

Produzindo próteses substitutivas acessíveis em impressão 3D a partir de projetos open source

Producing accessible substitute prostheses in 3D printing from open source projects

Carlos Alberto Silva de Miranda* - carlos.asmiranda@professores.ibmec.edu.br
Anna Izabella Mendes Paiva* - annaizabella.m@gmail.com
Paulo Henrique Campos Prado Tavares* - paulo.tavares@professores.ibmec.edu.br
* IBMEC

Article History:

Submitted: 2020 - 08 - 24

Revised: 2020 - 09 - 11

Accepted: 2021 - 02 - 25

Resumo: A tecnologia 3D está alterando a forma de produção e traz vantagens, como a redução de desperdício, criação de produtos personalizados por um menor custo e com menos mão de obra. Seu uso para imprimir uma prótese, uma categoria de tecnologia assistiva, tem oferecido um auxílio ao deficiente através da ampliação de suas habilidades funcionais e rotineiras. O trabalho em questão objetiva tornar acessível a impressão de próteses de baixo custo para profissionais da área de saúde, engenheiros ou pessoas que tenham limitações frente a tecnologia 3D, através de um mapeamento de processos, desde a escolha à entrega da prótese adequada ao usuário. Além disso, buscamos indicar meios para viabilizar a produção das próteses através do acesso a projetos disponibilizados em plataformas *open source*. Os resultados nos levaram a concluir que, apesar das limitações da prótese impressa em 3D, o dispositivo é excelente para atividades de baixa complexidade, já que apresenta um baixo custo se comparado às próteses convencionais.

Palavras-chave: Impressão 3D; Prótese de baixo custo; Plataforma de código aberto

Abstract: 3D technology is changing the way of production and shows many advantages, such as reducing waste, creating customized products at a lower cost and with less labor. Its use to print a prosthesis, a category of assistive technology, have been offering assistance to the disabled through the expansion of their functional and routine skills. The work in question aims to make accessible the printing of low-cost prostheses for healthcare professionals, engineers or people who have limitations in face of 3D technology, through a process mapping, from the choice to the delivery of the appropriate prosthesis to the user. In addition, we seek to indicate ways to enable the production of prostheses via access to projects available on open source platforms. The results led us to conclude that, despite the limitations of the 3D printed prosthesis, the device is excellent for low complexity activities, since it has a low cost when compared to conventional prostheses.

Keywords: 3D printing; Low cost prosthesis; Open code platform

1. Introdução

Na década de 1980, a tecnologia de impressão tridimensional foi desenvolvida nos Estados Unidos e influenciou a forma de produção de produtos, além de permitir a redução de custos, encurtamento de prazos e aprimoramento de processos existentes (Porto, 2016).

Segundo Volpato (2017), a impressão 3D também é conhecida como um processo de fabricação denominado manufatura aditiva, em inglês *Additive Manufacturing* – AM, que por meio de adição sucessiva de material na forma de camadas, com informações obtidas normalmente através de um modelo geométrico 3D de um sistema CAD (*Computer Aided Design*, ou desenho auxiliado por computador), origina-se a peça física. Dessa forma, o processo de produção é totalmente automatizado e acontece relativamente rápido se comparado aos meios tradicionais de produção. Com isso, a impressão 3D amplia fortemente o conceito de personalização em massa por promover a diminuição de custos de artigos personalizados e é considerada uma tecnologia disruptiva, pois possibilita vantagens não apenas na indústria manufatureira como também na pesquisa científica e na saúde (Silva e Maia, 2014)

Na área da saúde, uma das aplicações da impressora 3D envolve a criação e personalização de próteses (Gross *et al.*, 2014) e traz vantagens em relação a redução de custos para fabricação de próteses 3D se comparado às próteses convencionais, as quais podem ter custos que variam de USD 4.000 a USD 75.000, dependendo do modelo (Resnik *et al.*, 2012).

A redução de custos na fabricação de próteses torna-se uma necessidade principalmente quando se analisa o número de amputados no Sistema Único de Saúde (SUS). Segundo o Ministério da Saúde (2016), entre os anos de 2008 e 2015, foram registrados 361.585 procedimentos de amputações hospitalares ligados aos membros inferiores e superiores em todo o Brasil. Peixoto *et al.* (2017) afirma que mais de R\$ 400 milhões pagos pelo SUS referem-se apenas aos gastos com os procedimentos cirúrgicos e estima-se que o valor total dos gastos seja mais elevado se considerar os investimentos com as aquisições e adaptações dos pacientes às próteses convencionais.

Devido ao alto custo das próteses convencionais e a crescente demanda de usuário em consequência do alto número de amputados pelo SUS, o trabalho em questão tem o objetivo de tornar a impressão de próteses de baixo custo acessível para profissionais da área de saúde, engenheiros ou pessoas que tenham limitações frente a tecnologia 3D, através de um

mapeamento de processos elucidando passo a passo do método, desde a escolha à entrega da prótese adequada ao usuário.

Além disso, o trabalho viabiliza as próteses como uma ferramenta de auxílio, já que a limitação funcional ou a deformação estética das mãos, que é uma das partes mais expostas do corpo humano, podem causar ao indivíduo uma série de problemas psicológicos. Dessa forma, mesmo que as próteses não substituam verdadeiramente o órgão amputado, podem proporcionar uma melhor qualidade de vida aos seus usuários através de seu uso funcional.

2. Revisão bibliográfica

Com o intuito de mapear o passo a passo da escolha da prótese adequada ao usuário até sua impressão em impressora 3D, torna-se necessário o mapeamento desse processo para o trabalho em questão.

Neste referencial teórico, serão identificados os conceitos apropriados à mapeamentos de processos e sua aplicabilidade ao processo de impressão 3D da prótese de baixo custo. Logo, será definido: mapeamento de processos, técnicas apropriadas para o estudo, além de conceitos básicos referentes à tecnologia assistiva de impressão 3D utilizada para imprimir a prótese.

2.1. Manufatura aditiva e impressão 3D

A Manufatura Aditiva, também conhecida como impressão tridimensional, é um processo de fabricação que forma a peça física através do empilhamento de camadas de material e que, segundo Volpato (2017), compreende as etapas ilustradas na Figura 1.

