

Design e manifattura additiva nella personalizzazione degli apparecchi protesici

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.185.6>

Domenico di Fuccia¹, Giuseppe Sorvillo²

¹ *Università degli studi della Campania "Luigi Vanvitelli",
domenico.difuccia@studenti.unicampania.it*

² *Università degli studi della Campania "Luigi Vanvitelli",
giuseppe.sorvillo2@studenti.unicampania.it*

Abstract

Questo contributo mira a esplorare la customizzazione dei dispositivi medici, concentrandosi in particolare sugli apparecchi protesici. Un percorso di ricerca volto a tracciare due linee di sviluppo, quella della cultura del making combinata con l'assistenza sanitaria contemporanea, che sta vivendo una trasformazione rapida e profonda. L'articolo, attraverso una revisione della letteratura e un'analisi critica dello stato dell'arte, pone un'attenzione particolare ai progressi tecnologici e alle applicazioni pratiche nel campo delle protesi personalizzate. Esaminando le capacità fornite dalle tecnologie avanzate, quali la stampa 3D e la progettazione parametrica, si intende dimostrare l'efficacia del design nel migliorare la qualità complessiva del progetto. Mediante lo human-centred design, lo studio si concentra sull'analisi di come la personalizzazione di questi dispositivi possa favorire un'integrazione più efficace nella vita quotidiana degli utenti, riducendo il rischio di stigma associato all'uso di tali dispositivi. L'articolo conclude con una discussione sui limiti e le potenzialità del design parametrico e sulla necessità di coinvolgere direttamente gli utenti finali nel processo di personalizzazione.

Keywords

Customization; well-being; accessibility; prosthetics; 3D printing; open access.

1. Introduzione

Il panorama del XXI secolo è caratterizzato da una serie di cambiamenti economici, sociali e tecnologici senza precedenti. L'accelerazione dell'innovazione e la diffusione sempre più ampia della tecnologia stanno ridefinendo i paradigmi esistenti in molteplici settori. In questo scenario, il design emerge come un'importante forza trainante del cambiamento, assumendo un ruolo cruciale nell'adattamento alle sfide contemporanee e nella creazione di soluzioni innovative.

La stampa 3D, in particolare, rappresenta una delle tecnologie più promettenti di questo secolo. La sua capacità di trasformare i concetti digitali in oggetti fisici ha rivoluzionato i processi di produzione e ha aperto nuove possibilità in svariati campi. La crescente democratizzazione della stampa 3D, resa sempre più accessibile e conveniente, ha ampliato il suo impatto e ha stimolato l'interesse di una vasta gamma di utenti, dai professionisti ai consumatori finali.

L'articolo si propone di esplorare una connessione tra due mondi apparentemente distanti, ma in realtà intimamente legati: il design e il settore medico. Attraverso un'analisi, intendiamo mettere in luce come queste due discipline possano interagire e influenzarsi reciprocamente. La nostra ricerca si concentra sulla dimostrazione di come il design innovativo e le tecnologie emergenti possano convergere per generare soluzioni rivoluzionarie, sia dal punto di vista estetico che funzionale.

Un elemento fondamentale che ha guidato la nostra ricerca è il concetto di customizzazione. In un'epoca in cui l'individualità è sempre più valorizzata, la capacità di personalizzare e adattare le soluzioni alle esigenze specifiche dei singoli individui diventa cruciale. Abbiamo esplorato quindi come la stampa 3D possa consentire la creazione di prodotti su misura nel campo protesico, aprendo la strada a un nuovo paradigma di produzione e consumo.

2. Amputazioni e impatto sulla qualità della vita

2.1. Amputazioni

L'amputazione è un "asportazione totale (spontanea, chirurgica o traumatica) di un arto o di un suo segmento (Treccani, 2010) e rappresenta un evento drammatico che impatta profondamente la vita di un individuo. Nonostante si preveda una diminuzione delle amputazioni grazie agli avanzamenti nei trattamenti medici si prevede che un certo numero di casi rimarrà a causa dell'invecchiamento della popolazione, del diabete e delle malattie vascolari periferiche (Jo et al., 2021).

