

O CONTRIBUTO DOS FATORES HUMANOS NO DESIGN DE PRODUTOS PARA A REABILITAÇÃO DE AMPUTADOS PRODUZIDOS POR FABRICAÇÃO ADITIVA

THE CONTRIBUTION OF HUMAN FACTORS IN THE DESIGN OF PRODUCTS FOR THE REHABILITATION OF AMPUTEES PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Pedro Moreira¹, Demétrio Matos², Daniel Miranda³, Vítor Carvalho⁴

¹ID+ Research Institute in Design, Media and Culture, School of Design, Polytechnic Institute of Cávado and Ave; pmoreira@ipca.pt; ORCID 0009-0004-0611-2481

²ID+ Research Institute in Design, Media and Culture, School of Design, Polytechnic Institute of Cávado and Ave; dmatos@ipca.pt; ORCID 0000-0003-4417-6115

³2Ai, School of Technology, Polytechnic Institute of Cávado and Ave; damiranda@ipca.pt; ORCID 0000-0001-8466-2607

⁴2Ai, School of Technology, Polytechnic Institute of Cávado and Ave; vcarvalho@ipca.pt; ORCID 0000-0003-4658-5844

Abstract

Background: The amputation of a limb is a devastating phenomenon in an individual's life, having a direct impact on their life, both physically and psychologically.

Objective: To understand how human factors influence and contribute to the design of additive manufacturing prosthetic devices, as well as to the rehabilitation process of amputees.

Materials and Methods: A quantitative and qualitative research was conducted, using literature review, focusing on the area of design for health.

Results: It was noticed that the correct application of human factors in the design of prosthetic devices by additive manufacturing contributes in a positive way in the rehabilitation process, also leading to an increase in the acceptance rate.

Conclusions: With the correct application of human factors, it becomes possible to develop a device by additive manufacturing that suits the needs and characteristics of each user.

Keywords: Design for health; Amputation; Upper limb prosthesis, 3D printing; Personalization

Introdução

A escolha do tema para a redação deste artigo reside na necessidade em colmatar situações de amputação, através de dispositivos que vão de encontro às necessidades e requisitos dos seus utilizadores, tanto a nível ergonómico como a nível estético. Segundo Francisco et al. (2022), o tema tratado tem vindo a ganhar mais visibilidade ao longo dos últimos anos, sendo que a sua abordagem é agora mais reconhecida e significativa para a sociedade. Desta forma, pretende-se perceber em que medida é que os fatores humanos se relacionam com o desenvolvimento de dispositivos protésicos por fabricação aditiva, quais os mais importantes, qual o seu impacto na prática ocupacional bem como de que forma influenciam o processo de reabilitação de um amputado. Sabe-se de antemão que a aplicação dos fatores humanos (FH) em questões funcionais e estéticas durante o desenvolvimento de dispositivos protésicos (DP), é imprescindível para o seu sucesso clínico e para uma reabilitação bem-sucedida (Privitera et al., 2009). Contudo, raramente um dispositivo se adapta a todas as situações suprimindo as necessidades dos utilizadores. O problema que se irá debater, foca-se na falta de personalização dos DP, sendo, muito possivelmente, uma das causas que origina o descontentamento dos utilizadores. Este argumento é sustentado, visto que, mesmo após inúmeros avanços a nível tecnológico (Salminger et al., 2022), não existem evidências que comprovem que os mesmos contribuem para a aceitação de DP (Salminger et al., 2019). O recurso à fabricação aditiva, é uma das soluções que responde a este problema, se a aplicação dos FH, ou seja, a integração das considerações dos utilizadores, forem aplicados devidamente durante o seu processo de desenvolvimento (Thomas & Singh, 2020). Questões como a imagem corporal e estigma social são também abordadas ao longo deste artigo. Assim, este documento pretende apresentar a

relação entre os FH e os DP e o impacto desta relação na prática ocupacional, onde para isso, será realizada uma revisão sistemática da literatura.

