

## Capitolo 1

---

# SISTEMI *POWERED EXOSKELETON*: DAL SOGNO ALLA REALTÀ

Daniele Giansanti (a), Mario Giogni (b)

(a) Centro Nazionale Tecnologie Innovative in Sanità Pubblica, Istituto Superiore di Sanità, Roma

(b) Facoltà di Medicina e Chirurgia, Università Cattolica del Sacro Cuore, Roma

## Importanza della riabilitazione in posizione eretta

L'impatto del problema conseguente al danno midollare per i servizi sanitari nazionali è molto alto e complesso, infatti (a) i soggetti con danno midollare hanno un'elevata probabilità di morte nel primo anno dopo l'evento; (b) i costi sono molto alti, per esempio negli Stati Uniti sono circa 1,3 miliardi di \$ (1).

La riabilitazione e la progettazione di ausili specifici è un punto chiave per questi soggetti: c'è infatti la necessità di fare ogni sforzo per aiutarli a recuperare la mobilità e l'autonomia nel modo migliore possibile. È ampiamente dimostrato che soluzioni per la riabilitazione e per gli ausili che permettono la "posizione verticale" sono anche molto utili per migliorare la funzionalità degli organi interni e per evitare le piaghe da decubito.

Esistono soluzioni basate su esoscheletri meccanici non motorizzati come ad esempio l'esoscheletro meccanico (non motorizzato) denominato *Reciprocating Gait Orthosis* (RGO). Tale ausilio consente una riabilitazione con una posizione "verticale" anche se richiede tuttavia un elevato consumo di energia durante l'uso. Per questo motivo i soggetti in un processo di riabilitazione preferiscono maggiormente utilizzare la carrozzina a casa, un ausilio utile ma uno strumento incompleto di riabilitazione che non consente la "riabilitazione in posizione verticale" e la deambulazione assistita (2). Il confronto del consumo energetico medio della carrozzina rispetto all'RGO (2) a diverse andature è significativo. Il consumo energetico medio della carrozzina è attorno ai  $0,2 \text{ mL O}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{m}^{-1}$  ad una velocità media di  $3,1 \text{ km} \times \text{h}^{-1}$  mentre il consumo energetico medio dell'RGO è pari a  $0,9 \text{ mL O}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{m}^{-1}$  ad una velocità 8 volte inferiore.

## Esoscheletro motorizzato: dal sogno alla realtà

### Il sogno e le prime esperienze

L'utilizzo di dispositivi esoscheletrici per supportare l'attività umana nelle varie fasi della vita, non è un argomento nuovo per i ricercatori di tutto il mondo, tant'è che la più antica rappresentazione di un esoscheletro potenziato risale al 1830 a cura dell'artista inglese Robert Seymour pubblicato da Thomas McLean dal titolo *Locomotion: walking by steam, Riding by steam, Flying by steam*. In tale immagine, divenuta un'icona nella riabilitazione robotizzata è rappresentato l'uso del motore a vapore come attuatore per le gambe.

L'immagine oltre a rappresentare il sogno di un esoscheletro motorizzato contiene comunque un'intuizione che sarebbe stata poi ripresa negli anni successivi per primi studi scientifici di tipo

implementativo. È del 1880 il primo deposito di brevetto relativo all'esoscheletro motorizzato; brevetto statunitense US420179 a cura di Nicholas Yagn. Tale brevetto era denominato *Apparatus for facilitating walking, running and jumping*. Era prevista una vescica di gas posizionata a mo' di zaino per erogare pressione e attivare il movimento. Proseguendo, nel 1919, troviamo un brevetto relativo ad un esoscheletro che include sulla schiena un piccolo motore a vapore per fornire l'energia necessaria, è il *Pedomotor* di Leslie C. Kelley brevetto statunitense US1308675. Gli anni successivi furono caratterizzati da numerosi tentativi di perfezionamento dei modelli in commercio fino a quando nel 1960 la General Electric, multinazionale statunitense con sede a Boston, presenta *Hardiman*, il primo modello di esoscheletro motorizzato che permetteva, a chi lo utilizzava, di sollevare fino a 680 kg. Tale sistema venne anche chiamato *Iron-Man-Suit*.

Il dispositivo era stato concepito per rispondere a tutti quei casi in cui era necessario sollevare pesi, come ad esempio in campo militare, nelle centrali nucleari o nello spazio. Tutte le speranze riposte nel dispositivo svanirono a causa dell'eccessivo peso del dispositivo, circa 700 kg, e dal fatto che tutti i tentativi di far funzionare correttamente le gambe fallirono.

