downsweep (dall'entrata in acqua dell'arto superiore alla posizione più laterale), insweep (dalla fine del downsweep alla posizione mediale) e upsweep (dalla fine della sezione di fase subacquea precedente all'uscita dell'arto dall'acqua), e dalla successiva fase esterna di recupero. I confronti sono stati effettuati utilizzando i test non parametrici di Kruskal-Wallis e di Mann-Whitney, scopo dei quali è verificare se due indicatori statistici provengono dalla stessa popolazione [33].

In generale i nuotatori hanno mostrato asimmetria nelle ampiezze anteroposteriore e mediolaterale della bracciata, nell'indice di coordinazione, nelle 4 fasi (downsweep, insweep, upsweep e recupero) e nella velocità della prima fase della parte subacquea, indipendentemente dal livello di abilità o dalla menomazione. Solo relativamente alla velocità della fase di insweep l'asimmetria riscontrata nel gruppo di nuotatori disabili è stata maggiore di quella degli altri gruppi (tabella 5) [33].

Pertanto, è stata solo parzialmente confermata l'iniziale ipotesi secondo cui i nuotatori disabili avrebbero le asimmetrie maggiori (le quali però è stato verificato aumentavano

all'aumentare della gravità della disabilità). L'ipotesi che il livello di abilità influenzi la simmetria tra i movimenti eseguiti dai segmenti della parte superiore del corpo non è stata invece confermata [33].

Tali indagini sulla simmetria sono importanti per fornire una solida base per l'orientamento all'allenamento compensatorio volto a prevenire infortuni (come lesioni dell'articolazione della spalla) e per rispondere alle asimmetrie eccessive. Inoltre, un orientamento adeguato può ridurre il rischio di affaticamento prematuro da parte di uno dei segmenti corporei e può portare a prestazioni migliori [33].

Tabella 6: Confronto della percentuale di asimmetria nelle variabili di nuoto tra gruppi di alto livello di abilità (G1), basso livello di abilità (G2) e nuotatori disabili (G3). I valori sono presentati come mediane e scarti interquartile (1° e 3°) [33].

	G1 (11)	G2 (10)	G3 (14)	p
Ampiezza antero-posteriore	17,4 * (9,50–25,00)	10,49 * (7,37–15,44)	14,82 * (12,63–19,81)	0.24
Ampiezza mediolaterale	27,05 * (20,60–32,53)	26,01 * (16,01–35,16)	37,43 * (23,06–42,55)	0.22
Ampiezza verticale	6,78 (3,57–7,91)	9,68 (6,69–11,60)	9,31 (4,24–14,36)	0.22
Traiettoria della corsa	8,26 (3,90–11,35)	4,65 (2,12–9,67)	3,22 (1,42–13,83)	0.32
	G1 (11)	G2 (10)	G3 (20)	
Fase subacquea	6,99 (1,74–9,625)	2,74 (2,47–8,19)	5,76 (4,25–8,72)	0.42
Fase di recupero	15,28 * (3,22–23,01)	11,57 * (4,39–18,80)	14,90 * (9,17–21,00)	0.42
Indice di coordinamento	52,63 * (28,57–166,67)	60,00 * (33,33–88,89)	88,37 * (58,82–166,66)	0.57
Downsweep	16,64 * (9,66–42,67)	30,75 * (17,22–41,05)	23,14 * (11,43–46,21)	0.71
Insweep	19,88 * (7,32–27,05)	13,36 * (5,97–23,03)	15,64 * (6,45–24,82)	0.84
Upsweep	16,31 * (5,63–37,925)	15,58 * (11,65–33,11)	21,64 * (10,39–69,48)	0.63
Velocità di downsweep	15,91 * (5,58–20,37)	15,46 * (9,00–25,74)	12,36 * (2,86–24,89)	0.45
Velocità di insweep	3,86 (1,12–16,16)	5,15 (1,53–7,86)	11,89 * ^a (9,390–28,25)	0.04
Velocità di upsweep	9,96 (5,97–13,51)	8,22 (7,32–11,76)	11,88 * (5,45–22,63)	0.59
Velocità fase subacquea	5,79 (0,83–9,13)	4,76 (3,06–6,29)	6,13 (2,56–10,01)	0.64
* Asimmetria bilaterale ^a Differenza rispetto G1 p Confronto tra asimmetrie di gruppo				

Studio 2: “Daily heart rate variability of Paralympic gold medalist swimmers: A 17-week investigation”

Una delle tematiche più difficili riguardanti l'allenamento di un nuotatore agonista è la determinazione del giusto equilibrio tra fasi di allenamento intensivo e di recupero (inteso come allenamento con carico di lavoro basso o tapering) in prossimità di gare. Uno strumento utile in questo senso si è dimostrato essere lo studio dell'*heart rate variability* (variabilità del ritmo cardiaco o HRV) [34]. Gli indici di variabilità del ritmo cardiaco forniscono, come già indicato, informazioni in maniera non invasiva, sulla modulazione automatica del cuore [35]. Determinati in tempo o in frequenza, tali indici sono infatti correlati e riflettono le variazioni degli stimoli del sistema nervoso autonomo (parasimpatico e simpatico) il quale svolge azione di controllo sul cuore permettendogli di adattarsi a varie situazioni [35].

Precedenti studi avevano già dimostrato come le fluttuazioni nella regolazione autonoma cardiaca e nell'HRV diminuiscano con periodi di intenso allenamento e competizione e aumentino durante la fase di tapering negli atleti d'élite [34].

Edmonds et al. ha voluto verificare se tale analisi e tali risultati fossero validi anche per atleti disabili in quanto, in generale, essi hanno programmi di allenamento simili ai nuotatori normodotati [34].

Sono stati perciò selezionati 3 nuotatori paralimpici, già vincitori di medaglie d'oro nelle rispettive categorie nei 200m, selezionati per i Giochi Paralimpici di Londra 2012 per un programma di studio di 17 settimane immediatamente prima di tale evento. L'atleta 1 era affetto da disabilità neuromuscolare dovuta a paralisi cerebrale e gareggiava nella categoria paralimpica S10 mentre i restanti due avevano subito l'amputazione di un arto e rientravano rispettivamente nella categoria SM10 e S8. Durante il periodo di analisi l'allenamento degli atleti comprendeva fasi focalizzate sulla velocità (km ridotti e maggiore intensità), sulla parte aerobica (maggiori distanze e intensità ridotta) e sulla qualità (un mix di velocità e aerobico, concentrandosi su ritmo e allenamenti specifici per la gara) oltre che fasi di tapering ma anche di riposo [34].

Ad ogni nuotatore è stata misurata giornalmente al risveglio la frequenza cardiaca (FC) tramite una cintura Suunto Memory per un periodo di 10 minuti durante il quale il soggetto era in posizione supina. Tali misurazioni sono state registrate e da esse gli intervalli RR necessari allo studio dell'HRV sono stati esportati sul software Kubios HRV sviluppato dall'università di Kuopio, Finlandia, il quale ha permesso l'analisi della FC media, della radice della differenza quadratica media di intervalli RR successivi

(RMSSD), della potenza totale (ms^2), delle unità normalizzate ad alta frequenza (HF (nu)) e dell'esponente di ridimensionamento frattale a breve termine (α_1) [34]. I dati sono stati analizzati nel tempo utilizzando un'analisi della varianza unidirezionale (ANOVA) e confronti a coppie "post hoc" con una correzione di Bonferroni. Tutti i dati HRV sono stati esaminati per ogni atleta utilizzando i valori medi giornalieri, settimanali e della fase di allenamento per tutte le variabili ed espressi poi come media (intervallo di confidenza al 95%) con un livello α di $p < 0,05$ identificato per tutte le analisi [34].

Per quanto riguarda l'analisi intraindividuale, una differenza significativa nell'HRV è stata osservata per l'atleta 1 (disabilità neuromuscolare) durante la fase di allenamento di qualità [34].

Come si può osservare dalla Figura 5, la FC media (bpm) e α_1 erano infatti significativamente inferiori durante questa fase di allenamento rispetto alle fasi di tapering e velocità. Tutte le misure degli indici di HRV riportate erano invece simili per gli atleti 2 e 3 (amputazioni) in tutte le fasi di allenamento durante il periodo di monitoraggio [34].

Quando analizzate come una media settimanale di 7 giorni, inoltre, tutte le misure di HRV riportate escludendo la potenza totale, per l'atleta 1 erano diverse durante la settimana 4 rispetto a tutte le altre settimane. Quando poi sono stati effettuati confronti nell'HRV tra tutti i partecipanti al test, tutti gli indici HRV misurati nelle fasi di allenamento erano significativamente diversi per l'atleta 1 rispetto agli atleti 2 e 3 [33]. In particolare, la FC media e α_1 sono risultate essere più alte per l'atleta con disturbi neuromuscolari. Tali differenze si sono mantenute per tutta la durata del monitoraggio (figura 6) [34].

In generale però, tranne, come affermato, nel caso dell'allenamento di qualità dell'atleta 1, a livello individuale nessuna differenza significativa è stata trovata durante il periodo di monitoraggio. Al contrario di quanto precedentemente riscontrato nei nuotatori normodotati, in questo caso gli atleti hanno risposto in modo più o meno costante alla combinazione di allenamento, tapering e riposo con l'attività cardiaca autonoma tornando a valori simili al basale entro il giorno di allenamento successivo [34].