Amputação

A amputação é um acontecimento devastador na vida de um indivíduo que, inevitavelmente, leva a uma drástica alteração da sua vida quotidiana, da sua interação com o meio social, bem como da percepção que este tem sobre a sua imagem corporal. A causa deste acontecimento, na sua maioria, provém de acidentes (perda traumática), afetando mais indivíduos do sexo masculino, mas também derivam de neoplasias e doenças cardiovasculares ou infecciosas (Cordella et al., 2016). Amputações derivadas de práticas ocupacionais diminuíram bastante nos últimos anos, sendo que a principal razão se deve ao facto de se preservar bastante a saúde e segurança dos trabalhadores atualmente. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), cerca de 650 milhões de pessoas apresentam alguma incapacidade, onde destas cerca de 3 milhões apresentam a amputação de um membro superior (Hussain et al., 2019). Esta amputação conduz a um impacto significativamente maior na vida de um indivíduo se comparada com a amputação de um membro inferior (Behrend et al., 2011). Este acontecimento, deve-se ao facto de a mão apresentar uma multiplicidade de funções, onde destas resulta a interação com objetos e o meio envolvente, mas também a interação com o meio social bem como em alguns casos poder mesmo servir como meio de comunicação (para invisuais ou mudos). Indivíduos que sofrem de uma amputação traumática, igualam-na à perda de um familiar, desencadeando várias complicações, a nível pessoal e social, afetando diretamente a sua qualidade de vida (De Putter et al., 2014; Trent et al., 2020). A imagem corporal destes fica assim afetada, devido a mudanças traumáticas na sua aparência, o que resulta numa alteração da sua imagem corporal pré-existente e um afastamento do corpo idealizado (Gilg, 2016). Mais ainda, a amputação leva a um declínio da capacidade física, o que em muitos casos irá afetar a permanência no seu emprego, desencadeando problemas económicos, o isolamento e uma quebra na auto-estima (Abdulrazaq et al., 2022). Contudo, o processo de reabilitação pode ser bem mais eficaz quando introduzido um dispositivo protésico. Nesse sentido, o uso de DP, tem como propósito ajudar as pessoas com deficiências físicas ou restrições funcionais, com o objetivo de melhorar o seu funcionamento e aumentar o seu potencial para viver uma vida saudável, produtiva, independente e digna (WHO, 2017).

Dispositivos Protésicos

Os DP para um membro são definidos pela *International Organization for Standardization* como sendo um “dispositivo aplicado externamente usado para substituir total ou parcialmente um segmento de membro ausente ou deficiente” (ISO, 2020). Estes podem apresentar diferentes configurações ou formas de funcionamento, com o intuito de ajudar os amputados. Alguns autores, como Unanyan & Belov (2021) defendem a existência de quatro tipos de DP; (i) dispositivos cosméticos, (ii) mecânicos, (iii) mioelétricos e (iv) híbridos. Outros, como Hussain et al. (2019) e Trent et al. (2020), consideram mais um tipo de dispositivo, sendo este para uma atividade/uso específico. Segundo Cordella et al. (2016), os diferentes tipos de DP podem ser divididos em duas categorias, DP ativos e passivos, tendo em conta o seu funcionamento. Com o uso destes dispositivos, o processo de reabilitação de um amputado torna-se mais rápido e eficiente. Um desses exemplos, é o uso de DP cosméticos, que têm a função de desviar a atenção das outras pessoas, o que permite que o utilizador possa circular livremente sem ser notado. Mais ainda, o seu uso leva a um aumento significativo da qualidade de vida, na medida em que, o utilizador acaba por apresentar um aumento do seu nível de confiança, o que ajuda na realização das suas atividades diárias (Hussain et al., 2019). Contudo, percebe-se que ainda existe um caminho longo a percorrer para que realmente os DP possam satisfazer plenamente os seus utilizadores, sendo que para isso questões como a integração dos utilizadores no processo de design devem ser resolvidas. Esta questão é defendida por Young (2022), o qual afirma que pessoas com deficiências continuam a não fazer parte do processo de design dos DP, o que acaba por resultar em dispositivos pouco satisfatórios.