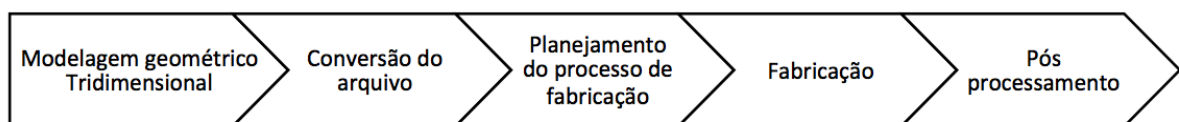


Figura 1 - Processo gerais da manufatura aditiva
Fonte: Adaptado de Volpato (2017)

Conforme a Figura 1, a modelagem tridimensional gera um modelo geométrico 3D da peça (por exemplo, em um sistema CAD). Logo após, é preciso obter um modelo geométrico 3D em um formato específico para AM, já que todo equipamento de manufatura aditiva consegue ler apenas determinados formatos de arquivos contendo os dados da geometria a ser produzida. Geralmente, utiliza-se o formato STL – *StereoLithography* ou AMF, *Additive*

Manufacturing Format, que são representados por uma malha de triângulos, em um padrão adequado.

Em seguida, é feito o planejamento do processo para a fabricação por camada (fatiamento e definição de estruturas de suporte e estratégias de deposição de material). Segundo Monteiro (2015), nesse ponto também são considerados outros quesitos como restrições de materiais, fonte de energia, espessura da camada, tempos e velocidades.

O próximo passo é a fabricação da peça no equipamento de AM, o qual não requer muito monitoramento já que é uma etapa bastante automatizada, sendo necessário um acompanhamento apenas para captar erros que podem acontecer, como defeitos na geometria ou funcionamento da impressora sem material.

Para finalizar, há o pós-processamento, que varia bastante de acordo com a tecnologia, pois pode envolver limpeza, etapas adicionais de processamento e acabamento com processos tradicionais de usinagem por remoção.

A tecnologia empregada na impressão 3D é baseada em dois conceitos claramente definidos e presentes na maioria das tecnologias de impressão atuais: a materialização a partir da deposição de camadas, que vão sendo sobrepostas sucessivamente até que se obtenha a geometria completa da peça; e o conceito da representação de uma geometria tridimensional por um suporte qualquer, no caso atual nos referimos à construção da geometria através de parâmetros determinados em um software digital de plataforma CAD (*Computer Aided Design*). Muitas patentes foram depositadas durante o desenvolvimento da impressão tridimensional no escritório de patentes *United States Patent and Trademark Office* (USPTO, 2020).

Todas as tecnologias e processos produtivos criados ao longo da história do desenvolvimento da impressão 3D ainda continuam sendo progressivamente aprimorados e otimizados. Dentre todos, podemos citar os dois processos mais aplicados na atualidade (Monteiro, 2015): a tecnologia FDM (sigla que significa *Fused Deposition Modeling*, ou modelagem por deposição de material fundido), que consiste na extrusão de um filamento plástico, depositado em camadas na composição da peça; e a tecnologia SLS (sigla que significa *Selective Laser Sintering*, ou sinterização por laser seletivo), que utiliza o calor de um laser para sinterizar vários tipos de materiais de base polimérica, sob a forma de pó.

No processo FDM, um determinado material polimérico, sob a forma de um fio com diâmetro definido e padronizado, é fundido (derretido) e extrudado em estado plástico, seletivamente depositado em uma plataforma através do bico extrusor, conforme mostrado na Figura 2. Para depositar a camada este bico vai depositando o material em todo o contorno da seção e, depois de terminado, passa a preencher o conteúdo do contorno, geralmente em movimentos coordenados em padrões geométricos e disposição definidos no momento da programação da impressão, de forma a se obter um modelo mais denso ou menos denso.

Depois que a primeira camada é finalizada, o bico sobe e inicia a fabricação da segunda camada, e assim vai fazendo sucessivamente até que a peça esteja completamente executada, conforme o *design* pretendido. Este processo demanda um tempo de impressão que é considerável, se comparado aos processos tradicionais de fabricação de produtos em polímeros, o que limita sua aplicação à fabricação de peças únicas, lotes realmente pequenos ou à fabricação dos protótipos para testes.

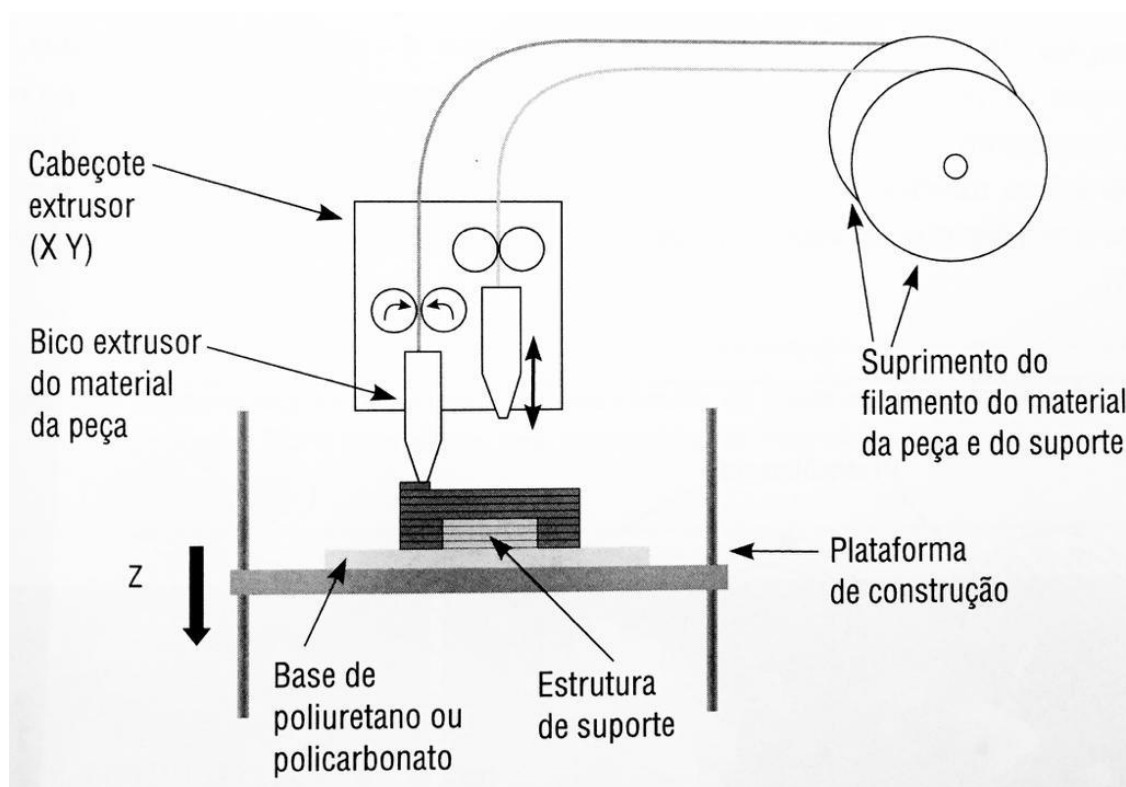


Figura 2 - Esquema geral do processo de modelagem por deposição de material fundido
Fonte: Volpato (2007)