Un importante contributo allo sviluppo di esoscheletri motorizzati si deve a Vukobratović che insieme al suo team si dedicò allo sviluppo di esoscheletri motorizzati (3). Le sue prime ricerche iniziarono nel 1970 e, come immaginabile, furono soggette a numerose difficoltà legate allo sviluppo della tecnologia; infatti nel mercato erano presenti processori poco potenti, attuatori pesanti (sia pneumatici che elettrici) e alimentatori molto pesanti. In una prima esperienza è stato realizzato un dispositivo dotato di 4 motori, due per le anche e due per le ginocchia, in questo modello la movimentazione della cavaglia non venne considerata ma venne inclusa in una revisione successiva. Gli attuatori che si usarono furono dapprima pneumatici, tuttavia con l'evolversi della tecnologia si passò all'utilizzo di attuatori elettrici.

Nei primi modelli sviluppati da Vukobratović, l'alimentazione per gli attuatori e il computer erano separati dall'esoscheletro a causa del loro peso e delle grandi dimensioni; inoltre, per i movimenti, venivano utilizzati dei modelli predeterminati a causa della bassa potenza di calcolo dei computer dell'epoca. Nelle versioni successive si cercò di migliorare la stabilità dell'utente. Per consentire l'incorporazione di un controllo della stabilità complessiva, l'esoscheletro è stato pertanto ampliato con una struttura per il tronco e l'aggiunta al sistema di due gradi di libertà (nel piano frontale e sagittale). Grazie a nuovi controlli software era possibile in questa versione rivista lo spostamento degli arti lungo la traiettoria desiderata, con correzioni di assetto per mantenere la stabilità.

Dotando le suole dell'esoscheletro con sensori di forza è stato possibile ottenere un feedback dalle forze di reazione al suolo ottenendo nel contempo un miglioramento della stabilità e della sicurezza. Queste modifiche hanno consentito al paziente di camminare da solo mediante l'aiuto di stampelle. Dopo aver eseguito molti esperimenti si è evidenziato che l'inconveniente principale di questa versione era il suo peso di 17 kg (escluso il sistema di alimentazione). Nelle ultime versioni questo è stato ridotto a 12 kg grazie agli ultimi ritrovati nel campo degli attuatori.

Concentrandosi sui pazienti con distrofia all'anca e ai muscoli della coscia, sono stati ridotti i gradi di libertà, mentre l'avvento dei microprocessori ha portato a sviluppare successivamente una versione più compatta, completamente elettrica e portatile. In questa versione era possibile:

- a. controllare i diversi modelli di andatura specificando diverse opzioni:
  - terreno pianeggiante.
  - salire su un gradino.
  - scendere da un gradino.
- b. controllare il ritmo dell'andatura adeguato con interruttori.

Una batteria di 2 kg consentiva di camminare autonomamente per 45 minuti su terreno piano o di salire 2-3 volte le scale fino al terzo piano. Da questa ultima versione si sono evoluti gli esoscheletri motorizzati moderni.

## Gli esoscheletri motorizzati oggi

La fusione della meccatronica con l'*Information and Communication Technology* sta consentendo oggi nuove opportunità agli esoscheletri in riabilitazione. Oggi si preferisce utilizzare la definizione inglese di *Powered Exoskeleton* quando ci si riferisce a questi sistemi meccatronici per individuare universalmente questa nuova tipologia di ausilio. Altri termini meno usati sono: *Powered Armor Exoframe*, *Hardsuit*, *Exosuit*.

Sistemi commerciali *Powered Exoskeleton* e sistemi *Powered Exoskeleton* sviluppati nei centri accademici e di ricerca sono stati recentemente introdotti in diversi scenari di vita. Non c'è dubbio che oggi questi sistemi siano impiegati in diversi settori, principalmente: a) nel campo medico (come dispositivo di riabilitazione); b) nel campo della difesa e dell'emergenza (come dispositivo che consente l'aumento della forza durante le azioni); e c) nel campo civile (come dispositivo che consente l'aumento della forza durante la movimentazione dei carichi). Dall'analisi è comunque emerso che nonostante la destinazione d'uso un *Powered Exoskeleton* può essere utile contemporaneamente in più di uno dei campi sopra elencati. È evidente che un *Powered Exoskeleton* (e non solo quelli specificamente destinati al settore medico) potrebbe dare un grande contributo alla riabilitazione grazie alle specifiche funzionalità che permettono il cammino assistito e il recupero del controllo del movimento grazie ai programmi di riabilitazione specifici.