Fabricação Aditiva

A Fabricação Aditiva (FA) é um processo que se apresenta como o mais disruptivo das últimas três décadas, de entre os vários processos de manufatura já existentes. Foi introduzido inicialmente como um processo de prototipagem rápida, contudo, devido ao grande potencial a ele inerente, as técnicas de FA começaram a ser aplicadas nos produtos finais (Sossou et al., 2018). Este processo de fabrico, baseia-se na construção de objetos através de diferentes camadas, permitindo a realização de formas complexas (Bikas et al., 2016) partindo originalmente de um modelo CAD (Leite et al., 2019). Com a implementação da FA em diferentes áreas, observa-se uma maior liberdade e alternativas no processo de design de novos produtos (Sossou et al., 2018). Áreas como a saúde, indústria automóvel, aeroespacial e da defesa, são as que mais recorrem aos processos de FA. Desta forma, com a introdução de processos de FA no desenvolvimento de Dispositivos Médicos (DM), a área da saúde sofreu mudanças consideráveis (Dodziuk, 2016). Este acontecimento, deve-se ao facto de os dispositivos produzidos por FA poderem ser personalizáveis, através de um custo mais acessível, o que está comprovado que em muitos casos promove a reabilitação dos utilizadores (Aimar et al., 2019; Banga et al., 2021).

Definição do Problema

Percebeu-se ao analisar diversos artigos, que os DP para membros superiores apresentam ainda várias questões que limitam o seu uso. Estas podem ser limitações a nível mecânico, número de graus de liberdade da mão, a execução de movimentos rápidos e suaves bem como a resposta ao toque (Engdahl et al., 2015); mas também limitações estético-formais, onde se observa pouca evolução na importância dada a esta questão no processo de desenvolvimento (Matos et al., 2015). Mais ainda, existe uma grande percentagem de abandono deste tipo de dispositivos, devido ao facto de a tecnologia implementada nos mesmos não satisfazer plenamente as necessidades dos utilizadores (Jabban et al., 2022; Saradjian et al., 2008). Segundo Salminger et al. (2022), percebe-se que, de facto, a taxa de abandono dos DP mantém-se praticamente inalterada, ou sem grandes alterações, na última década. Torna-se assim legítimo afirmar, que existe alguma lacuna presente no processo de reabilitação, o que resulta no incumprimento das necessidades/requisitos e na insatisfação dos utilizadores de DP. Incluir o processo de design, poderá ser um aliado crucial durante o desenvolvimento de DP bem como durante o processo de reabilitação de um amputado. Matos et al. (2015) sugere que o desenvolvimento de DP no futuro deverá incluir um designer nas equipas multidisciplinares, sendo que a sua participação irá agregar valor ao produto e contribuir no conforto, bem-estar e qualidade de vida dos utilizadores de DP. Este argumento torna-se ainda mais relevante sabendo que o estigma inerente aos DP ocorre, maioritariamente, em indivíduos que utilizam dispositivos que durante o seu processo de desenvolvimento carecem do acompanhamento de um designer (Vaes & Stappers, 2014). Uma das potenciais formas de combate ao estigma, inerente ainda ao uso de DP, passa pela personalização destes dispositivos.

Materiais e métodos

A pesquisa para o desenvolvimento deste artigo, focou-se maioritariamente na procura e análise de informação dentro da área do design para a saúde. Foram utilizadas diferentes bases de dados para realizar a recolha de informação: PubMed, Google Scholar, ScienceDirect, ResearchGate, BMC e b-on. As palavras-chave utilizadas (singulares ou em combinação) e em inglês, foram as seguintes: *Amputation; Upper Limb Amputation; Upper Limb Prosthetic; Prosthesis; Prosthetic Devices; Design for Health; 3d Printing; Body Image, Product-Related Stigma; Social Stigma; Personalization; Requirements; Patient needs*. Como critério de escolha foram incluídos apenas os artigos redigidos em língua inglesa, por apresentarem um conjunto maior de informação, e com data de publicação após o ano de 2016, com o objetivo de identificar apenas publicações mais recentes. Foram excluídos todos os que de alguma forma não iam de encontro ao tema abordado onde como critério de seleção da relevância dos mesmos consideraram-se os seguintes aspetos: tema abordado; resultados obtidos; importância e adequação ao tema em análise.