Le amputazioni degli arti superiori includono:

- Amputazione parziale della mano: dito, metacarpale-falangea, carpale-metacarpale
- Disarticolazione del polso

- Transradiale
- Disarticolazione del gomito
- Transumerale
- Disartico
- Lazione della spalla e amputazione del quarto anteriore

Le amputazioni degli arti inferiori includono:

- Amputazione parziale del piede: resezione del raggio transmetatarsale
- Tarsometatarsale (Lisfranc)
- Transtarsale (Chopart)
- Transcalcaneale (Boyd)
- Disarticolazione della caviglia
- Transtibiale
- Disarticolazione del ginocchio
- Transfemorale
- Disarticolazione dell'anca ed emipelvectomy

2.2. Conseguenze psicologiche

La perdita di un arto è un evento che cambia la vita dei pazienti e delle loro famiglie. In Europa oltre 3,18 milioni di persone hanno subito un intervento di amputazione (Cordis, 2018). Le risposte psicologiche vanno dal dolore all'ansia, dalla depressione al disturbo da stress post-traumatico a causa della perdita e dell'auto-stigmatizzazione (Perkins et al., 2011).

La difficoltà di adattamento dopo l'amputazione può portare a problemi quali bassa autostima, immagine corporea distorta, aumento delle dipendenze e isolamento sociale; pertanto, la diagnosi precoce e il trattamento dei problemi psicologici sono cruciali. Un approccio multidisciplinare, che includa professionisti della salute mentale, è ideale per la riabilitazione dei pazienti amputati, concentrandosi sulle esigenze dei pazienti e di chi si prende cura di loro (Jo et al., 2021).

L'aspetto estetico sembra giocare un ruolo importante nelle conseguenze psicologiche dell'amputazione. L'immagine corporea, definita come "l'immagine psicologica che l'individuo ha di se stesso" viene interrotta quando viene amputato un arto (Phi-siopedia, 2023).

Uno dei fattori che agiscono in positivo nella mente degli utenti amputati è derivante da una corretta progettazione delle protesi e un corretto utilizzo. L'uso di protesi ben adattate riduce il dolore e la depressione post-amputazione (Bhuvaneswar et al., 2007). Al contrario, l'assenza o il ritardo nell'applicazione della protesi può portare a livelli più elevati di ansia, tristezza e fiducia in se stessi. Gli elementi cruciali sembrano essere l'integrazione della protesi nell'immagine corporea e il focalizzarsi sulla funzionalità futura anziché sulla perdita subita (Moore, 1989).

3. Avanzamenti tecnologici nella fabbricazione delle protesi

3.1. Tipologie di protesi

Le prime protesi risalgono all'antichità, con testimonianze che mostrano come già gli Egizi, intorno al 3000 a.C., utilizzassero dispositivi rudimentali per sostituire parti del corpo mancanti (Thurston, 2007). Successivamente, la progettazione delle protesi si è evoluta significativamente attraverso le epoche, passando per l'antica Roma, dove venivano impiegate protesi in metallo per i soldati feriti, fino al Medioevo, quando gli artigiani svilupparono protesi articolate in legno e ferro. Nel Rinascimento, la crescente comprensione dell'anatomia umana portò a ulteriori miglioramenti, culminando nel XIX secolo con l'invenzione della "Hanger Limb" da parte di John Hanger, che segnò l'inizio dell'era moderna della progettazione delle protesi (Backus, 2021).