Una visione dei *Powered Exoskeleton* commerciali e non commerciali, utile per l'obiettivo del tema proposto di riabilitazione, può essere ottenuta nell'analisi riportata in una rivista online del settore e dai due recenti studi di revisione (4-6) dove si rimanda per approfondimenti.

Tutti questi sistemi sono in grado di aiutare le persone con disabilità a riacquistare il controllo sui loro arti, permettono una maggiore mobilità agli anziani o aumentano le capacità dei lavoratori che eseguono un lavoro pesante. Un problema fondamentale dei *Powered Exoskeleton*, è il pilotaggio. Nei sistemi di cui sopra, sono state proposte diverse soluzioni per il pilotaggio, come ad esempio:

- soluzioni basate su joystick;
- soluzioni basate su sensori che utilizzano la comunicazione alternativa e aumentata;
- soluzioni basate su sensori che rilevano l'inclinazione in avanti del tronco (es. monitorando lo spostamento delle stampelle utilizzate come ausili).
- soluzioni basate su sensori per elettromiografia che rilevano l'attivazione muscolare della parte del corpo non influenzata dal danno.

Un *Powered Exoskeleton* particolarmente innovativo che si differenzia da quelli elencati sopra è il *MindWalker* (progettato e sviluppato durante un progetto europeo da parte del Consorzio *MindWalker*) basato sulla *Brain Computer Interface* (BCI) per l'attivazione motoria (7). Attualmente è stata operata una classificazione di questi sistemi esoscheletrici in due classi.

Si parla di sistemi esoscheletrici di classe 1 in riferimento ai sistemi robotizzati non portatili. Appartengono alla *classe 1* quei sistemi robotizzati "non portatili" costituiti da un esoscheletro robotizzato, in alcuni casi da un sistema di tipo *Body Weight Supported* (BWS) per lo sgravio del peso, da un nastro trasportatore e da un sistema informatico di controllo comprendenti anche sistemi di risposta biofeedback basata su realtà virtuale. Questi sistemi sono utilizzati naturalmente solo in clinica e costituiscono in parte un'evoluzione dei sistemi BWS puri descritti nei capitoli successivi. Si parla espressamente di sistemi esoscheletrici di *classe 2* con specifico riferimento ai sistemi portatili e utilizzabili anche esternamente all'ambiente clinico riabilitativo.

## Bibliografia

1. Scivoletto G, Di Lucente L, Fuoco U, Di Donna V, Laurenza L, Macellari V, Giacomozzi C, Molinari M. *Riabilitazione e valutazione dei pazienti mielolesi: l'esperienza della Fondazione S. Lucia di Roma*. Roma: Istituto Superiore di Sanità; 2008. (Rapporti ISTISAN 8/39).
2. Merati G. Paraplegic adaptation to assisted-walking: energy expenditure during wheelchair versus orthosis use. *Spinal Cord* 2000;38:37-44.
3. Vukobratovic M, Borovac B, Surla D, Stokic D. *Biped locomotion: dynamics, stability, control, and application*. Berlin: Springer; 1999.
4. Smashing Robotics. *Overview of robotic exoskeleton suits for limb movement assist*. Smashing Robotics; 2016. Disponibile all'indirizzo: <https://www.smashingrobotics.com/complete-robotic-exoskeleton-suits-list-for-limb-movements>; ultima consultazione 28/5/18.
5. Lajeunesse V, Vincent C, Routhier F, Careau E, Michaud F. Exoskeletons' design and usefulness evidence according to a systematic review of lower limb exoskeletons used for functional mobility by people with spinal cord injury. *Disabil Rehabil Assist Technol* 2016;11:535-47.
6. Miller LE, Zimmermann AK, Herbert WG. Clinical effectiveness and safety of powered exoskeleton-assisted walking in patients with spinal cord injury: systematic review with meta-analysis. *Med Devices (Auckl)* 2016;22:455-66.
7. Morelli S, D'Avenio G, Maccioni G, Daniele C, Pisotta I, Sylos Labini F, La Scaleia V, Ivanenko Y, Molinari M, Grigioni M. Innovazione nei dispositivi medici: l'esoscheletro ovvero arriverci sedia a rotelle? Il progetto MINDWALKER. *Notiziario dell'Istituto Superiore di Sanità* 2013;26(1):3-8.