Resultados e discussão

Como resultado da pesquisa efetuada foram selecionados 21 artigos. Após uma primeira análise, foram excluídos 13 artigos, onde a razão pela sua exclusão passa pelo facto de estes apresentarem resultados que não estão alinhados com o tema debatido neste artigo, resultando assim, numa análise mais detalhada dos 8 artigos restantes. Ao analisar os artigos, percebeu-se que incorporar o utilizador durante o processo de desenvolvimento de DP, bem como uma correta aplicação dos FH, contribui para uma melhor aceitação destes dispositivos e para o processo de reabilitação, na medida em que ajuda na avaliação das suas necessidades (Kamil et al., 2020). Salminger et al. (2022) partilha da mesma opinião, acrescentando ainda, que ao incorporar as tomadas de decisão dos utilizadores durante esse processo, diminuem-se as probabilidades de um dispositivo caro não vir a ser usado no futuro. Segundo o questionário levado a diante pelo mesmo autor, cerca de 60% dos inquiridos mencionam o conforto como sendo o aspeto mais importante, onde a falta do mesmo prevalece como uma das principais causas de abandono de DP (Salminger et al., 2022). Esta questão foi também mencionada num artigo de revisão de literatura por Cordella et al. (2016), onde o conforto foi mencionado como uma prioridade no processo de design, seguido da aparência. O peso do DP surge como um dos problemas mais relevantes, sendo que a alternativa para mitigar o mesmo, poderá passar pela utilização de tecnologias de FA, o que irá permitir a redução do peso do equipamento. Segundo a análise de Cordella et al. (2016), grande parte do tempo dispendido com o uso de um DP acontece durante a prática ocupacional, onde mais de metade dos amputados reportaram sentir-se insatisfeitos ou pouco satisfeitos com os seus DP, o que poderá levar a um sentimento de frustração constante ou causar possíveis acidentes. Na sua causa, poderá estar o excesso de peso do dispositivo, a incompatibilidade para desempenhar determinadas tarefas e/ou a falta de personalização do mesmo. Neste momento, a saúde do trabalhador é afetada, onde devem ser implementadas medidas que capacitem o amputado a cumprir as suas funções durante as práticas ocupacionais. A inclusão das pessoas afetadas, leva à mitigação da frustração, bem como a promoção da igualdade dentro e fora dos espaços de trabalho. Considera-se assim, que o dispositivo não deve ser meramente visto como um produto de apoio, mas também como algo que potencializa boas emoções para o utilizador, originando um impacto positivo na interação entre ambos (Sansoni et al., 2016). Desta forma, o aumento da satisfação por parte do utilizador com o seu dispositivo leva a que exista também um aumento da perceção da sua função (Zhang et al., 2021). Assim, o amputado irá apresentar uma maior disposição para enfrentar os desafios que surgem durante o seu dia, como por exemplo desempenhar tarefas que poderia até achar impossível de serem realizadas após a amputação. Contudo, a demora que existe, entre a amputação e a aquisição de um DP, contribui para a rejeição dos mesmos, onde segundo os dados obtidos por Salminger et al. (2022) demonstram que este processo demora entre 21 a 51 meses. Sabe-se que, se o processo de reabilitação de um amputado for realizado nos primeiros 6 meses, apresenta uma maior taxa de sucesso (Biddiss & Chau, 2008). Desta forma, a introdução de novas tecnologias, como a impressão 3D, permite uma maior rapidez no processo de desenvolvimento, o que em teoria, levará a taxas mais elevadas de aceitação dos DP's. Mais ainda, ao serem utilizadas tecnologias de FA, a possibilidade de se adquirir um DP para a realização de determinadas tarefas torna-se menos dispendioso, possibilitando a sua adaptabilidade às características do utilizador e às necessidades da prática ocupacional. Copeland et al. (2022), demonstram que um DP desenvolvido por FA apresenta um aumento da sua performance funcional na execução de duas tarefas, quando comparado com um dispositivo desenvolvido por processos convencionais. Assim, aquisição de um DP por FA, poderá levar à permanência de um amputado na prática ocupacional desempenhada antes de sofrer a amputação. Contudo, numa visão geral, o dispositivo desenvolvido por FA apresenta um valor menos satisfatório, devido a questões que preocupam o utilizador, como a sua eficácia e a durabilidade (Copeland et al., 2022). Estas questões podem ser justificadas devido ao facto de a FA estar ainda num processo de transição, sendo notório que ainda não existe uma implementação concreta desta tecnologia na área dos DP (Vujaklija & Farina, 2018). Ainda assim, as vantagens significativas da aplicação da FA nos DP, devem ser mencionadas, que incluem a aparência, a facilidade da sua colocação, a redução de peso e a personalização o que promove a simetria entre os dois membros (Copeland et al., 2022). Mais ainda, quando o design de DP é centrado nas necessidades e características do utilizador, estes vão de encontro à sua anatomia, as forças aplicadas no