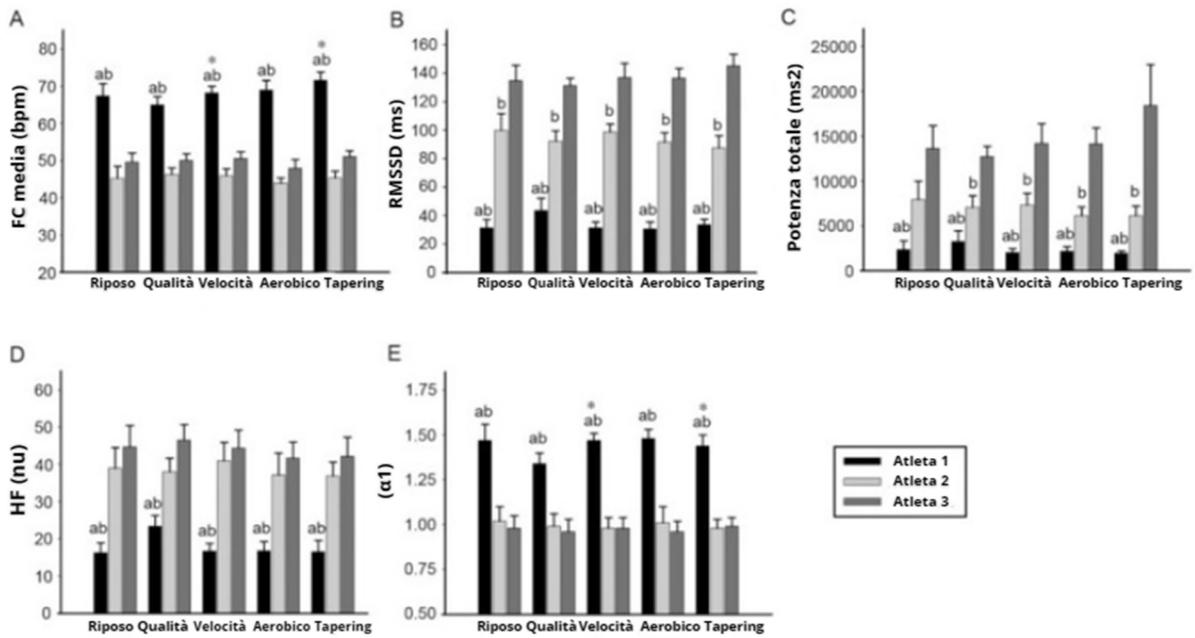


Figura 10: Variabilità della frequenza cardiaca individuale.

^a $p < 0.05$ rispetto all'atleta 2, ^b $p < 0.05$ rispetto all'atleta 3, * $p < 0.05$ rispetto alla fase di qualità [34]

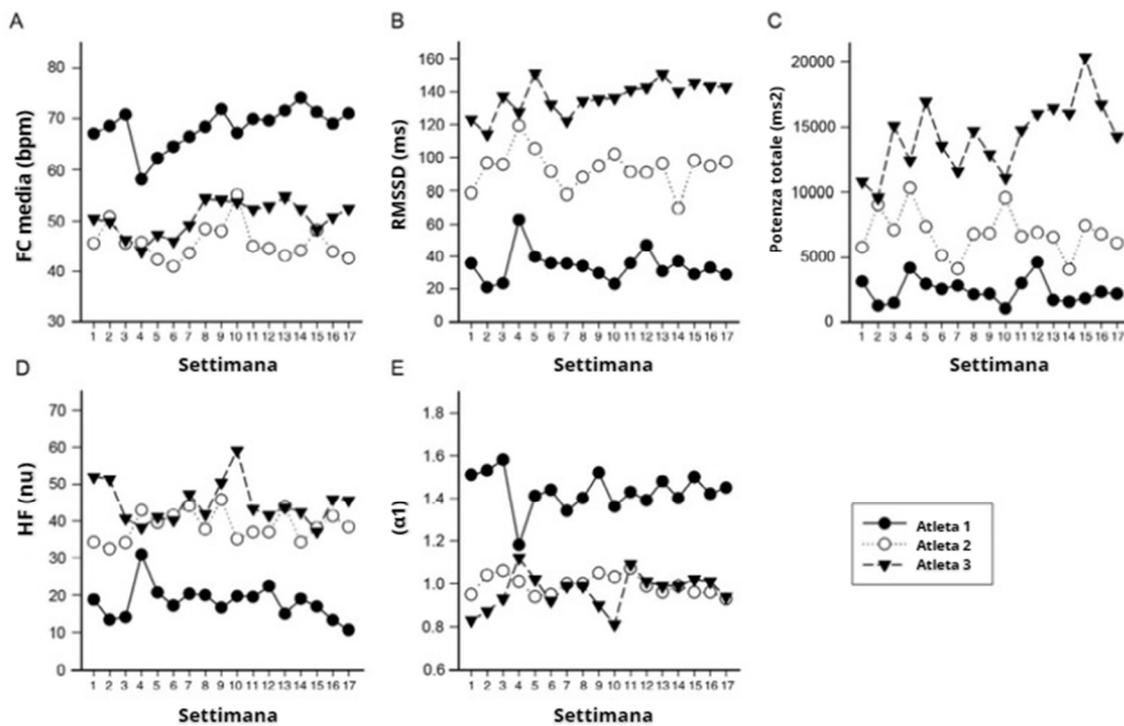


Figura 11: Variabilità individuale della frequenza cardiaca nel periodo di monitoraggio di 17 settimane. I valori sono espressi come media settimanale di ogni variabile [34].

Questo studio ha evidenziato però, per la prima volta, una differenza significativa nell'HRV tra i nuotatori paralimpici con diverse disabilità e le classificazioni del nuoto paralimpico. I dati relativi all'atleta 1 possono suggerire una dominanza del controllo simpatico sulla FC per i soggetti con disturbi neuromuscolari rispetto, ad esempio, ad atleti con amputazioni. Questa nuova scoperta potrebbe evidenziare un importante controller fisiologico dell'HRV negli atleti paralimpici con disabilità neuromuscolare ^[34].

Studio 3: “Supporting front crawl swimming in paraplegics using electrical stimulation: a feasibility study”

Nell’ottica invece di voler migliorare le prestazioni di nuoto di atleti con SCI, Wiesener et al ha proposto un metodo di allenamento ibrido che combina la stimolazione elettrica funzionale (FES) degli estensori del ginocchio e la stimolazione transcutanea del midollo spinale (tSCS) con lo stile di nuoto crawl ^[19].

Tramite uno studio condotto, nell’arco di 10 settimane, su due soggetti paraplegici è stato dimostrato infatti come con tale metodo il tempo di percorrenza di una vasca di 16m tramite stile libero venisse notevolmente ridotto ^[19].

Per questo studio sono stati reclutati due nuotatori (soggetto A: età 40, tempo trascorso dall’infortunio 10 anni; soggetto B: età 58, tempo dall’infortunio 36 anni) con paralisi completa degli arti inferiori (lesione a livello Th5/6) conseguente ad un trauma spinale. Entrambi lamentavano un clono moderato degli arti inferiori e dell’addome durante i cambiamenti di posizione e il Soggetto A sperimentava di tanto in tanto spasmi agli estensori delle gambe. Ai soggetti è stato chiesto, per il periodo indicato, di partecipare a sessioni di nuoto che duravano dai 30 ai 45 minuti durante le quali sono stati registrati i tempi di percorrenza di vasche da 16 metri senza supporto/stimolazione, poi con supporto FES ed infine con la combinazione di FES e tSCS ^[19].

Per quanto riguarda la prima tecnica di stimolazione (FES) i muscoli quadricipiti di entrambe le gambe sono stati stimolati alternativamente grazie ad elettrodi di stimolazione posizionati nella parte prossimale del retto femorale e nel punto motore del vasto mediale. La stimolazione, che veniva applicata con una frequenza di stimolazione di 25 Hz, si accendeva e si spegneva a un ritmo di 1 o 2 Hz, il che si traduceva in circa uno o due calci delle gambe per bracciata. L’ampiezza e la larghezza dell’impulso potevano essere variate negli intervalli 0–100 mA e 0–500 μ s rispettivamente ^[19].

La stimolazione transcutanea del midollo spinale è stata invece utilizzata allo scopo di attivare la muscolatura del tronco a livello motorio garantendo in questo modo stabilità e riduzione dello sforzo necessario per evitare il rotolamento della parte superiore del corpo. Per fare ciò sono state stimulate le fibre afferenti delle radici posteriori L2 – S2 in modo continuo a 50 Hz utilizzando impulsi bifasici con una larghezza di impulso di 1 ms sulla regione T11 / 12 del midollo spinale. Per aumentare ulteriormente la stabilità sono stati posizionati dei galleggianti sulle caviglie di entrambi gli atleti.

In figura 7 è possibile osservare la differenza di posizione assunta dal corpo con e senza stimolazione (FES e tSCS) ^[19].

Il sistema di stimolazione (figura2) utilizzava uno stimolatore certificato CE (RehaMove3, Hasomed GmbH, Germania) con firmware personalizzato. Lo stimolatore è stato posto all'interno di una sacca impermeabile fissata con una cinghia sulla schiena del nuotatore posizionata sotto il costume. Tutti i cavi di stimolazione sono stati fatti passare attraverso la sacca e sigillati con silicone per impedire l'ingresso di acqua. Lo stimolatore poteva essere controllato tramite la tastiera a membrana ed era alimentato da una batteria isolata galvanicamente dalla sorgente ad alta tensione (figura 8) ^[19].

Per quanto riguarda gli elettrodi invece sono stati utilizzati elettrodi speciali sviluppati da Axelgaard Manufacturing Co. Ltd. Questi erano costituiti da un elettrodo standard con un supporto impermeabile sovradimensionato attraverso cui era incanalato l'adattatore a scatto ^[19].



Figura 12: Confronto tra la posizione assunta dal corpo senza stimolazione e con la combinazione di FES e tSCS ^[19].

Veniva poi collegato il cavo dell'elettrodo (convertitore dall'adattatore a scatto alla presa da 2 mm) e sigillato con una pellicola trasparente impermeabile (3M Tegaderm, 3M Co., USA). Anche tutti i cavi e le connessioni, infatti, come nel caso dello stimolatore, dovevano essere impermeabili [19].

Nella figura 9, i valori medi dei tempi sui giri misurati in ciascuna sessione di allenamento sono mostrati insieme alle linee di tendenza calcolate per tutte le modalità di supporto valutate (nessuna stimolazione, FES, FES più tSCS).

Il nuoto con il supporto FES ha ridotto i tempi sul giro del 15,4% e dell'8,7% in media rispettivamente per il Soggetto A e il Soggetto B. L'aggiunta di ulteriore supporto tSCS ha prodotto riduzioni medie ancora maggiori del 19,3% e del 20,9% per i soggetti A e B, rispettivamente [19].