Uma grande vantagem deste método é a vasta disponibilidade de materiais compatíveis com este processo, bastando que estes materiais possam ser configurados em fios extrudados em diâmetros de 1,75mm ou 3,00mm, sendo a primeira bitola a mais comum. Além disso, que

tenham ponto de fusão adequado ao equipamento (geralmente, os polímeros mais aplicados em engenharia têm ponto de fusão máximo em torno de 250 °C) e que possam ser comprimidos por extrusão através de um bico. O mais comum são filamentos de termoplásticos, como por exemplo o ABS (sigla para acrilonitrila-butadieno-estireno) e o PLA (sigla de ácido polilático). Porém a gama é muito extensa, sendo a impressão 3D através do processo FDM cada vez mais contemplada pela oferta de matérias-primas que atendem a este processo, que é a tecnologia mais popular encontrada no mercado e com os menores preços, devido à sua simplicidade de funcionamento e componentes facilmente encontrados no mercado, a custos de aquisição bastante atraentes. Também é uma das tecnologias mais flexíveis quando se trata de diversidade de materiais, como já citado acima. Além disso, pode ser adaptada para inúmeras aplicações (Monteiro, 2015). Foi a primeira tecnologia popularmente comercializada no mercado e vem abrindo muitas possibilidades, com maior destaque para a utilização doméstica, com equipamentos acessíveis e de fácil operação.

Já no processo SLS, que segundo Monteiro (*Op. Cit.*), foi uma tecnologia inventada em 1980 por pesquisadores da Universidade do Texas, nos EUA, tudo se baseia em um feixe de laser de alta potência sendo aplicado sobre uma superfície depositada com uma base polimérica em pó, que é sinterizada formando uma camada sólida. Após a confecção de uma camada, um rolo com o material deposita uma nova camada de pó e assim sucessivamente até que a peça esteja terminada, conforme mostrado na Figura 3.

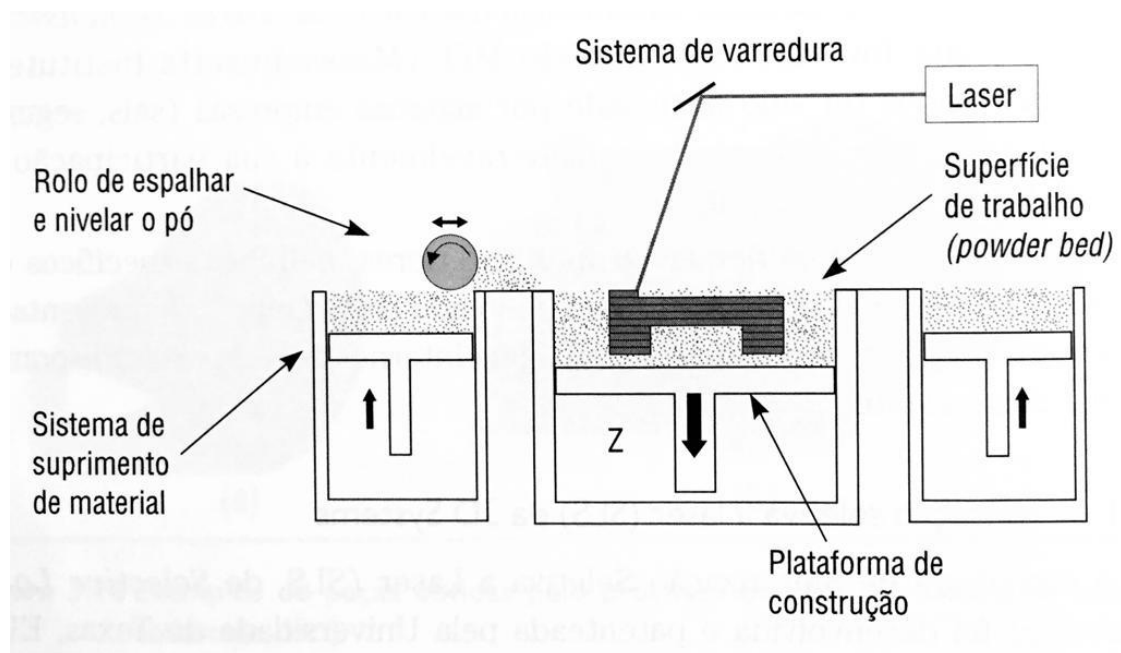


Figura 3 - Esquema geral do processo de sinterização por laser seletivo
Fonte: Volpato (2007)

Existem algumas vantagens de se aplicar o laser sobre o pó em vez de líquidos, a principal delas é que o pó não polimerizado (solidificado) serve, naturalmente, como um suporte para os pontos em balanço na peça. Além disso, este pó não utilizado pode ser reaproveitado em futuros trabalhos. Outra vantagem é a variedade de materiais passíveis de serem utilizados nesta tecnologia, como termoplásticos, cerâmicos, borrachas e até metais, apesar de ainda não ser possível misturar tipos diferentes em uma mesma peça. Por outro lado, a qualidade da superfície neste tipo de processo tende a ser porosa devido à matéria-prima base (Takagaki, 2012).

Os equipamentos de SLS, em sua grande maioria, ainda não são adequados para o uso doméstico, pois precisam de uma câmara selada e preenchida com nitrogênio para manter uma atmosfera inerte que garanta a qualidade na fusão do material. Este ponto inviabiliza a sua aplicação doméstica, pois encarece o processo e torna os equipamentos bem mais caros em relação ao processo FDM. Além disso, é um processo que gera muito calor e, na fabricação de peças de grandes dimensões, pode ser necessário esperar até um dia para que esta se resfrie e possa ser retirada. E alguns materiais oferecem o risco de explodir se processados da forma incorreta e sem os devidos procedimentos de segurança, o que requer treinamento e conhecimento técnico acerca do processo (Lipson e Kurman, 2013).

Estas técnicas apresentadas são as mais populares na época do desenvolvimento deste trabalho e, especificamente a FDM, vem promovendo uma grande popularização da impressão 3D por ser rápida e ter materiais mais baratos em relação aos outros processos de impressão, além de ter os equipamentos mais acessíveis e de uso simples e intuitivo, até mesmo por usuários domésticos (Takagaki, 2012).

No início da aplicação e utilização dos sistemas de impressão 3D, estes foram basicamente direcionados às etapas iniciais do desenvolvimento de produtos, principalmente em estudos, avaliações e averiguações, com o objetivo de aumentar a confiabilidade das decisões tomadas durante as etapas do projeto. Em seguida começaram a ser empregados com a finalidade de testes, na engenharia, visando substanciar as etapas de análise e de planejamento. E, finalmente, foram aplicados na fabricação de ferramental rápido, para testes, avaliação e melhorias dos processos produtivos convencionais. Atualmente, estes sistemas, por sua viabilidade na produção de formas complexas e custo relativo baixo, na produção de peças em quantidade única, vem sendo substancialmente aplicados diretamente na produção de bens acabados para o mercado (Volpato, 2017).