dispositivo durante o seu uso são distribuídas mais uniformemente no membro residual o que resulta num dispositivo mais confortável, levando ainda a uma menor taxa de abandono e um aumento da sua qualidade de vida (Kate et al., 2017; Leite et al., 2019; Wendo et al., 2022).

Conclusões

Os resultados da análise mostram que se os FH não forem aplicados corretamente durante o processo de desenvolvimento de DP por FA, as características mais promissoras e vantajosas deste processo estão a ser desvalorizadas, como por exemplo a personalização. Conclui-se também que as prioridades de cada utilizador em relação aos DP (conforto, peso, aspeto), podem estar diretamente relacionadas com o tipo de dispositivo que usam. A sua prática ocupacional também tende a influenciar a escolha de um DP, sendo que amputados que apresentam trabalhos manuais mais intensivos ou exteriores, tendem a escolher dispositivos movidos pelo corpo por serem mais robustos e de manuseio mais rápido. Por outro lado, amputados que apresentam práticas ocupacionais menos exigentes, como trabalhadores de escritório, optam pela aquisição de DP mioelétricos. Ou seja, desta forma torna-se possível saber quais os aspetos que devem ser melhorados em cada tipo de dispositivo. Mais ainda, ao reconhecer estes aspetos, os gostos pessoais dos utilizadores bem como o dispositivo ideal para os mesmos (Sansoni et al., 2016), torna mais fácil o processo de atribuição de um DP e a diminuição do tempo de espera. Incluir os utilizadores no processo de desenvolvimento de DP por FA, onde estes dispositivos podem ser desenvolvidos tendo em conta as suas necessidades (pessoais ou de cariz ocupacional) e características (físicas ou psicológicas), irá permitir que os mesmos se sintam integrados na comunidade, contribuindo para o seu processo de reabilitação, levando ao aumento do seu desempenho em várias tarefas. Desta forma, reforça-se a vantagem da produção de DP por FA (Butkus et al., 2014; Østlie et al., 2012). Estas questões vêm comprovar a importância de um correto acompanhamento, bem como a integração do utilizador final durante a fase de desenvolvimento e aquisição de DP.

Agradecimentos e financiamento

O autor PM é bolseiro do ID+, financiado por fundos nacionais através da FCT –Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto «Refª UIDP/04057/2020». Os autores DM, DM e VC são financiados por fundos nacionais através da FCT –Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto «Refª PeX_2022.09053.PTDC».

Referências

- Abdulrazaq, A. S., Shlash, A. M. J., Hrefish, Z. A., Mohammed, M. A., Obaid, A. F., & Abdulrasol, Z. A. (2022). Body Image and Its Association With Self-esteem Among Amputation Cases at Prosthetics Center in Hilla City, Iraq. *Iranian Rehabilitation Journal*, 20(2), 237–243. <https://doi.org/10.32598/irj.20.2.1621.3>
- Aimar, A., Palermo, A., & Innocenti, B. (2019). The Role of 3D Printing in Medical Applications: A State of the Art. In *Journal of Healthcare Engineering* (Vol. 2019). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2019/5340616>
- Banga, H. K., Kumar, P., & Kumar, H. (2021). Utilization of Additive Manufacturing in Orthotics and Prosthetic Devices Development. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1033(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1033/1/012083>
- Behrend, C., Reizner, W., Marchessault, J. A., & Hammert, W. C. (2011). Update on advances in upper extremity prosthetics. In *Journal of Hand Surgery* (Vol. 36, Issue 10, pp. 1711–1717). W.B. Saunders. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2011.07.024>
- Biddiss, E. A., & Chau, T. T. (2008). Multivariate prediction of upper limb prosthesis acceptance or rejection. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 3(4), 181–192. <https://doi.org/10.1080/17483100701869826>
- Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1–4), 389–405. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>