Le protesi moderne possono essere suddivise in due categorie principali:

- Protesi esoscheletriche
- Protesi endoscheletriche

Le protesi esoscheletriche hanno una rigida struttura esterna in plastica a forma di arto. Sono fissati permanentemente e non regolabili. Queste sono più durevoli e sono da preferire soprattutto quando la protesi può essere esposta a condizioni ambientali difficili come danni da impatto durante il lavoro fisico o un ambiente caustico. Le protesi endoscheletriche hanno una struttura scheletrica centrale interna, che comprende componenti modulari e attacchi che forniscono adattamenti angolari su tutti e 3 i piani e che facilitano la rimozione dei componenti danneggiati. Il sistema endoscheletrico è spesso ricoperto da un materiale morbido a forma di arto e da pelle sintetica applicata sopra la forma anatomica (Stokosa, 2024).

Possiamo ulteriormente suddividere le protesi in: protesi per gli arti superiori e protesi per gli arti inferiori. In questa ricerca ci siamo concentrati sulle protesi per gli arti superiori. Queste ultime si possono classificare in:

- Protesi passive: simulano l'aspetto di un arto naturale ma non offrono capacità di prensione attiva della mano.
- Protesi a energia corporea: utilizzano un sistema di imbracatura e cavi che sfrutta il movimento scapolare e omerale per azionare articolazioni come l'uncino, la mano o il gomito. Sono meno costose, durevoli e richiedono meno manutenzione, spesso preferite da chi svolge lavori fisici.
- Protesi mioelettriche con alimentazione esterna: forniscono movimento attivo della mano e delle articolazioni tramite sensori che rilevano il movimento muscolare residuo, senza dipendere dai movimenti scapolari, omerali o del tronco. Offrono una maggiore forza di presa rispetto alle protesi a energia corporea.

- **Protesi ibride:** combinano caratteristiche delle protesi a energia corporea e mioelettriche, ad esempio integrando un gomito a energia corporea con una mano o un terminale ad energia esterna.
- **Protesi per attività specifiche:** progettate per permettere la partecipazione a specifiche attività senza danneggiare l'arto residuo o la protesi quotidiana, garantendo un funzionamento efficace in contesti particolari (Stokosa, 2024).

3.2. La stampa 3D nel mondo protesico

Lo sviluppo del sistema CAD/CAM (progettazione assistita da computer e produzione assistita da computer) ha cambiato a livello globale la fabbricazione e la fornitura di protesi e ortesi. I progressi tecnologici dall'Industria 1.0 a 4.0 hanno esercitato un'influenza crescente sulla tecnologia e sulle pratiche protesiche (Raschke, 2022).

Negli ultimi anni sono stati apportati numerosi miglioramenti per sviluppare molti prodotti mediante l'introduzione di strumenti assistiti da computer, per ridurre i costi e i tempi del processo di progettazione e produzione. Inoltre, si è verificata una grande interazione tra la personalizzazione di prodotti caratterizzati dal corpo umano o da parte di esso.



Figura 1
e-NABLE devices
designs by Enabling
The Future: [https://
enablingthefuture.
org/e-nable-devices/](https://enablingthefuture.org/e-nable-devices/).

La diffusione delle stampanti 3D ha democratizzato l'accesso alle protesi, migliorando la vita delle persone con disabilità fisiche. Le protesi stampate in 3D sono infatti estremamente più economiche della loro controparte tradizionale. Ad esempio, una protesi per un arto superiore mioelettrica stampata in 3D disponibile commercialmente ha un costo di circa 1000-3000\$ (Youbionic, Open Bionics). Inoltre, la stampa 3D permette anche l'autoproduzione, riducendo ulteriormente i costi che si limitano al costo del materiale, circa 500\$. Confrontando questi prezzi con le protesi mioelettriche tradizionali, che hanno costi che vanno dai 25000 ai 75000\$, c'è una grande differenza (Kate et al., 2017). Appare quindi evidente il vantaggio economico che queste tecnologie possono apportare al mondo degli apparecchi protesici.