No campo do desenvolvimento de produtos, esta tecnologia foi aplicada inicialmente com a função de viabilizar a confecção de modelos e protótipos, devido ao ganho de tempo e velocidade na construção de modelos funcionais, com materiais e formas bem próximas do requisitado em projeto, em relação aos materiais e aos protótipos tradicionalmente feitos à mão. Principalmente em se tratando de aplicações e projetos de produtos feitos em polímeros, nas quais era praticamente inviável construir protótipos funcionais no material desejado, sem envolver a construção de ferramentais e moldes, que oneravam em muito a etapa de projeto conceitual das soluções desenvolvidas. Atualmente, a tecnologia de impressão 3D se encontra consolidada como ferramenta imprescindível do processo de desenvolvimento de produtos (Dimitrov *et al.*, 2006).

Não obstante ao ganho aferido com a aplicação dessa tecnologia, inicialmente ela não causou grandes alterações no processo de desenvolvimento de produtos, apenas melhorias incrementais que potencializaram e otimizaram a etapa de construção de modelos e testes iniciais, como os de volumetria, tamanho, usabilidade, dentre outros. Na atualidade, contudo, a tecnologia vem impactando o desenvolvimento de produtos e a engenharia de forma mais direta, pois ao ser empregada como opção de processo na fabricação propriamente dita de produtos, passa a ser o veículo pelo qual se projeta e se produz, aproximando assim essas duas extremidades dos processos produtivos (Monteiro, 2015).

Segundo Gibson *et al.* (2015), os modelos eram aplicados com três finalidades básicas, chamadas de “3 F’s” (*Form, Fit and Function*, ou forma, ajuste e função): na definição da forma e aspectos gerais morfológicos do *design* do produto (Forma); no aprimoramento da precisão dos processos para adequação das tolerâncias, sequência e viabilidade de montagem dos componentes (Ajuste); e no desenvolvimento das propriedades e seleção dos materiais, com o objetivo de verificar os componentes quanto ao manuseio e exposição às condições de uso (Função). A impressão 3D ainda vem sendo utilizada no desenvolvimento de produtos, podendo criar uma cadeia de processos com o objetivo principal de reduzir o tempo e os custos inerentes aos processos de desenvolvimento, principalmente na viabilização da produção de produtos únicos, customizáveis e em projetos que atendam a condições de aplicação individuais (Monteiro, 2015).

A tecnologia 3D está alterando a forma e modo de produção e traz vantagens se comparada a outros processos de fabricação tradicional, principalmente referente a redução de desperdício, visto que é uma tecnologia que possibilita a criação de produtos personalizados

por um menor custo e menos mão de obra que uma indústria tradicional. Seu uso para imprimir uma prótese, uma categoria de tecnologia assistiva, oferecerá um auxílio ao deficiente através da ampliação de suas habilidades funcionais e rotineiras.

Tecnologia Assistiva (TA) é um termo utilizado para identificar todo o arsenal de recursos e serviços que contribuem para proporcionar ou ampliar habilidades funcionais de pessoas com deficiência e consequentemente promover vida independente e inclusão. (Bersch e Tonolli, 2006). Segundo Bersch (2017), uma das categorias de Tecnologia Assistiva são as órteses e próteses, pois são colocadas junto a um segmento do corpo, garantindo ao deficiente um melhor posicionamento, estabilização e/ou função. São normalmente confeccionadas sob medida e servem no auxílio de mobilidade, de funções manuais, entre outros.

Segundo a Enciclopédia Britannica, próteses são substitutos artificiais utilizados para suprir a ausência de membros e suas funções, causadas em sua maioria por lesões, tumores, diabetes, fornecimento insuficiente de sangue ou, em caso de pessoas que já nascem sem o membro, amputações congênitas.

Portanto, próteses em impressão 3D também podem ser consideradas uma tecnologia assistiva, já que contribuem para ampliar habilidades funcionais de pessoas com deficiência.

2.2. Mapeamento de processos

Segundo De Mello (2011, p. 27), a escolha do mapeamento como ferramenta de melhoria se baseia em seus conceitos e técnicas que quando empregadas de forma correta, permite documentar todos os elementos que compõem um processo e corrigir qualquer um desses elementos que esteja com problemas sendo uma ferramenta que auxilia na detecção das atividades não agregadoras de valor gerando qualidade ao processo.

Becker (1993) define Qualidade Total (QT) como um sistema administrativo orientado para pessoas cujo objetivo é o incremento contínuo da satisfação do cliente a custos reais decrescentes. QT enfatiza o aprendizado e à adaptação a mudanças como fator-chave para o sucesso de sua aplicação.

Modelagem de processos de negócio é baseada na reengenharia de processos (Davenport, 1994) e, por contribuir com alguns propósitos, como: explicar o conhecimento; entender como funciona; controlar ou monitorar; tomar decisões; analisar alguns aspectos da organização; simular o comportamento de algumas partes; reprojeter e racionalizar (Correia *et*

al., 2002). Os desenhos dos processos são necessários tanto na reengenharia ou *Business Process Reengineering* (BPR) quanto no *Total Quality Management* (TQM).

Nesse sentido, o desenho do processo é um resultado importante e deve ter qualidade. Segundo Bi (2004), as qualidades de uma solução para modelagem de processos são importantes: formalismo – semântica inequívoca; expressividade – suficiente; escalabilidade – múltiplos níveis; modularidade – unidades padrões de representação; fácil de usar – amigável.

O fluxograma é uma técnica de mapeamento do processo que descreve graficamente um processo existente ou um novo processo proposto, e define cada evento da sequência de atividades por meio de símbolos, linhas e palavras (Harrington, 1996). Uma das vantagens de se utilizar uma ferramenta gráfica é facilidade de visualização, tanto da sequência de atividades, como da forma como as atividades se encaixam (Cunha; 2012).

Segundo Slack *et al.* (2018), o fluxograma é uma técnica de mapeamento que permite o registro de ações de algum tipo e pontos de tomada de decisão que ocorrem no fluxo real.

Dessa forma, o fluxograma será utilizado para demonstrar graficamente qual é o passo a passo para imprimir uma prótese funcional a um paciente, desde o momento que se entende qual é a prótese adequada de acordo com sua limitação e que podem ser encontradas em plataformas *open source*, passando pela etapa de medição do paciente para configurar o tamanho da prótese ideal para o usuário em relação a escala que a prótese que será impressa, para depois dessa etapa efetivamente imprimir a prótese e entrega-la ao usuário final.