Quale ulteriore effetto positivo, oltre al verificato miglioramento delle prestazioni, entrambi i soggetti hanno riferito individualmente che nuotare con tSCS più FES per 30-45 min ha completamente eliminato la spasticità agli arti inferiori durante l'allenamento e fino a 4 ore dopo quest'ultimo [19].

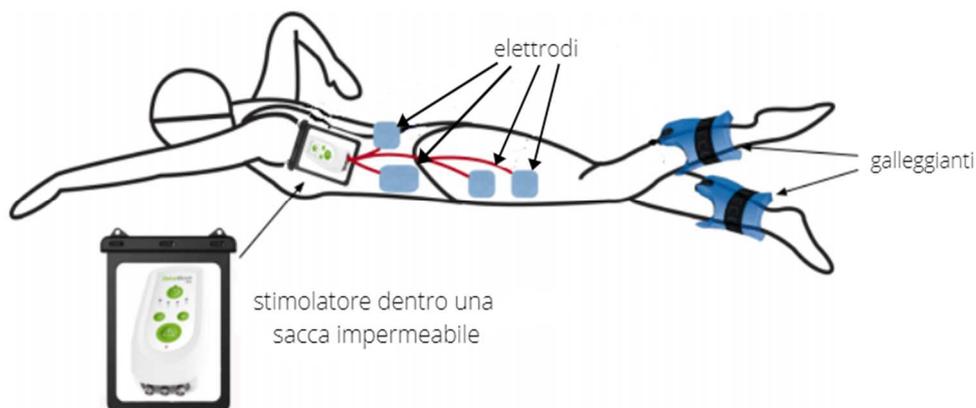


Figura 13: Posizionamento di stimolatore, elettrodi e galleggianti sui nuotatori [19].

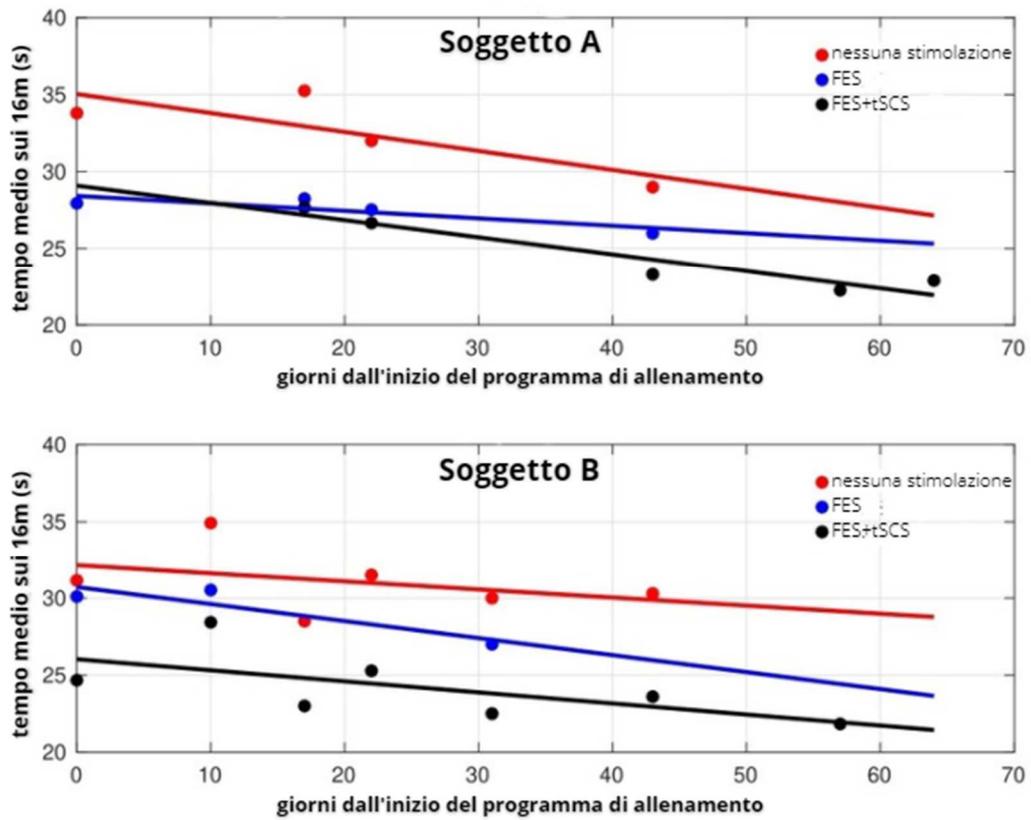


Figura 14: Tempo medio di percorrenza dei 16 metri con lo stile libero senza stimolazione, con stimolazione FES e con entrambe le stimolazioni ^[19].

5. Esempio di monitoraggio cardiaco computerizzato di un soggetto con disabilità motoria praticante il nuoto

5.1 Materiali e Metodi

5.1.1 KardiaMobile 6L

Per le acquisizioni dei segnali cardiaci è stato utilizzato lo strumento KardiaMobile 6L sviluppato dall'azienda statunitense AliveCor.

Questo dispositivo mobile, certificato dalla *Food and Drug Administration* (FDA) e provvisto del marchio CE, rappresenta uno degli elettrocardiografi più piccoli e precisi al mondo e risulta essere molto utile per il monitoraggio della funzione cardiaca in assenza di personale specializzato [36].

Tale strumento tascabile (di dimensione 9,0 x 3,0 x 0,72 cm e 24 g di peso) è costituito da 3 elettrodi di acciaio inossidabile 3x3 cm di cui 2 posti sulla superficie superiore e 1 su quella inferiore che permettono di ottenere un tracciato ad 1 o 6 derivazioni (figura 15) [36].

Il suo utilizzo (nel caso in cui si voglia ottenere un tracciato a 6 derivazioni) si basa sul posizionamento dei pollici della mano sinistra e della mano destra sui due sensori della parte superiore dello strumento e sul contatto tra il sensore della parte inferiore con la pelle del ginocchio o della caviglia della gamba sinistra [36].

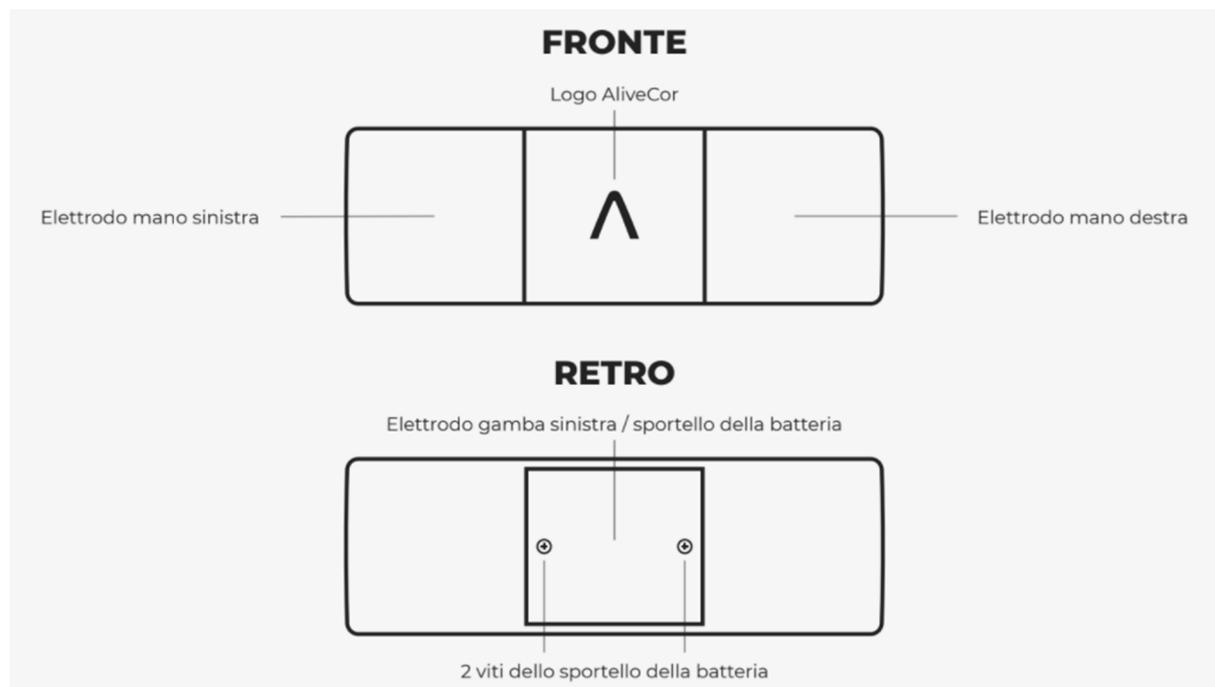


Figura 15: Struttura dello strumento KardiaMobile 6L

In questo modo il sensore è in grado di calcolare le differenze di potenziale tra quelli che sono a tutti gli effetti gli arti del triangolo di Einthoven restituendo così 3 derivazioni bipolari (I, II e III) e 3 derivazioni unipolari (aVR, aVL e aVF) senza necessità di gel specifici o adesivi (anche se viene consigliato di inumidire la zona a contatto con il sensore per ottenere un tracciato più pulito).

Tutto il processo di registrazione e la successiva visualizzazione del tracciato ottenuto (come mostrato in figura 16) possono essere gestite tramite l'App apposita sviluppata per smartphone e tablet [36].

In particolare, tramite questa app si può scegliere il numero di derivazioni e la durata del tracciato che può essere impostata da 30 secondi fino a 5 minuti (durante i primi 10 secondi di registrazione potrebbero essere visibili numerosi artefatti della traccia ma questa si stabilizzerà subito dopo) [36].