Soprattutto quando gli utenti sono bambini e quindi hanno bisogno di cambiare la protesi frequentemente, l'economicità e l'accessibilità giocano un ruolo fondamentale. La stampa 3D riesce inoltre a facilitare il processo di riparazione e sostituzione, in quanto è possibile agire sul singolo componente anziché sull'intero apparecchio.

La stampa 3D offre numerosi vantaggi rispetto ad altre tecniche di produzione (Campbell et al., 2011). Più della metà dei progetti di protesi degli arti superiori stampati in 3D sono disponibili come "open source" online, ad esempio E-NABLE Fig. 1 (Enabling The Future, n.d.), Cyborg Beast Fig. 2 (Zuniga, 2014). Questo significa che chiunque può scaricare i disegni, esaminarli, apportare modifiche e condividere le proprie versioni del progetto.

L'organizzazione Enable è un esempio chiave di come questa filosofia di collaborazione aperta possa trasformare il mondo delle protesi personalizzate. Enable offre una piattaforma che mette a disposizione una serie di modelli di protesi personalizzabili, scaricabili e modificabili dagli utenti stessi. Gli utilizzatori, anche senza una formazione tecnica specifica, possono adattare i progetti alle proprie esigenze fisiche e stilistiche, garantendo una maggiore integrazione della protesi nella vita quotidiana. L'utente può intervenire su vari aspetti della protesi, come la taglia, la forma, il colore e persino le funzionalità aggiuntive, rendendo la protesi non solo uno strumento funzionale ma anche un'espressione della propria personalità.

Questa collaborazione aperta può portare a miglioramenti rapidi ed economici. Tuttavia, non tutti coloro che creano questi progetti sono esperti nella creazione di protesi. È quindi cruciale considerare attentamente le necessità specifiche degli utilizzatori delle protesi durante il processo di progettazione.

L'aspetto estetico delle protesi è sempre più importante. Oltre alle funzionalità e alla biomeccanica, l'estetica influisce sul benessere psicologico e sull'accettazione della protesi. Coinvolgere l'utente nella progettazione attraverso la modellazione parametrica permette adattamenti precisi alle sue esigenze, migliorando comfort e soddisfazione.

Grazie a Enable, gli utenti possono partecipare attivamente al processo di creazione della loro protesi, ottenendo dispositivi su misura che non solo rispondono ai loro bisogni funzionali, ma riflettono anche preferenze estetiche e identità individuali.

Questo approccio non solo favorisce l'uso regolare della protesi ma anche l'empowerment del paziente, migliorando l'esperienza post-operatoria complessiva. Esistono dei casi che coinvolgono l'utente nella progettazione della protesi come ad esempio Limbitless, che è specializzata nella progettazione, nello sviluppo e nella fornitura di braccia protesiche personalizzate, creative ed espressive per bambini e adulti. Le protesi utilizzano la tecnologia elettromiografica per eseguire funzioni multi-gestuali (Limbitless, n.d.). Questa realtà per quanto interessante è però ancora alla fase delle sperimentazioni cliniche e quindi non accessibile al pubblico.

**Figura 2**

Cyborg Beast by Jorge M. Zuniga, available on Thingiverse: <https://www.thingiverse.com/thing:261462>.

3.3. Personalizzazione e design parametrico

Il design parametrico si distingue per la sua capacità di personalizzare in modo preciso i dispositivi medici, sfruttando la modellazione algoritmica per adattare i progetti alle specifiche esigenze degli utenti. Questo approccio utilizza parametri variabili che possono essere modificati per ottimizzare l'ergonomia, la funzionalità e l'estetica della protesi. Grazie a software avanzati e alla stampa 3D, è possibile creare protesi che rispondono non solo alle necessità funzionali, ma anche agli aspetti estetici e psicologici degli utenti.

Uno studio rilevante è quello di Manero et al. (2019), che esamina l'implementazione della tecnologia di stampa 3D nel campo delle protesi, evidenziando come il design parametrico consenta di personalizzare i dispositivi per soddisfare le esigenze specifiche degli utilizzatori. L'analisi delle pratiche adottate da Enable dimostra come l'applicazione del design parametrico possa trasformare radicalmente il processo di progettazione e realizzazione delle protesi, offrendo soluzioni perfettamente adattate alle necessità individuali.