3. Método proposto

Segundo Silva e Menezes (2005), a pesquisa pode ser enquadrada conforme diferentes classificações: pela sua natureza, pela abordagem do problema, pelos seus objetivos e pelos seus procedimentos técnicos.

Para o trabalho em questão, será realizado uma pesquisa exploratória que enquadra em pesquisas do ponto de vista pelos seus objetivos, segundo Gil (2017), a qual visa proporcionar maior familiaridade com o problema de imprimir uma prótese de baixo custo em impressora 3D vistas a torna-lo explícito ou a construir hipóteses. A pesquisa é de natureza aplicada, pois visa gerar conhecimentos em relação à aplicação das tecnologias de impressão tridimensional para confecções e entrega de próteses 3D de baixo custo para o usuário.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, inicialmente foi adotada uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de contextualizar os conteúdos a serem explorados na pesquisa,

iniciando com o tema Impressão 3D para contextualização da tecnologia na atualidade e identificação da ferramenta como uma Tecnologia Assistiva. Depois, com a escolha do mapeamento de processo para elucidar o passo a passo da aplicação do trabalho, passou-se para uma pesquisa bibliográfica para aprofundar os conceitos relativos a metodologia, bem como sua adequação para o estudo.

Em linhas gerais, está ilustrado na Figura 4 o mapeamento a ser realizado no desenvolvimento do trabalho. O mapeamento será baseado na plataforma de *open source* chamada *Enabling the future*, destinada a quem deseja imprimir, doar ou construir uma prótese.

Open source ou fonte aberta é um termo utilizado pelo segmento de softwares para identificar programas que possuem seu código fonte aberto sendo permitido serem modificados, ou seja, o programa não é domínio exclusivo do criador e que pode ser modificado por usuários que identificam possibilidades de melhoria. No caso de arquivos 3D esse termo se refere à capacidade de se modificar um objeto em ambiente virtual sem o consentimento de seu criador (Open Source, 2014)

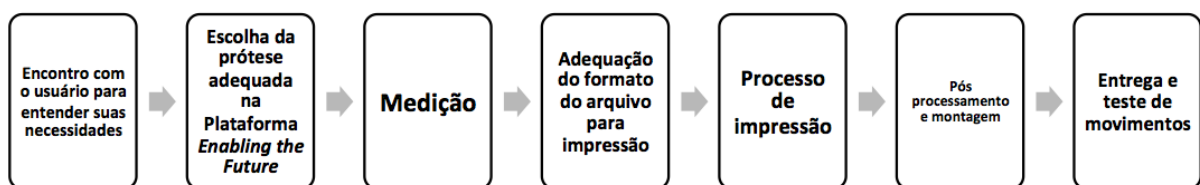


Figura 4 - Macro etapas para impressão e entrega da prótese de baixo custo para o usuário

4. Resultados

Para desenvolver o estudo, o foco será utilizar as informações disponíveis na comunidade e-Nable para resultar na impressão da prótese de baixo custo.

Visto que o objetivo do trabalho é focado na comunidade e-Nable, serão mostradas algumas próteses mecânicas disponíveis na plataforma *open source* para serem escolhidas e impressas de acordo com as características do amputado.

O primeiro passo para imprimir a prótese 3D é reunir com o beneficiário para entender suas necessidades perante a prótese (Carvalho, 2004), as quais são classificadas de acordo com os níveis de amputação do braço e que podem ser observados na Figura 5.

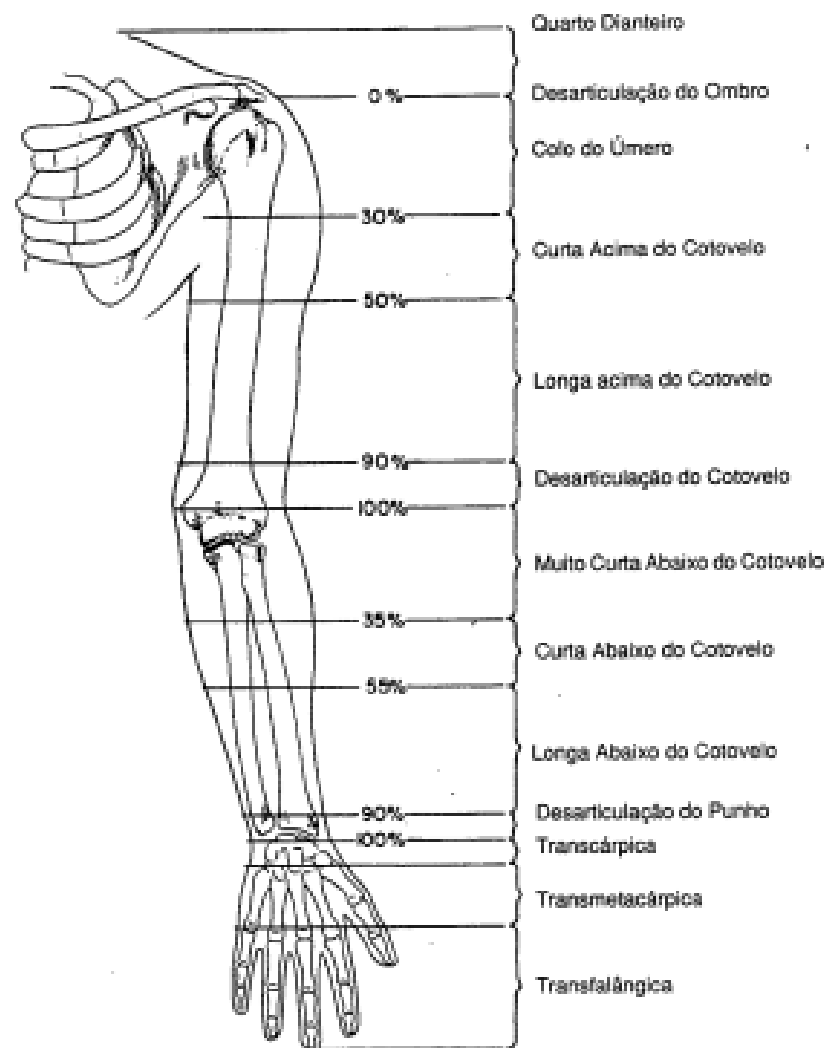


Figura 5 - Níveis de amputação
 Fonte: Kottke e Lehmann (1994)

Segundo Cunha (2002), existem três tipos de prótese de membro superior no mercado: estética, mecânica e mioelétrica.

A prótese estética tem função de simular uma mão real e não permite a realização de movimentos. A prótese mecânica é movimentada por outra parte do corpo, permitindo apenas a realização de movimentos limitados. Enquanto as próteses mioelétricas são dispositivos médicos complexos acionados a partir da captação de estímulos nervosos, dos músculos do braço do paciente, que são transmitidos para motores elétricos posicionados na prótese para movimentar os dedos.