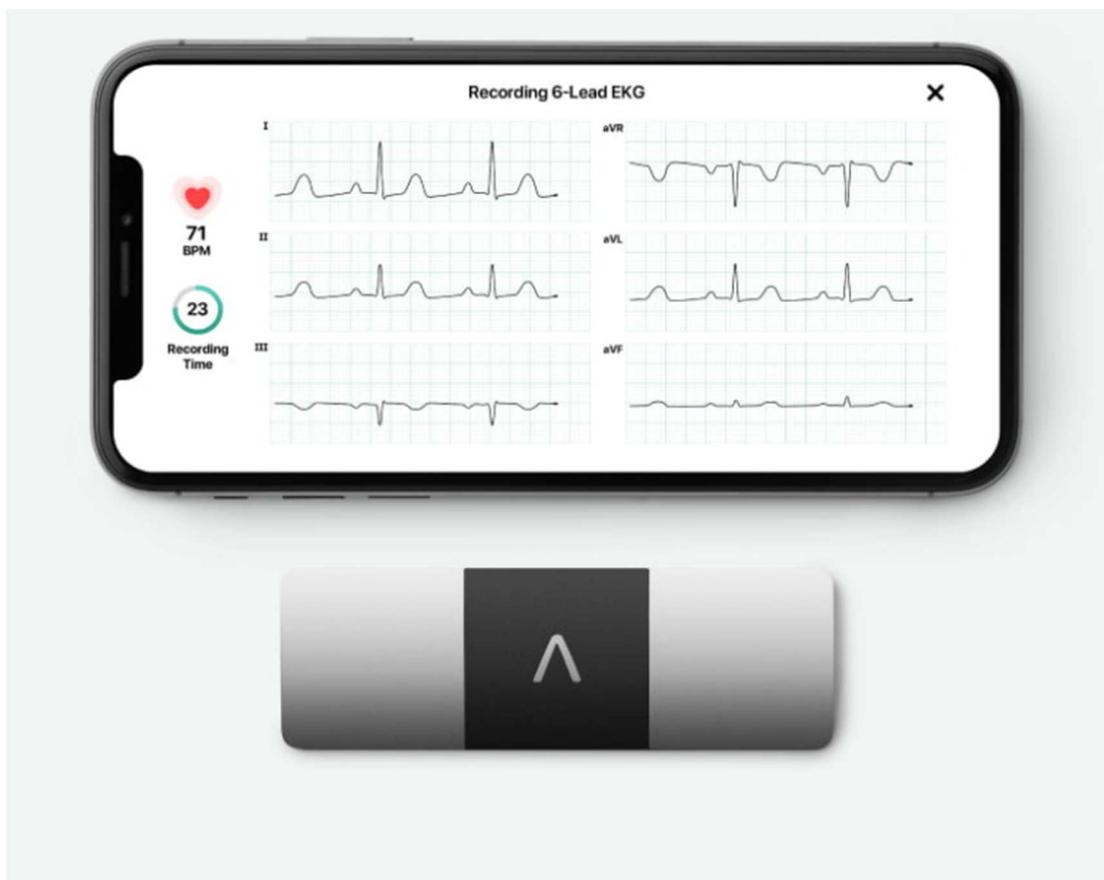


Figura 16: Strumento KardiaMobile 6L e tracciato visualizzato sull'applicazione per smartphone

Grazie ad una batteria a bottone CR2016 da 3 V che garantisce 2000 ore di servizio (circa un anno di funzionamento), il dispositivo non necessita di cavi di alimentazione per la misurazione, così come non sono necessari cavi di collegamento con lo smartphone per il trasferimento dati grazie alla tecnologia Bluetooth a bassa energia (portata wireless di 1 m) [36].

Il KardiaMobile 6L si è rivelato uno strumento molto utile in quanto è in grado di rilevare, dopo aver fatto un'analisi del tracciato al termine della registrazione, vari tipi di aritmie come la fibrillazione atriale ma anche alterazioni del normale ritmo cardiaco come tachicardia e bradicardia con una precisione del 97%. L'alta qualità è garantita anche dal fatto che vengono utilizzati 300 campioni per descrivere un secondo ed ogni campione viene rappresentato con 14 bit [36].

Le registrazioni vengono poi salvate nella cronologia dell'applicazione e possono essere condivise facilmente in formato pdf con il proprio medico fornendo un ottimo supporto per l'analisi clinica.

5.1.2 Analisi dati: Kubios

Il software Kubios HRV, utilizzato per la nostra analisi, è stato sviluppato dalla società Kubios Oy che nasce nel 2016 a Kuopio in Finlandia da un gruppo di ricercatori dell'Università della Finlandia orientale con il preciso scopo di sviluppare prodotti software in grado di fornire analisi dettagliate della variabilità della frequenza cardiaca indipendentemente dal dispositivo utilizzato per la raccolta dati, ma anche di fornire ulteriori analisi nel caso di segnale HRV già elaborato. In particolare, vengono forniti oltre 40 parametri di analisi dell'HRV, della frequenza respiratoria e altri strumenti che, in ambito sportivo, permettono la valutazione del dispendio energetico e degli effetti del carico di allenamento sullo stress fisiologico e sul recupero [37].

Il software è stato interamente sviluppato su Matlab e, oltre ad avere requisiti di sistema simili a questo, richiede infatti per il suo funzionamento di possedere Matlab Runtime sul dispositivo utilizzato per l'elaborazione dei segnali [37].

A seconda della versione del programma è necessario, come prerequisito all'analisi, possedere le sequenze dei picchi R già isolati o i segnali ECG grezzi [37].

Nel caso in cui al software venga fornito il segnale ECG, Kubios applica un algoritmo di rilevamento dei complessi QRS interno al programma in grado di rilevare gli istanti temporali dell'onda R in maniera automatica basato sull'algoritmo di Pan-Tompkins.

Molteplici strumenti vengono poi forniti per la preelaborazione del segnale HRV [37].

Indipendentemente dalla versione utilizzata, Kubios fornisce uno strumento di gestione degli artefatti che si avvale di un algoritmo basato sulla soglia per la correzione dei battiti ectopici e degli eventi aritmici.

Tale algoritmo confronta ogni valore dell'intervallo RR con un intervallo medio locale ottenuto filtrando la mediana delle serie temporali dell'intervallo RR. Se un intervallo differisce da tale media locale di una quantità maggiore di una soglia prefissata, viene identificato come un artefatto e contrassegnato per la correzione. In particolare, la soglia potrà essere scelta tra un elenco di valori più o meno stringenti che vanno da 0.45 s (soglia molto bassa) a 0.05 s (molto forte), oppure potrà essere personalizzata in base all'esigenza [37].

La successiva correzione viene effettuata sostituendo gli artefatti identificati con valori interpolati utilizzando un'interpolazione spline cubica.

Un'altra caratteristica che può alterare l'analisi dell'HRV è rappresentata dalle variazioni lente della FC media. Tali tendenze non stazionarie vengono perciò

automaticamente eliminate da Kubios utilizzando un metodo di priorità di uniformità prima dell'analisi vera e propria del segnale. Questo metodo, che si basa sull'utilizzo di polinomi del primo ordine o di ordine superiore, agisce come un filtro passa-alto variabile nel tempo, il quale regola i parametri in base ad un parametro preimpostato. La vera e propria fase di analisi viene poi effettuata nel dominio del tempo, della frequenza o tramite metodi non lineari e da ognuno di questi domini possono essere ricavati dei parametri specifici ^[37].

Per quanto riguarda l'analisi nel dominio del tempo, in tabella 7 sono riassunti i principali parametri ricavabili.

Nel caso dell'analisi del dominio della frequenza, per prima cosa viene determinato lo spettro di potenza della serie degli intervalli RR (assunti implicitamente come campionati in maniera equidistante quindi in funzione dei cicli di battiti cardiaci) tramite l'utilizzo della trasformata di Fourier veloce (FFT) o tramite metodi basati sulla modellazione parametrica autoregressiva (AR) ^[37].

Tabella 7: Riepilogo dei parametri di FC e HRV nel dominio del tempo calcolati dal software Kubios HRV.

PARAMETRO	UNITÀ di MISURA	DESCRIZIONE
RR medio	(ms)	Media degli intervalli RR
STD RR (SDNN)	(ms)	Deviazione standard degli intervalli RR
FC media	(bpm)	Frequenza cardiaca media
FC minimo e massimo	(bpm)	FC minima e massima calcolate utilizzando la media mobile a N battiti (valore predefinito: N=5)
RMSSD	(ms)	Radice quadrata delle differenze quadratiche medie tra intervalli RR successivi

Il vantaggio del metodo basato sulla FFT risiede nella semplicità di implementazione, mentre lo spettro AR fornisce una risoluzione migliore soprattutto per campioni brevi. Successivamente viene calcolata una stima della densità dello spettro di potenza (PSD).

Facendo riferimento alle bande di frequenza, la cui definizione e relativo significato sono già stati espressi nel capitolo 1.2, in tabella 8, in maniera analoga al caso temporale sono riassunti i principali parametri ricavabili in questo dominio. Per quanto riguarda i valori di potenza assoluta per ogni banda di frequenza, nel caso dello spettro FFT questi vengono ottenuti semplicemente integrando lo spettro sui limiti di banda; mentre nel caso dello spettro AR se la fattorizzazione è abilitata emergono componenti spettrali distinte per ciascuna banda di frequenza con una opportuna selezione dell'ordine del modello e i valori di potenza assoluta si ottengono direttamente come potenze di tali componenti. Se la fattorizzazione è disabilitata le potenze dello spettro AR vengono calcolate come per lo spettro FFT ^[37].

Tutto il software viene gestito dall'utente tramite un'interfaccia grafica.

Per migliorare la precisione dell'analisi è inoltre possibile inserire i dati anagrafici e fisiologici del soggetto in esame e salvarli anche in memoria per poter eseguire analisi ripetute. Una volta fornito il segnale (che nella versione standard deve essere presentato in formato .txt) Kubios procederà in maniera automatica all'analisi i cui risultati verranno forniti anch'essi tramite interfaccia grafica (tabelle e grafici) con la possibilità di selezionare i parametri specifici di interesse. Tali risultati potranno poi essere salvati come file PDF o file ASCII ed essere esportati su altri software per poter eseguire una post-elaborazione.