Tuttavia, nonostante le avanzate capacità della parametrizzazione e della produzione additiva, è spesso necessario l'intervento di un designer specialista. I designer esperti possono garantire che le modifiche apportate attraverso la parametrizzazione non compromettano la funzionalità e l'efficacia della protesi. Inoltre, forniscono consulenze per ottimizzare il design e risolvere eventuali problemi tecnici che potrebbero sorgere durante il processo di produzione additiva.

Per quanto riguarda l'accessibilità, la progettazione parametrica può essere accessibile direttamente all'utente finale, ma questo dipende dalla disponibilità di strumenti e risorse adeguate. Alcuni programmi di progettazione parametrici possono essere utilizzati anche da persone non esperte, permettendo agli utenti finali di personalizzare direttamente i propri dispositivi. Tuttavia è fondamentale una progettazione adeguata da parte del designer che garantisca che le modifiche apportate non compromettano la funzionalità e la sicurezza della protesi, pur lasciando ampio spazio di manovra all'utente.

Attraverso la customizzazione e il coinvolgimento diretto dell'utente finale nel processo di progettazione della propria protesi, si può contribuire a ridurre lo stigma associato all'amputazione. Questo approccio rende il dispositivo non solo un aiuto funzionale, ma anche un'espressione dell'identità e delle preferenze dell'utente, promuovendo una maggiore accettazione e inclusione.

4. Conclusione

Abbiamo visto come le persone che subiscono un'amputazione vanno incontro a difficoltà non solo fisiche ma anche psicologiche, soprattutto relative all'accettazione da parte di se stessi e degli altri. L'uso di protesi adeguate può aiutare i pazienti a superare lo stigma associato con la perdita di un arto. Negli ultimi anni c'è stato un notevole progresso nella fabbricazione di protesi, con un'attenzione sempre crescente ai bisogni e alle preferenze del singolo utente. Questa capacità di personalizzazione è sempre più accessibile, grazie soprattutto agli avanzamenti tecnologici, in particolare nella manifattura additiva, che permette di creare pezzi unici con costi di produzione relativamente contenuti rispetto alle controparti tradizionali. Questa personalizzazione è però ancora prettamente legata alla funzionalità dell'arto, che per quanto fondamentale spesso trascurava l'aspetto estetico. La customizzazione a livello empatico è un processo che va oltre la semplice ottimizzazione delle prestazioni fisiche. Si tratta di creare una connessione emotiva tra l'utente e il dispositivo, comprendendo le sue esigenze, desideri e esperienze individuali. Questo non significa sempre ricreare fedelmente l'arto mancante ma può significare trasformare la protesi in un accessorio che l'utente indossa con orgoglio.

La ricerca vuole porre l'attenzione su come l'uso di protesi personalizzate, progettate con la collaborazione dell'utente, può aiutare a colmare o addirittura eliminare le difficoltà psicologiche e a favorire l'accettazione di sé. Coinvolgere l'utente nel processo di progettazione non solo migliora la funzionalità della protesi, ma promuove anche un senso di identità e orgoglio nell'uso del dispositivo, suggerendo che il futuro della protesica risiede in un approccio sempre più user-centered e collaborativo. Sebbene siano stati compiuti significativi progressi in questo campo, è essenziale continuare la ricerca per esplorare come il design possa fare da mediatore tra il mondo medico, tecnologico e l'utente finale. Solo attraverso una continua ricerca e innovazione è possibile garantire che le protesi non solo soddisfino le esigenze funzionali, ma migliorino anche l'esperienza complessiva dell'utente.