- Butkus, J., Dennison, C., Orr, A., & Laurent, M. S. (2014). Occupational Therapy with the Military Upper Extremity Amputee: Advances and Research Implications. In *Current Physical Medicine and Rehabilitation Reports* (Vol. 2, Issue 4, pp. 255–262). Springer. <https://doi.org/10.1007/s40141-014-0065-y>
- Copeland, C., Reyes, C. C., Peck, J. L., Srivastava, R., & Zuniga, J. M. (2022). Functional performance and patient satisfaction comparison between a 3D printed and a standard transradial prosthesis: a case report. *BioMedical Engineering Online*, 21(1). <https://doi.org/10.1186/s12938-022-00977-w>
- Cordella, F., Ciancio, A. L., Sacchetti, R., Davalli, A., Cutti, A. G., Guglielmelli, E., & Zollo, L. (2016). Literature review on needs of upper limb prosthesis users. In *Frontiers in Neuroscience* (Vol. 10, Issue MAY). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00209>
- De Putter, C. E., Selles, R. W., Haagsma, J. A., Polinder, S., Panneman, M. J. M., Hovius, S. E. R., Burdorf, A., & Van Beeck, E. F. (2014). Health-related quality of life after upper extremity injuries and predictors for suboptimal outcome. *Injury*, 45(11), 1752–1758. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2014.07.016>
- Dodziuk, H. (2016). Applications of 3D printing in healthcare. In *Kardiochirurgia i Torakochirurgia Polska* (Vol. 13, Issue 3, pp. 283–293). Termedia Publishing House Ltd. <https://doi.org/10.5114/kitp.2016.62625>
- Engdahl, S. M., Christie, B. P., Kelly, B., Davis, A., Chestek, C. A., & Gates, D. H. (2015). Surveying the interest of individuals with upper limb loss in novel prosthetic control techniques. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-015-0044-2>
- Francisco, M., Junior, O. C., Okumura, M. L., & Santanna, A. M. (2022). Development of prosthetic device based on engineering design approach. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1635202/v1>
- Gilg, A. C. (2016). The Impact of Amputation on Body Image [University of Southern Mississippi]. https://aquila.usm.edu/honors_theseshttps://aquila.usm.edu/honors_theses/410
- Hussain, S., Shams, S., & Jawaid Khan, S. (2019). Impact of Medical Advancement: Prostheses. In *Computer Architecture in Industrial, Biomechanical and Biomedical Engineering*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86602>
- ISO. (2020). Prosthetics and orthotics - Vocabulary - Part 1: General terms for external limb prostheses and external orthoses (ISO 8549-1) (No. 8549-1). ISO. www.iso.org
- Jabban, L., Metcalfe, B. W., Raines, J., Zhang, D., & Ainsworth, B. (2022). Experience of adults with upper-limb difference and their views on sensory feedback for prostheses: a mixed methods study. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-022-01054-y>
- Kamil, M. J. M., Shi, S. M. L., & Sani, M. N. A. (2020). Re-assessing the design needs of trans-radial amputees in product design innovation. *Wacana Seni*, 19, 61–71. <https://doi.org/10.21315/ws2020.19.5>
- Kate, J. ten, Smit, G., & Breedveld, P. (2017). 3D-printed upper limb prostheses: a review. In *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology* (Vol. 12, Issue 3, pp. 300–314). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/17483107.2016.1253117>
- Leite, M., Soares, B., Lopes, V., Santos, S., & Silva, M. T. (2019). Design for personalized medicine in orthotics and prosthetics. *Procedia CIRP*, 84, 457–461. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.254>
- Matos, D. F., Ferreira, A. M., Pinho, A. M., & Martins, J. P. (2015). Design de Dispositivos Médicos Contributo do Design para o Desenvolvimento de uma Prótese Externa de um Membro Inferior. *E-Revista Logo*, 4(2238–2542), 73–90.
- Østlie, K., Lesjø, I. M., Franklin, R. J., Garfelt, B., Skjeldal, O. H., & Magnus, P. (2012). Prosthesis rejection in acquired major upper-limb amputees: A population-based survey. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 7(4), 294–303. <https://doi.org/10.3109/17483107.2011.635405>
- Privitera, M. B., Design, M., & Johnson, J. (2009). Interconnections of basic science research and product development in medical device design. 31st Annual International Conference of the IEEE EMBS Minneapolis, 5595–5598.
- Salminger, S., Stino, H., Pichler, L. H., Gstoettner, C., Sturma, A., Mayer, J. A., Szivak, M., & Aszmann, O. C. (2022). Current rates of prosthetic usage in upper-limb amputees—have innovations had an impact on device acceptance? *Disability and Rehabilitation*, 44(14), 3708–3713. <https://doi.org/10.1080/09638288.2020.1866684>
- Salminger, S., Sturma, A., Roche, A. D., Mayer, J. A., Gstoettner, C., & Aszmann, O. C. (2019). Outcomes, Challenges, and Pitfalls after Targeted Muscle Reinnervation in High-Level Amputees: Is It Worth the Effort? *Plastic and Reconstructive Surgery*, 144(6), 1037e–1043e. <https://doi.org/10.1097/PRS.00000000000006277>
- Sansoni, S., Speer, L., Wodehouse, A., & Buis, A. (2016). Aesthetic of prosthetic devices: From medical equipment to a work of design. In *Emotional Engineering Volume 4* (pp. 73–92). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29433-9_5