Tabella 8: Riepilogo dei parametri FC nel dominio della frequenza calcolati dal software Kubios HRV

PARAMETRO	UNITÀ di MISURA	DESCRIZIONE
Frequenza di picco	(Hz)	Frequenze di picco delle bande VLF, LF e HF
Potenza assoluta	(ms ²)	Potenza assoluta delle bande VLF, LF e HF
Potenza assoluta	(log)	Logaritmo naturale trasformato valori di potenze assolute delle bande VLF, LF e HF
Potenza relativa	(%)	Potenze relative delle bande VLF, LF e HF: $VLF [\%] = VLF [ms^2] / \text{potenza totale } [ms^2] \times 100\%$ $LF [\%] = LF [ms^2] / \text{potenza totale } [ms^2] \times 100\%$ $HF [\%] = HF [ms^2] / \text{potenza totale } [ms^2] \times 100\%$
Potenza normalizzata	(n.u.)	Potenze delle bande LF e HF in unità normalizzate: $LF [nu] = LF [ms^2] / (\text{potenza totale } [ms^2] - VLF [ms^2]) \times 100\%$ $HF [nu] = HF [ms^2] / (\text{potenza totale } [ms^2] - VLF [ms^2]) \times 100\%$
LF/HF	-	Rapporto tra le potenze delle bande LF e HF

5.2 Risultati

È stato preso in esame un ragazzo di 25 anni affetto da tetraparesi spastica in encefalopatia congenita, una forma di paralisi cerebrale, il quale è stato monitorato prima e dopo un allenamento in piscina.

In figura 17 viene mostrato il segnale ECG ottenuto dal KardiaMobile 6L prima dell'allenamento del soggetto in esame.

L'analisi effettuata tramite Kubios fornisce invece i risultati in figura 18 e in figura 19. Gli indici ottenuti nel dominio del tempo sono riassunti in tabella 9, mentre i parametri relativi all'analisi nel dominio della frequenza sono riassunti in tabella 10.

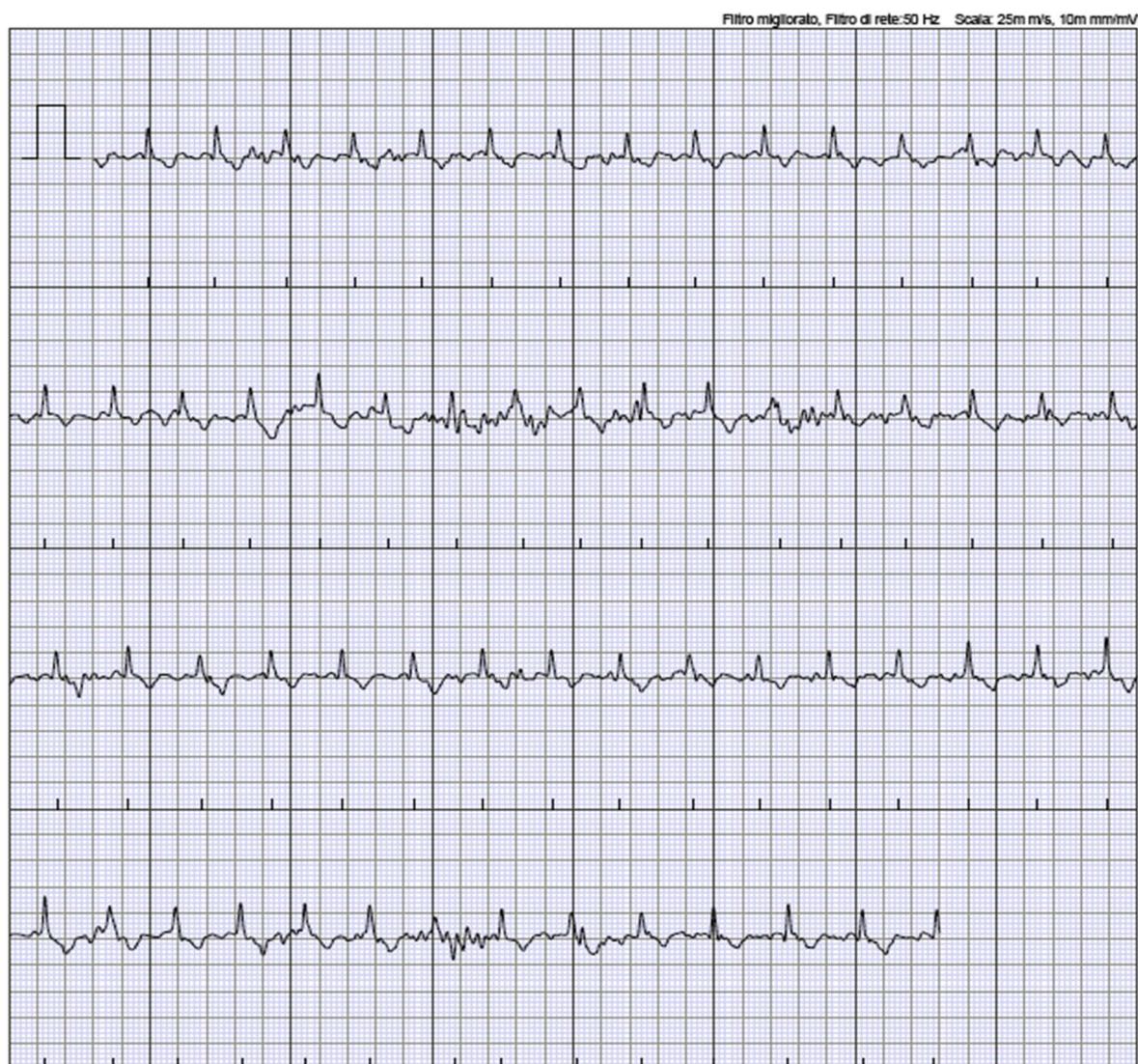


Figura 17: Tracciato elettrocardiografico registrato prima dell'allenamento

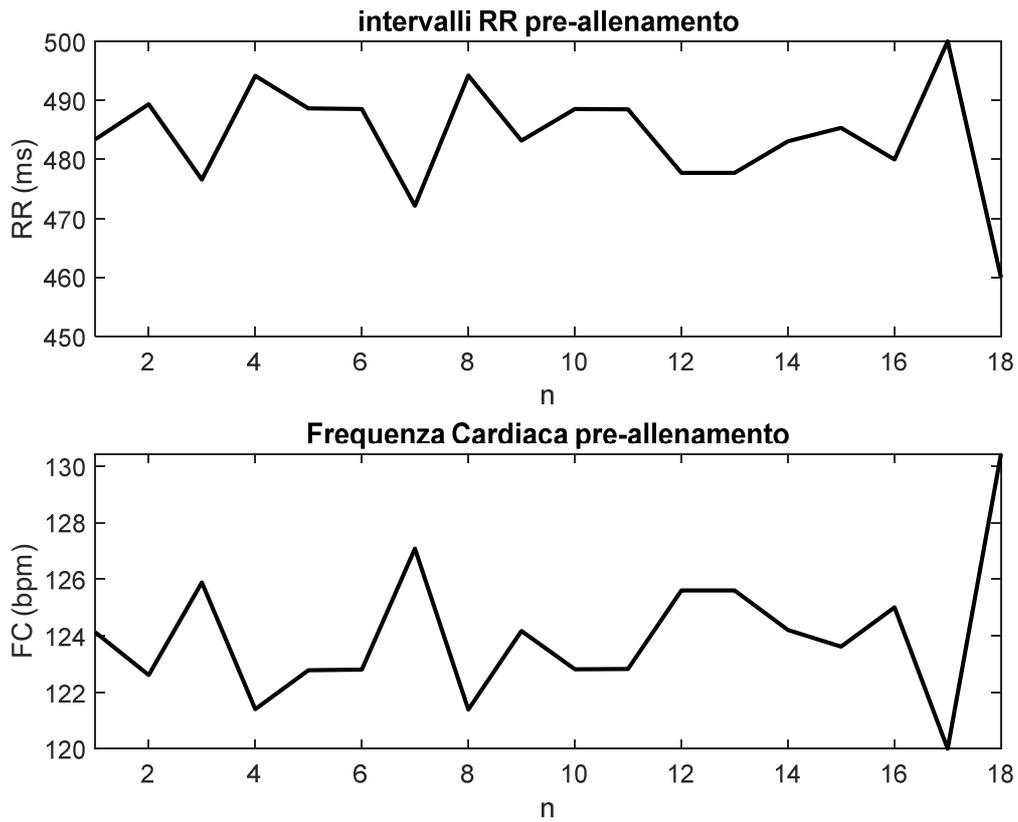


Figura 18: Andamento della frequenza cardiaca e degli intervalli RR prima dell'allenamento

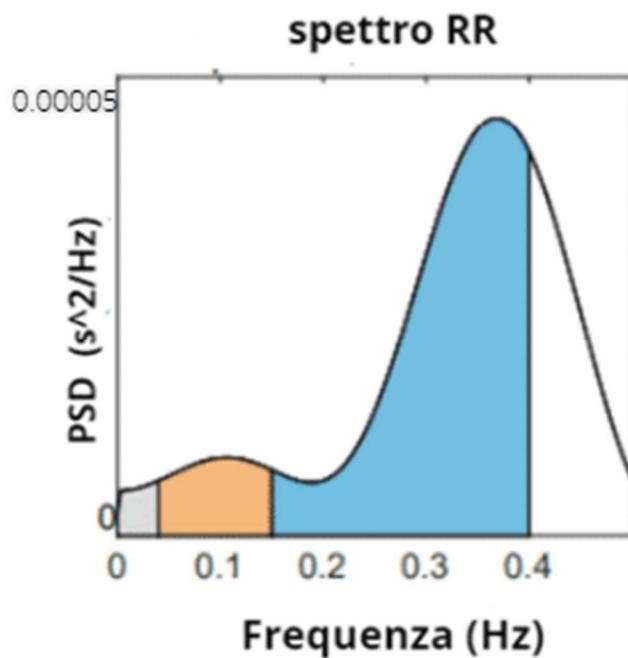


Figura 19: Spettro del segnale prima dell'allenamento

Tabella 9: Indici nel dominio del tempo calcolati dal segnale di FC prima dell'allenamento

PARAMETRO	UNITÀ di MISURA	VALORE
RR medio	(ms)	484
STD RR (SDNN)	(ms)	9.2
FC media	(bpm)	124
FC minima	(bpm)	123
FC massima	(bpm)	126
RMSSD	(ms)	14.4

Tabella 10: Indici nel dominio della frequenza calcolati dal segnale FC prima dell'allenamento

PARAMETRO	UNITÀ di MISURA	VLF	LF	HF
Frequenza di picco	(Hz)	0.040	0.107	0.370
Potenza assoluta	(ms ²)	0	1	8
Potenza assoluta	(log)	0.000	0.128	2.083
Potenza relativa	(%)	2.90	11.97	84.55
Potenza normalizzata	(n.u.)	-	12.32	87.07
LF/HF		0.142		

Come nel caso precedente, ma relativamente alla fase post-allenamento, in figura 20 è riportato l'ECG ottenuto con lo strumento KardiaMobile 6L mentre in figura 21 e 22 sono riportati i risultati dell'analisi effettuata con il software Kubios.