Referenze

- Backus, P.G. (2021). The Story of James E. Hanger: Amputee Turned Entrepreneur. [online] American Battlefield Trust. Available at: <https://www.battlefields.org/learn/articles/story-james-e-hanger-amputee-turned-entrepreneur> [Accessed 15 Jun. 2024].
- Bhuvaneswar, C.G., Epstein, L.A. and Stern, T.A. (2007). Reactions to Amputation: Recognition and Treatment. The Primary Care Companion to The Journal of Clinical Psychiatry, [online] 09(04), pp. 303-308. <https://doi.org/10.4088/pcc.v09n0408>
- Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O. and Garrett, B. (2011). Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing. [online] JSTOR. Atlantic Council. Available at: <https://www.jstor.org/stable/resrep03564>
- Cordis (2018). Sensibilità ripristinata per gli amputati: non più arti fantasma. [online] CORDIS | European Commission. Available at: <https://cordis.europa.eu/article/id/229055-sense-of-feeling-restored-for-amputees-no-more-phantom-limbs/it> [Accessed 15 Jun. 2024].
- Enabling The Future (n.d.). [e-NABLE devices designs]. Retrieved 15 June 2024, from <https://enablingthefuture.org/e-nable-devices/>
- Jo, S.-H., Kang, S.-H., Seo, W.-S., Koo, B.-H., Kim, H.-G. and Yun, S.-H. (2021). Psychiatric understanding and treatment of patients with amputations. Yeungnam University Journal of Medicine, [online] 38(3), pp. 194-201. <https://doi.org/10.12701/yujm.2021.00990>
- Kate, J. T., Smit, G. and Breedveld, P. (2017). 3D-printed upper limb prostheses: a review. Disability and Rehabilitation Assistive Technology, 12(3), pp. 300-314. <https://doi.org/10.1080/17483107.2016.1253117>
- Limbitless (n.d.). Creative, expressive, Personalized Prosthetics | Limbitless Solutions. <https://www.scribbr.com/proofreading-editing/>
- Manero, A. et al. (2019). Implementation of 3D printing technology in the field of prosthetics: past, present, and future. International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(9), 1641. doi: 10.3390/ijerph16091641.
- Moore, W.S. (1989). Lower Extremity Amputation. W B Saunders Company.
- Perkins, Z.B., De'Ath, H.D., Sharp, G. and Tai, N.R.M. (2011). Factors affecting outcome after traumatic limb amputation. British Journal of Surgery, 99(S1), pp. 75-86. doi:<https://doi.org/10.1002/bjs.7766>

- Physiopedia (2023). Emotional and Psychological Reactions to Amputation. [online] Physiopedia. Available at: https://www.physio-pedia.com/Emotional_and_Psychological_Reactions_to_Amputation [Accessed 15 Jun. 2024].
- Raschke, S.U. (2022). Limb Prostheses: Industry 1.0 to 4.0: Perspectives on Technological Advances in Prosthetic Care. *Frontiers in Rehabilitation Sciences*, [online] 3. doi:<https://doi.org/10.3389/freesc.2022.854404>.
- Stokosa, J.J. (2024). Edema dell'arto residuo - Argomenti speciali. [online] Manuali MSD Edizione Professionisti. Available at: <https://www.msdmanuals.com/it-it/professionale/argomenti-speciali/protesi-degli-arti/edema-dell-arto-residuo> [Accessed 15 Jun. 2024].
- Thurston, A.J. (2007). Paré and prosthetics: the early history of artificial limbs. *ANZ Journal of Surgery*, 77(12), pp. 1114-1119. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1445-2197.2007.04330.x>.
- Treccani (2010). Amputazione – Enciclopedia. [online] Treccani. Available at: [https://www.treccani.it/enciclopedia/amputazione_\(Dizionario-di-Medicina\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/amputazione_(Dizionario-di-Medicina)/) [Accessed 15 Jun. 2024].
- Zuniga, J. M. (2014). Cyborg Beast [photograph]. Thingiverse. <https://www.thingiverse.com/thing:261462>.