A maioria dos modelos criados pela comunidade requerem que o amputado possua um punho funcional que dobre ao menos 30 graus em qualquer direção, bem como a permanência

de pelo menos meia palma conservada devido a uma amputação, afim de que o dispositivo possa funcionar adequadamente.

Para amputados que possuem um punho funcional, com palma da mão total ou parcial, é possível encontrar na comunidade e-Nable alguns projetos acionados através da flexão do punho, que gera uma força capaz de abrir e fechar dos dedos da prótese. Portanto, para que esses projetos funcionem, o usuário precisa ter um punho funcional que possa dobrar facilmente e de palmas com uma força suficiente criar uma alavanca, conforme ilustrado na Figura 6.

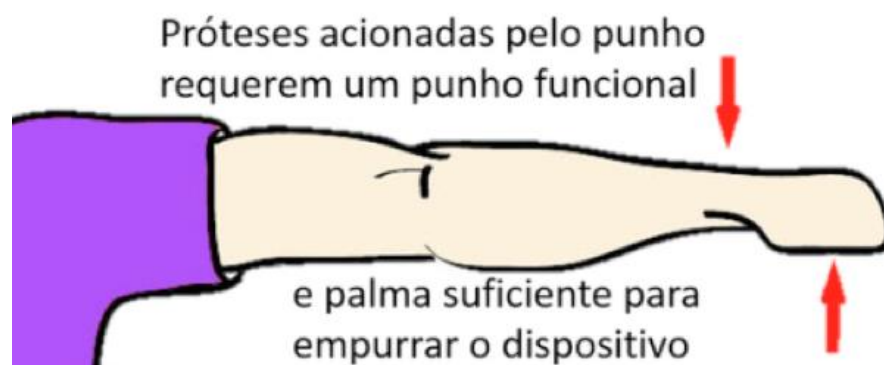


Figura 6 - Prótese mecânica acionada pelo punho
Fonte: Adaptado de e-Nable

Existem também modelos no e-Nable para casos em que os amputados não possuem um punho funcional ou a palma da mão. Esses modelos são acionados através da flexão do cotovelo. Para que estes projetos funcionem corretamente, como ilustrado na Figura 7, o usuário precisa ter um cotovelo funcional que dobre com facilidade e que mantenha maior parte do antebraço conservada pela amputação.

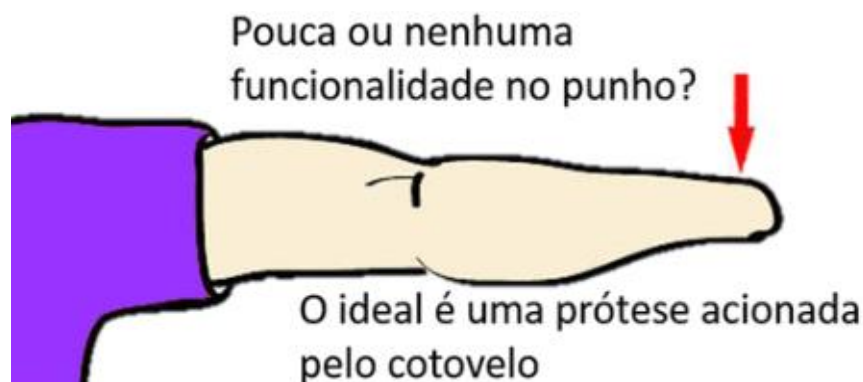


Figura 7 - Prótese mecânica acionada pelo cotovelo
Fonte: Adaptado de e-Nable

Atualmente, a comunidade e-Nable não possui projetos de *design open source* para amputações acima do cotovelo. Porém, a plataforma indica próteses mioelétricas que são dispositivos alimentados por baterias, mas que podem configurar um alto custo através da configuração adequada de motores e controladores. Como mostrado na Figura 8, as próteses mioelétricas são as mais adequadas para amputações acima do cotovelo, porque possuem sensores para simular o movimento dos dedos.

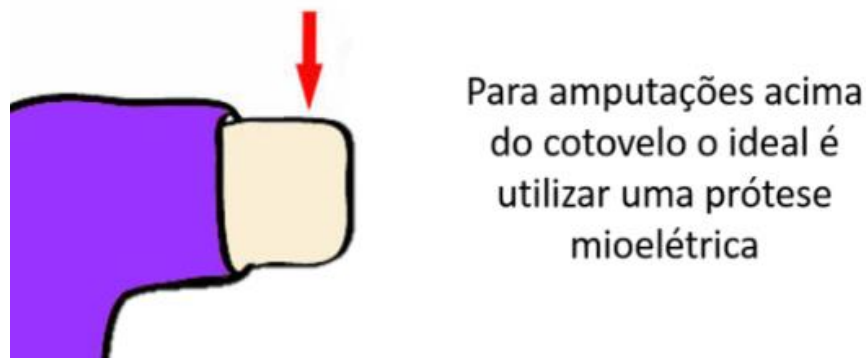


Figura 8 - Prótese mecânica acionada pelo cotovelo
Fonte: Adaptado de e-Nable

Existem algumas opções, no entanto, de outros grupos que oferecem *design open source* de prótese de impressão 3D mioelétricas. Um deles é o *Open Bionics* que também tem o objetivo de tornar as mãos protéticas robóticas mais acessíveis aos amputados. A empresa, fundada em 2014, fica no *Future Space*, co-localizado com o *Bristol Robotics Laboratory* no Reino Unido. O modelo chamado *Dextrus* usa motores elétricos para simular os músculos e cabos de aço para simular os tendões. Há uma estrutura de peças de plástico impressas em 3D que funcionam como ossos e um revestimento de borracha que atua como a pele. Todas essas partes são controladas por componentes eletrônicos para reproduzir o movimento natural da mão que pode ser conectada a uma prótese existente usando um conector padrão. A mão robótica utiliza eletrodos para ler sinais dos músculos remanescentes para controlar a mão com movimentos de abrir e fechar. Após a escolha da prótese mecânica ideal para o amputado dentro da comunidade e-Nable, o próximo passo é a medição do membro para garantir o ajuste adequado da prótese. Um possível caminho é utilizar fotografias capturadas de forma correta para assegurar que as medidas sejam adequadas para criar um dispositivo que se encaixe corretamente. Segundo o e-Nable, uma diferença errônea de 2 ou 3 milímetros na medição gera uma prótese inadequada. Dessa forma, é indicado que as fotos sejam registradas durante a luz do dia e por uma câmera digital de alta resolução. Além disso, é recomendado que se estenda um instrumento de medição, como uma régua, sobre a parede e

que o centro dessa régua esteja em direção ao nariz do amputado quando o mesmo estiver de pé. Aconselha-se também que a câmera seja apontada para o centro da parede, na mesma altura que o pulso do amputado e que a foto seja capturada a 2 (dois) metros de distância da parede. A assertividade do tamanho da prótese está diretamente ligada à quantidade de detalhes que foram obtidos na medição.