Gli indici ottenuti nel dominio del tempo dopo l'allenamento sono riassunti in tabella 11, mentre i parametri relativi all'analisi nel dominio della frequenza sono riassunti in tabella 12.

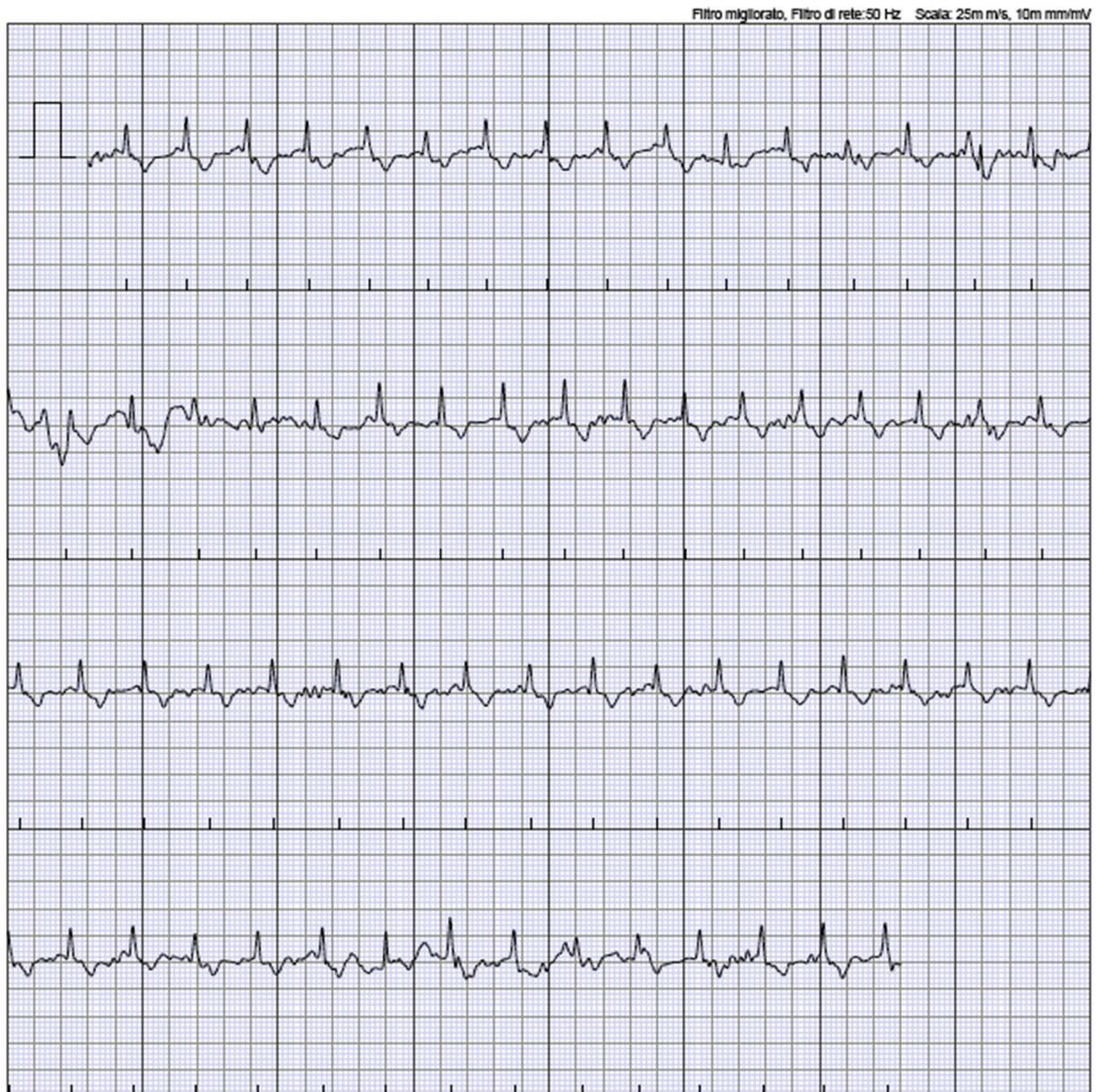


Figura 20: Tracciato elettrocardiografico registrato dopo l'allenamento

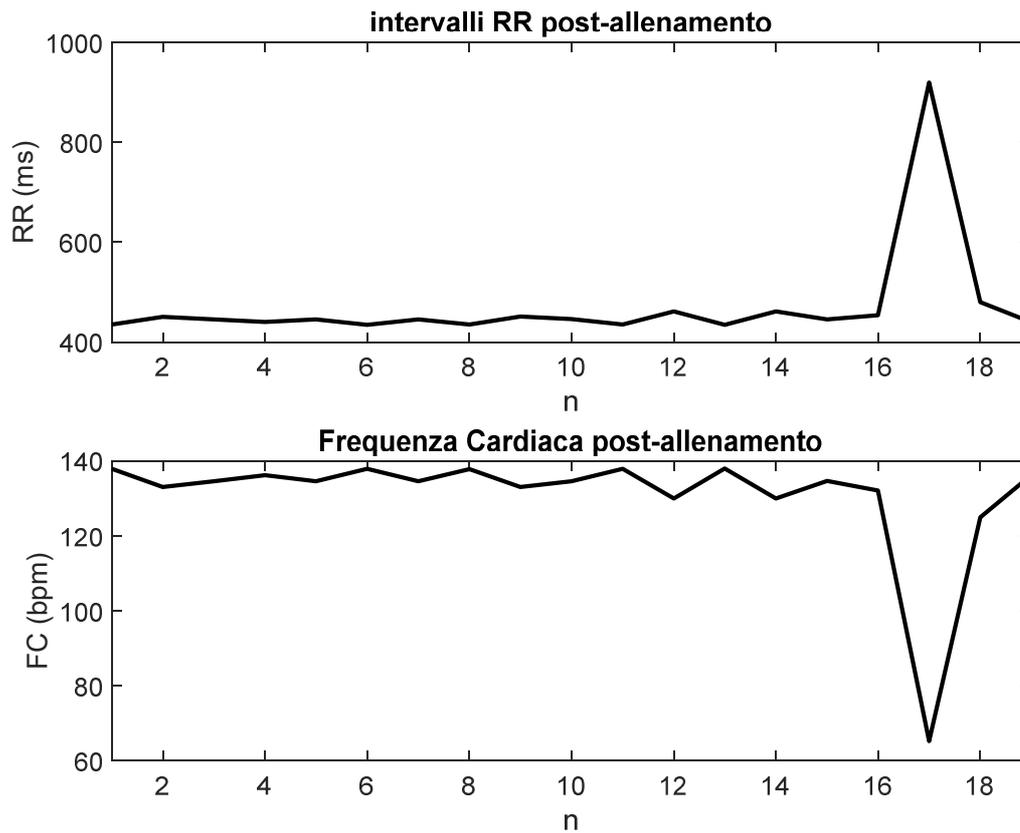


Figura 21: Andamento della frequenza cardiaca e degli intervalli RR dopo l'allenamento

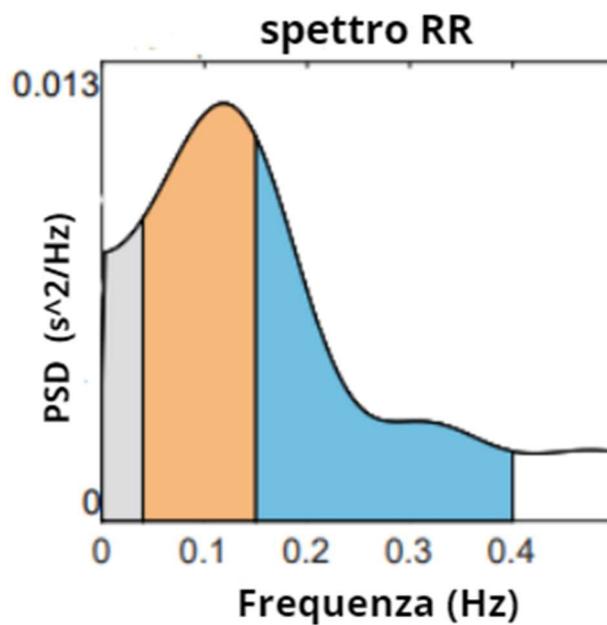


Figura 22: Spettro del segnale dopo l'allenamento

Tabella 11: Indici nel dominio del tempo calcolati dal segnale FC dopo l'allenamento

PARAMETRO	UNITÀ di MISURA	VALORE
RR medio	(ms)	472
STD RR (SDNN)	(ms)	102.3
FC media	(bpm)	127
FC minima	(bpm)	109
FC massima	(bpm)	136
RMSSD	(ms)	149

Tabella 12: Indici nel dominio della frequenza calcolati dal segnale FC dopo l'allenamento

PARAMETRO	UNITÀ di MISURA	VLF	LF	HF
Frequenza di picco	(Hz)	0.040	0.120	0.150
Potenza assoluta	(ms ²)	313	1194	1071
Potenza assoluta	(log)	5.747	7.085	6.976
Potenza relativa	(%)	12.15	46.27	41.50
Potenza normalizzata	(n.u.)	-	52.67	47.24
LF/HF		1.115		

In figura 23 sono riportati l'andamento degli intervalli RR e della frequenza cardiaca post-allenamento dopo la correzione del tacogramma.