- Saradjian, A., Thompson, A. R., & Datta, D. (2008). The experience of men using an upper limb prosthesis following amputation: Positive coping and minimizing feeling different. *Disability and Rehabilitation*, 30(11), 871–883. <https://doi.org/10.1080/09638280701427386>
- Sossou, G., Demoly, F., Montavon, G., & Gomes, S. (2018). An additive manufacturing oriented design approach to mechanical assemblies. *Journal of Computational Design and Engineering*, 5(1), 3–18. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.11.005>
- Thomas, D. J., & Singh, D. (2020). 3D printing for developing patient specific cosmetic prosthetics at the point of care. In *International Journal of Surgery* (Vol. 80, pp. 241–242). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijso.2020.04.023>
- Trent, L., Intintoli, M., Prigge, P., Bollinger, C., Walters, L. S., Conyers, D., Miguelez, J., & Ryan, T. (2020). A narrative review: current upper limb prosthetic options and design. In *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology* (Vol. 15, Issue 6, pp. 604–613). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/17483107.2019.1594403>
- Unanyan, N. N., & Belov, A. A. (2021). Low-price prosthetic hand controlled by EMG signals. *IFAC-PapersOnLine*, 54(13), 299–304. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.463>
- Vaes, K. R. V., & Stappers, P. J. (2014). Product stigmaticity : understanding, measuring and managing product-related stigma.
- Vujaklija, I., & Farina, D. (2018). 3D printed upper limb prosthetics. In *Expert Review of Medical Devices* (Vol. 15, Issue 7, pp. 505–512). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/17434440.2018.1494568>
- Wendo, K., Barbier, O., Bollen, X., Schubert, T., Lejeune, T., Raucant, B., & Olszewski, R. (2022). Open-Source 3D Printing in the Prosthetic Field—The Case of Upper Limb Prostheses: A Review. In *Machines* (Vol. 10, Issue 6). MDPI. <https://doi.org/10.3390/machines10060413>
- WHO. (2017). Standards for prosthetics and orthotics - Part 1: Standards. World Health Organization.
- Young, B. H. (2022, October). The Bionic-Hand Arms Race: High-Tech Hands are Complicated, Costly, and Often Impractical. *IEEE Spectrum*.
- Zhang, X., Baun, K. S., Trent, L., Miguelez, J. M., & Kontson, K. L. (2021). Factors influencing perceived function in the upper limb prosthesis user population. *PM and R*, 15(1), 69–79. <https://doi.org/10.1002/pmrj.12697>