Na Figura 9, há exemplos de fotos do membro retiradas da comunidade e-Nable. Serão necessárias 4 (quatro) tipos de fotos. A primeira foto (1), deve estar com os dois membros estendidos verticalmente na parede e com a régua entre os pulsos do amputado. Na segunda foto (2), será capturado o membro amputado horizontalmente com o pulso nivelado sobre a parede e do lado esquerdo da régua. A terceira foto (3) terá as mesmas características da segunda foto, porém com o pulso flexionado ao máximo que o amputado conseguir para baixo e a foto (4) também tem as mesmas características da segunda foto, entretanto, com o pulso do amputado estendido ao máximo. É adequado que sejam capturadas o máximo de fotos possíveis em cada posição até que a foto esteja clara e a medição da régua consiga ser lida facilmente.

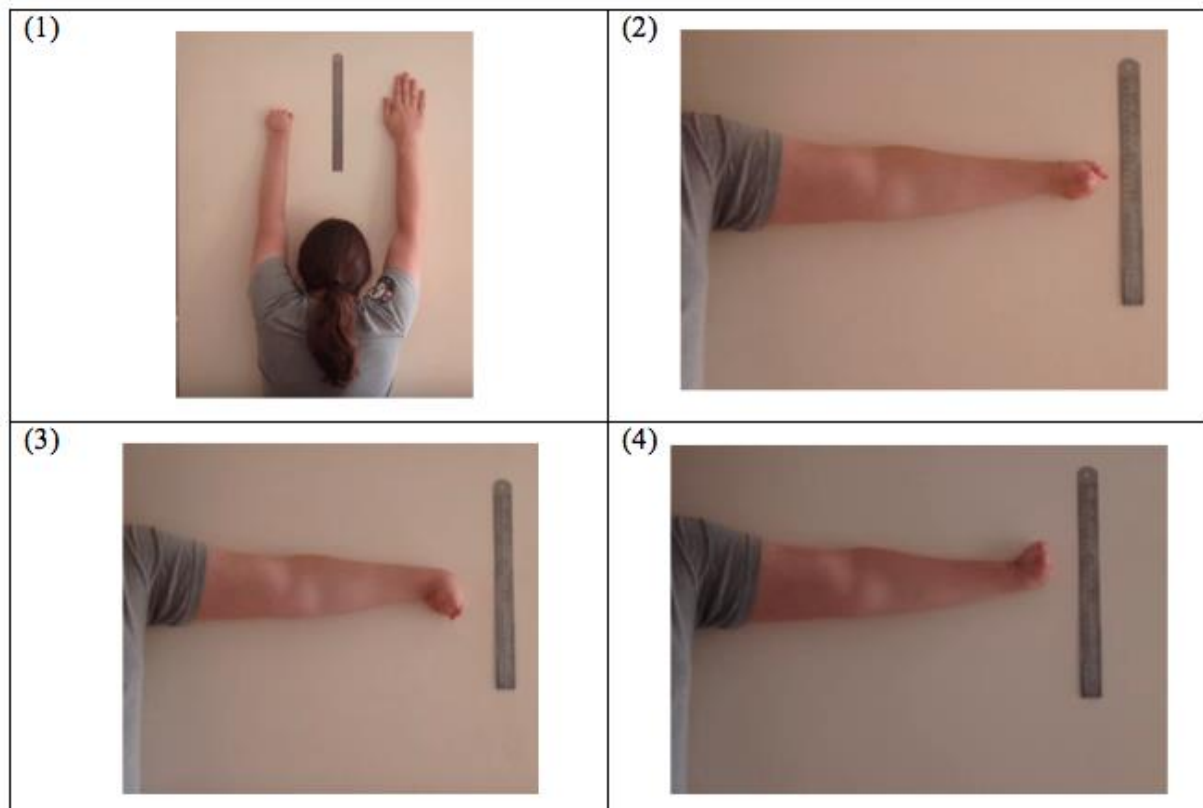


Figura 9 – Exemplo de fotos que são necessárias para registrar a medição do membro do amputado
Fonte: Adaptado de E-Nable

Em seguida, as fotos são importadas para um programa e calcula-se o melhor tamanho e forma para a prótese. Usualmente, utiliza-se um programa de código aberto chamado *Blender*, também conhecido como *blender3d* e desenvolvido para modelagem, animação, texturização, composição, renderização e criação de aplicações interativas em 3D. O programa pode ser obtido de forma gratuita através do site do desenvolvedor *Blender Foundation*. Além disso, é possível fazer pequenas mudanças de *Design* no *Blender* para adequar a prótese à anatomia única do amputado.

Há disponível na comunidade e-Nable outras formas para verificar a assertividade do tamanho da prótese como a planilha de *Stephen Davies* da *Team UnLimbited* para ajudar a determinar a porcentagem ideal de escalonamento para dispositivos manuais e-Nable inserindo os valores das medidas do amputado (largura da mão e comprimento da mão) nas células e a planilha será atualizada automaticamente.

Após a adequação do *design* à medição do amputado, o arquivo 3D é gerado e enviado para o processo de impressão. Esse arquivo precisa estar com o formato de trabalho da impressora 3D, já que todo equipamento de manufatura aditiva consegue ler determinados formatos de arquivos contendo os dados da geometria a ser produzida. O formato mais comum para esse tipo de trabalho é o *STL (Stereolithography)* que geralmente é aceito na maioria das impressoras e é o formato que os arquivos da comunidade e-Nable usualmente tem.

Após a conversão prévia do arquivo para o formato de trabalho do equipamento, o próximo passo é envia-lo para a impressora. Esse envio pode ser feito através de conexão direta, rede ou mesmo uma unidade de memória flash (pen drive). Segundo Monteiro (2015), após a transferência é necessário que sejam observados se o tamanho, posição e orientação de construção da peça estão corretos.

Nessa etapa, é importante considerar a configuração de trabalho para a impressão, ou seja, a configuração de qualidade, volume do material, preenchimento, posição na mesa de impressão. Em relação ao material utilizado, o mais comum para essa aplicação é o polímero ABS, mas também há aplicação com o *Nylon* e PLA. Para o ABS, as recomendações da comunidade e-Nable em relação a temperatura do extrusor, ou seja, o equipamento que desloca o filamento desde a bobina até o bico de impressão, é de 230-240°C, dependendo do tipo de impressora. Já a temperatura adequada para a mesa de impressão é de 80-110°C.

Nesse ponto, também é preciso estar atento à temperatura do ambiente que pode influenciar na impressão.