Tale correzione è stata effettuata aggiungendo un battito tra il terzultimo picco R e il quartultimo picco R facendo la media delle posizioni dei picchi in corrispondenza di tali battiti.

In figura 24 e nelle tabelle 13 e 14 si hanno poi il relativo spettro e i parametri nel tempo e nella frequenza.

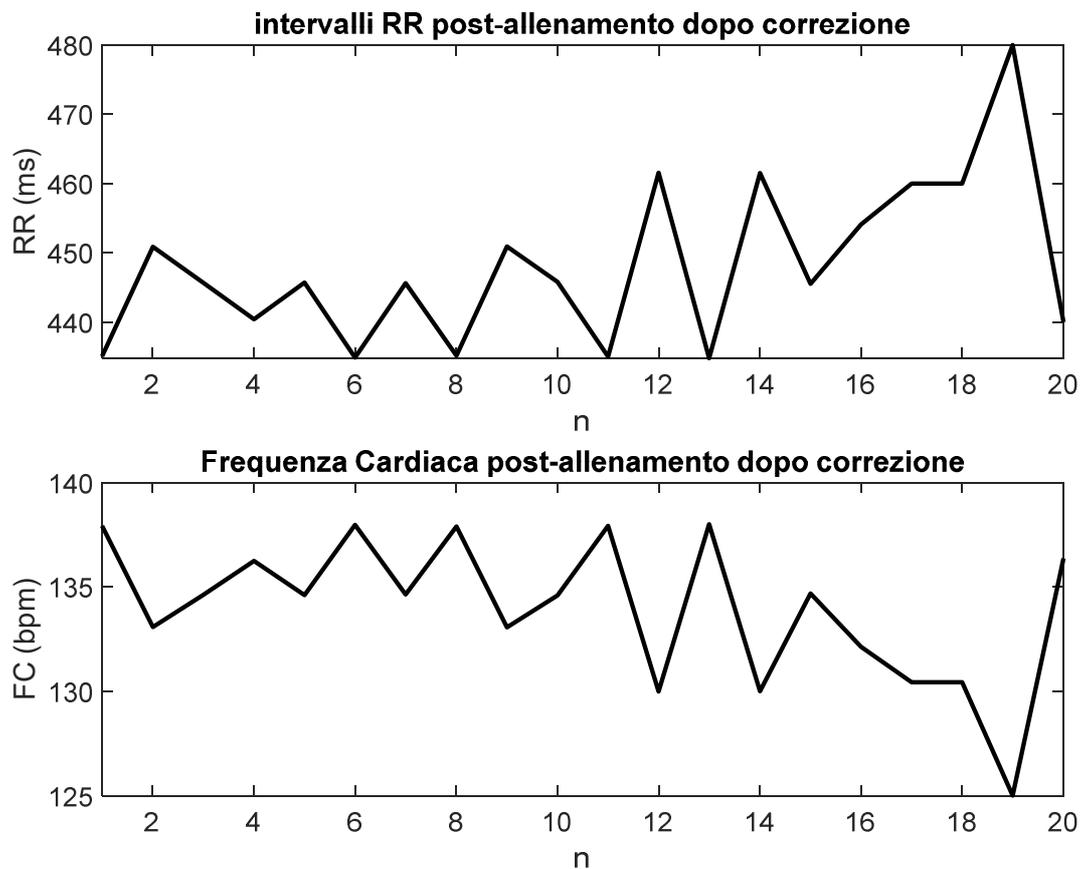


Figura 23: Andamento della frequenza cardiaca e degli intervalli RR post-allenamento dopo la correzione

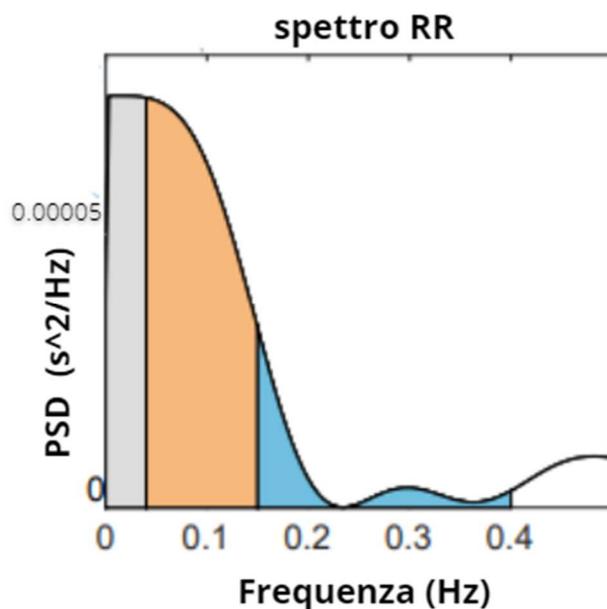


Figura 24: Spettro del segnale post-allenamento dopo la correzione

Tabella 13: Indici nel dominio del tempo calcolati dal segnale FC post-allenamento dopo la correzione

PARAMETRO	UNITÀ di MISURA	VALORE
RR medio	(ms)	448
STD RR (SDNN)	(ms)	10.2
FC media	(bpm)	134
FC minima	(bpm)	130
FC massima	(bpm)	136
RMSSD	(ms)	16.7

Tabella 14: Indici nel dominio della frequenza calcolati dal segnale FC post-allenamento dopo la correzione

PARAMETRO	UNITÀ di MISURA	VLF	LF	HF
Frequenza di picco	(Hz)	0.013	0.040	0.150
Potenza assoluta	(ms ²)	3	7	1
Potenza assoluta	(log)	1.087	1.909	0.235
Potenza relativa	(%)	27.01	61.44	11.52
Potenza normalizzata	(n.u.)	-	84.14	15.78
LF/HF		5.336		

5.3 Discussione

Nell'ambito del progetto Swim4all si è andati a monitorare l'allenamento in piscina di un nuotatore di 25 anni affetto da tetraparesi spastica in encefalopatia congenita, una forma grave di paralisi cerebrale, per osservare la sua risposta ad uno stress rappresentato da un'attività fisica.

Mentre precedentemente altri studi avevano posto l'attenzione su parametri biomeccanici come la simmetria della bracciata o alla velocità di nuotata, come nello studio di Edmonds et al. in questo caso vengono presi in esame parametri come la frequenza cardiaca e l'HRV.

Per il monitoraggio di un allenamento in piscina del soggetto in esame, sono stati quindi analizzati due segnali elettrocardiografici acquisiti con lo strumento Kardia nei 5 minuti prima e 5 minuti dopo l'allenamento.

Del tracciato elettrocardiografico ottenuto, in entrambe le situazioni, sono stati presi in esame 10 s in accordo con la normale prassi di analisi clinica. Già dall'osservazione del tracciato elettrocardiografico (figure 17 e 20) si può notare come il soggetto sia sempre in tachicardia, ovvero presenti una FC media superiore alla norma (100 bpm), sia nella fase precedente l'allenamento che in quella successiva.

La serie di intervalli RR estratti dall' elettrocardiogramma sono stati forniti in ingresso a Kubios che ha effettuato l'analisi restituendo i principali indici nel dominio del tempo e della frequenza per la valutazione della variabilità del ritmo cardiaco.

Per quanto riguarda i risultati ottenuti prima dell'allenamento, l'analisi su Kubios conferma la tachicardia del soggetto anche in una situazione di riposo. La sua FC media è infatti 124 bpm con una minima di 123 bpm e una massima di 126 bpm.

Osservando gli indici in frequenza è possibile vedere l'equilibrio simpato-vagale e analizzando la potenza assoluta e soprattutto il rapporto LF/HF, si può notare come a riposo prima dell'allenamento prevalgano le alte frequenze associate all'attività del sistema parasimpatico (il rapporto LF/HF risulta appunto essere molto minore di 1).

Analizzando l'andamento degli intervalli RR e della FC nel segnale acquisito dopo l'allenamento ci si è resi conto della presenza di un errore nell' estrazione di un piccolo R (battito mancante) in corrispondenza del terzultimo e quartultimo probabilmente dovuto alla notevole rumorosità del segnale.

Per ottenere perciò un'analisi più corretta e affidabile è stata eseguita la correzione del tacogramma. Tale correzione è stata possibile perché il battito da correggere rappresenta il 5% del segnale e la correzione è possibile fino ad un 10%. Una volta corretto, il segnale è stato analizzato nuovamente con il software Kubios. Si è rilevata quindi una frequenza cardiaca media pari a 134 bpm che è quindi più alta sia della situazione di riposo che del rilevamento errato compatibile con un incremento di FC dovuto all'esercizio fisico. Ad essere maggiore rispetto ai due casi precedenti è anche il contributo della banda a bassa frequenza relativa all'attivazione del sistema simpatico che è, infatti, in caso di stress dovuto ad esempio proprio ad attività fisica, il responsabile dell'aumento della FC. Tutti gli indici in potenza relativi a LF sono infatti maggiori di quelli relativi ad HF ed inoltre si osserva un rapporto LF/HF molto maggiore di 1.

Per quanto riguarda invece la frequenza cardiaca l'atleta ha risposto ad una attività fisica con un aumento dei valori di FC anche se in entrambe le situazioni (prima e dopo l'allenamento) presentava valori sopra la media. Tale risultato è in linea con l'analisi svolta da Edmonds et al. il quale aveva evidenziato una frequenza cardiaca maggiore in un soggetto con paralisi cerebrale. La quantità di dati disponibili in questo caso non è però sufficiente per poter effettivamente collegare i parametri ottenuti con la tipologia di disabilità fisica ed approfondire quindi lo studio di Edmonds et al. sulla differenza tra atleti affetti da disabilità neuromuscolare causata da paralisi cerebrale e altre tipologie di disabilità.

Conclusioni

Nell'ambito del progetto Swim4all si è monitorato l'allenamento di un nuotatore di 25 anni affetto da tetraparesi spastica in encefalopatia congenita per osservare la sua risposta ad uno stress rappresentato da un'attività fisica quale un allenamento in piscina.

Dagli indici riguardanti l'HRV, emerge come il soggetto in esame risponda all'attività fisica come un soggetto normodotato sano. In una situazione di riposo, infatti, il contributo maggiore alla risposta simpato-vagale era rappresentato dal sistema parasimpatico. Una attività fisica come un allenamento in piscina presuppone invece un aumento della frequenza cardiaca, della forza di contrazione cardiaca e della pressione, i quali sono fattori regolati dal sistema simpatico che quindi deve aumentare la propria azione a discapito del sistema parasimpatico. A conferma, infatti, della salute dell'atleta relativamente a questo aspetto, il rapporto LF/HF appena finito l'allenamento era di molto maggiore di 1. La quantità di soggetti analizzati e di dati disponibili in questo studio non è però sufficiente per poter effettivamente collegare i parametri ottenuti con la tipologia di disabilità fisica ed approfondire studi già presenti in letteratura sulla differenza tra atleti affetti da disabilità neuromuscolare causata da paralisi cerebrale e altre tipologie di disabilità. Tuttavia, la semplicità del metodo di acquisizione e analisi dati proposto rende questa modalità di monitoraggio largamente utilizzabile per andare ad approfondire i risultati ottenuti ed estendere il monitoraggio anche a soggetti con diversi tipi di disabilità in studi futuri.

Riferimenti

[1]: Kenneth S. Saladin : Anatomia umana. Seconda edizione italiana sulla quinta americana. 539-559. 2017

[2]:Conti AA. Nuoto, attività fisica e salute: una prospettiva storica [Swimming, physical activity and health: a historical perspective]. Clin Ter.

[3] Settore Istruzione Tecnica-Federazione Italiana Nuoto (FIN): Corsi allievo istruttore-istruttore base. 2014

[4]: Mitchell JH, Haskell W, Snell P, Van Camp SP. Task Force 8: classification of sports. J Am Coll Cardiol. 2005 Apr 19;45(8):1364-7. doi:10.1016/j.jacc.2005.02.015.

[5]: Ian A. McLeod:Swimming Anatomy . Human Kinetics 2009

[6]: Khodae M, Edelman GT, Spittler J, Wilber R, Krabak BJ, Solomon D, Riewald S, Kendig A, Borgelt LM, Riederer M, Puzovic V, Rodeo S. Medical Care for Swimmers. Sports Med Open. 2016 Jul 25;2:27. doi: 10.1186/s40798-016-0051-2.

[7]: Toussaint HM, Hollander AP. Energetics of competitive swimming. Implications for training programmes. Sports Med. 1994 Dec;18(6):384-405. doi: 10.2165/00007256-199418060-00004.

[8]: Zamparo P, Cortesi M, Gatta G. The energy cost of swimming and its determinants. Eur J Appl Physiol. 2020 Jan;120(1):41-66. doi: 10.1007/s00421-019-04270-y. Epub 2019 Dec 5.

[9]: Lazar JM, Khanna N, Chesler R, Saliccioli L. Swimming and the heart. Int J Cardiol. 2013 Sep 20;168(1):19-26. doi: 10.1016/j.ijcard.2013.03.063. Epub 2013 Apr 18.

[10]: Toussaint HM, Beek PJ. Biomechanics of competitive front crawl swimming. Sports Med. 1992 Jan;13(1):8-24. doi: 10.2165/00007256-199213010-00002.

[11] Maurício Corte Real da Silveira, Ricardo Jacó de Oliveira, & Maria Inês Gandolfo Conceição. (2005). Effects of swimming on the functional independence of patients with spinal cord injury. *Brazilian Journal of Sports Medicine*, 11 (4), 251-256

[12] :Linden M. Definition and Assessment of Disability in Mental Disorders under the Perspective of the International Classification of Functioning Disability and Health (ICF). Behav Sci Law. 2017 Mar;35(2):124-134. doi: 10.1002/bsl.2283. Epub 2017 Mar 14.

[13]: World Health Organization. International Classification of Functioning, Disability and Health; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2001

[14]: Federazione italiana nuoto paralimpico (FINP)- Regolamento delle classificazioni. Stagione sportiva 2019. Consiglio Federale 29 marzo 2019 - Delibera nr. 130 /2019

[15]: World Para swimming-classification, rules and regulation. International Paralympic Committee JANUARY-2018.

[16]: Dimitrijević L, Aleksandrović M, Madić D, Okičić T, Radovanović D, Daly D. The effect of aquatic intervention on the gross motor function and aquatic skills in children with cerebral palsy. *J Hum Kinet.* 2012 May;32:167-74. doi: 10.2478/v10078-012-0033-5. Epub 2012 May 30.

[17]: Hutzler Y, Chacham A, Bergman U, Szeinberg A. Effects of a movement and swimming program on vital capacity and water orientation skills of children with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol.* 1998 Mar;40(3):176-81. doi: 10.1111/j.1469-8749.1998.tb15443.x.

[18]: Atamturk H, Atamturk A. Therapeutic effects of aquatic exercises on a boy with Duchenne muscular dystrophy. *J Exerc Rehabil.* 2018 Oct 31;14(5):877-882. doi: 10.12965/jer.1836408.204.

[19]: Wiesener C, Spieker L, Axelgaard J, Horton R, Niedeggen A, Wenger N, Seel T, Schauer T. Supporting front crawl swimming in paraplegics using electrical stimulation: a feasibility study. *J Neuroeng Rehabil.* 2020 Apr 16;17(1):51. doi: 10.1186/s12984-020-00682-6.

[20]: Wiesener C, Spieker L, Axelgaard J, Horton R, Niedeggen A, Wenger N, Seel T, Schauer T. Supporting front crawl swimming in paraplegics using electrical stimulation: a feasibility study. *J Neuroeng Rehabil.* 2020 Apr 16;17(1):51. doi: 10.1186/s12984-020-00682-6.

[21]Puce L, Marinelli L, Girtler NG, Pallecchi I, Mori L, Simonini M, Trompetto C. Self-Perceived Psychophysical Well-Being of Young Competitive Swimmers With Physical or Intellectual Impairment. *Percept Mot Skills.* 2019 Oct;126(5):862-885. doi: 10.1177/0031512519865849. Epub 2019 Jul 30.

[22] van Tulleken C, Tipton M, Massey H, Harper CM. Open water swimming as a treatment for major depressive disorder. *BMJ Case Rep.* 2018 Aug 21;2018:bcr2018225007. doi: 10.1136/bcr-2018-225007.

[23] Feitosa LC, Muzzolon SRB, Rodrigues DCB, Crippa ACS, Zonta MB. The effect of adapted sports in quality of life and biopsychosocial profile of children and

adolescents with cerebral palsy. *Rev Paul Pediatr.* 2017 Oct-Dec;35(4):429-435. doi: 10.1590/1984-0462/;2017;35;4;00001.

[24]: Pan CY. Effects of water exercise swimming program on aquatic skills and social behaviors in children with autism spectrum disorders. *Autism.* 2010 Jan;14(1):9-28. doi: 10.1177/1362361309339496.

[25]: M.P.Riccio, L.Croce, M. Marino, M. Abate, G.Voccia, P. Vassallo, G. Valerio, C. Bravaccio. Autism Spectrum Disorders and sports activity: swimming to rescue as implementation of skills. *Gior Neuropsich Età Evol* 2016;36:55-61

[26]:Lazar JM, Khanna N, Chesler R, Salciccioli L. Swimming and the heart. *Int J Cardiol.* 2013 Sep 20;168(1):19-26. doi: 10.1016/j.ijcard.2013.03.063. Epub 2013 Apr 18.

[27]: Shoemaker LN, Wilson LC, Lucas SJE, Machado L, Thomas KN, Cotter JD. Swimming-related effects on cerebrovascular and cognitive function. *Physiol Rep.* 2019 Oct;7(20):e14247. doi: 10.14814/phy2.14247.

[28]: L. J. DiCarlo, P. B. Sparling, M. L. Millard-Stafford, J. C. Rupp. Peak Heart Rates during Maximal Running and Swimming: Implications for Exercise Prescription. *Int J Sports Med* 1991; 12(3): 309-312. DOI: 10.1055

[29]: Ingvar Holmer. Swimming Physiology. *Ann. Physiol. Anthropol.* 11(3): 269-276, 1992.

[30]: J. R. Magel, W. D. McArdle and R. M. Glaser. Telemetered heart rate response to selected competitive swimming events. 1 Jun 1969. Doi: 10.1152

[31]: I Holmér, P O Astrand. Swimming training and maximal oxygen uptake. *Journal of applied physiology.* 33(4) : 510-513, 1972. Doi: 10.1152

[32]: DC Lieber, RL Lieber, WC Adams. Effects of run-training and swim-training at similar absolute intensities on treadmill - *Med Sci Sports Exerc,* 21(6), 1989

[33]: Santos KB, Bento PCB, Payton C, Rodacki ALF (2020) Symmetry in the front crawl stroke of different skill level of able-bodied and disabled swimmers. *PLoS ONE* 15(3). doi:10.1371

[34]: Rohan Edmonds, Anthony Leicht, Mark McKean, Brendan Burkett. Daily heart rate variability of Paralympic gold medallist swimmers: A 17-week investigation. *Journal of Sport and Health Science.* 4(4): 371-376, 2015. Doi: 10.1016.

[35]: P.K. Stein, PhD and R.E. Kleiger, MD. Insights from the Study of Heart Rate Variability. *Annual Review of Medicine.* Vol.50:249-261 Feb 1999. Doi:10.1146

[36]: www.alivecor.it/kardiamobile6l

[37]: www.kubios.com/hrv-preprocessing