Após a configuração do equipamento, a próxima etapa é a fabricação. Esta etapa não requer muita supervisão porque é automatizada. É preciso apenas monitorar superficialmente para captar erros como defeitos na geometria programada ou falta de material na impressora. A impressora trabalha por até 1 (um) dia para imprimir o dispositivo. Geralmente, depois de 10 a 20 horas, a prótese está na fase de pós impressão e montagem.

Posto que a impressora terminou a impressão, as partes impressas da prótese precisam ser removidas da mesa da impressora para encaminharem para a montagem. Isto requer uma interação com a máquina, portanto, é necessário que alguns cuidados tenham sido tomados na etapa de criação da geometria. Monteiro (2015) sugere que sejam criados travamentos internos para garantir que não fiquem partes móveis ou pontos frágeis na peça.

Após ser removida da impressora, as peças da prótese usualmente requerem um trabalho de limpeza. Esse acabamento pode variar de acordo com os recursos disponíveis, porém, para polir o material ABS, pode ser usado acetona pura, conhecida quimicamente como propanona. Deve haver bastante cuidado para utilizar a acetona, já que é um líquido altamente inflamável. Nesse caso, é recomendado utilizá-la em um ambiente aberto e arejado, além de estar longe do fogo e do calor e utilizar equipamentos de segurança como máscara, luva e óculos de proteção.

Em seguida, a prótese deve ser montada. Na comunidade e-Nable, há vídeos explicativos com a maioria dos modelos de próteses disponíveis para download inclusive com o que é necessário adquirir para auxiliar na montagem, como pinos e parafusos que ajudam na junção das peças impressas. No momento de montagem, é necessário conferir se todas as peças foram impressas corretamente e se todo o material exigido está disponível para montagem.

Logo após a montagem, a prótese já está pronta para ser testada e entregue ao beneficiário. Nessa etapa, é de extrema importância o acompanhamento e reabilitação do usuário da prótese com profissionais da saúde como fisioterapeutas e terapeutas ocupacionais para se preparar tanto psicologicamente como fisicamente para que o amputado receba a prótese.

Para De Miranda *et al.* (2016), a consecução destas etapas se caracteriza como uma forma de promoção de uma mudança radical de contexto, através da substituição da tecnologia principal – no caso a fabricação de próteses individuais no sistema tradicional, com materiais de alta tecnologia e valor agregado, por uma de baixo custo e acessível, a impressão em 3D pelo processo FDM. Oportunamente, com a seleção e aplicação destes procedimentos e deste processo, torna-se possível beneficiar um grupo específico de pessoas, transformando suas vidas de modo permanente ao alterar um equilíbrio socioeconômico prevalecente que opera em detrimento de seus interesses. Torna-se possível viabilizar a um número maior de pessoas o acesso a um benefício que antes era condicionado a uma disponibilidade financeira restrita a poucos.

5. Conclusões

Este trabalho detalhou o processo para impressão de prótese 3D de baixo custo baseado na plataforma de código aberto e-Nable. Por ser um trabalho feito através do portal, é imprescindível que o desenvolvimento da prótese com base nesse trabalho, seja baseado no site do e-Nable.

A impressão 3D, através do processo FDM, descrito anteriormente, tornou viável a confecção destes dispositivos assistivos ao permitir a impressão de suas partes em pequenas quantidades e até mesmo em quantidade única e dimensões customizadas. Além de ser um processo financeiramente acessível, tendo em vista a disponibilidade ampla de impressoras, em função da disseminação da tecnologia e da oferta de equipamentos de baixo custo, até mesmo através de projetos disponibilizados em plataformas *online*, no formato de projetos DIY (“*Do It Yourself*”, ou “faça você mesmo”, em sua própria impressora 3D). Ou seja: substituir uma tecnologia principal, aplicada na construção das próteses tradicionais, por uma de baixo custo. No trabalho foi considerado que quem deseja imprimir a prótese tenha uma impressora disponível. Contudo, há também a possibilidade de localizar bibliotecas, fabricantes, escolas e *fab-labs* que disponibilizam o serviço de impressão a baixo custo, ou mesmo gratuitamente.

Em relação às limitações encontradas com o resultado da impressão da prótese, pode-se dizer que a principal delas foi que o corpo humano é muito complexo se comparado a quantidade de movimentos que se consegue fazer, visto que a prótese é limitada e não reproduz todos os movimentos da mão. A maioria dos modelos disponíveis no e-Nable apenas abrem e fecham a mão e não consegue mexer os dedos separadamente. Além de que o

movimento pode ser brusco, impossibilitando que a prótese segure alguns objetos mais frágeis.

Outra limitação é em relação ao material que, por ser de plástico, pode gerar atrito e dificultar o movimento. Pelo mesmo motivo, o plástico não é um material resistente e pode sofrer deformações com altas temperaturas, por exemplo, dificultando posteriormente a utilidade da prótese. Nesse ponto, há possibilidade de realizar trabalhos de pesquisa para aprimorar a qualidade e durabilidade do material.

Uma consideração importante a ser levantada é que as próteses no Brasil são consideradas um dispositivo médico e por isso, deve ser prescrito para ser produzida e com seu processo de reabilitação acompanhado por um profissional da área de saúde.

Conclui-se, portanto, que apesar das limitações da prótese impressa com a tecnologia 3D, o dispositivo é excelente para atividades de baixa complexidade, já que apresenta um ótimo custo benefício se comparado às próteses convencionais.

Além disso, como a plataforma e a tecnologia permitem a customização dos projetos, torna-se possível, conforme apresentado este trabalho, a adequação dos projetos a cada demanda ou deficiência específica, viabilizando a construção de diversos modelos de protótipos de próteses, os quais podem ser avaliados quanto à sua adaptabilidade por parte do usuário. E com custos baixos de investimento. Importante ainda considerar a questão antropométrica relacionada aos usuários infantis, que demandarão de próteses em tamanhos diferentes, adequadas a cada fase do seu crescimento. E mesmo aos usuários já adultos, que tem suas dimensões alteradas devido à perda de peso, por exemplo.

REFERÊNCIAS

- Becker, S.W. (1993). TQM does work: ten reasons why misguided attempts fail. *Management Review*, 82(5): 30-32.
- Bersch, R. (2017). Introdução à tecnologia assistiva. Porto Alegre, Brasil. Disponível em: http://www.assistiva.com.br/Introducao_Tecnologia_Assistiva.pdf. Acesso em 22 de agosto, 2020.
- Bersch, R., & Tonolli, J. (2006). Introdução ao conceito de tecnologia assistiva. Disponível em: <http://www.bengalalegal.com/tecnologia-assistiva>. Acesso em: 22 de agosto, 2020.
- Bi, H.H. (2004). *Graphical and logical formalism for business process modeling and verification*. Thesis submitted to the University of Arizona.
- Carvalho, G.L. (2004). *Proposta de um método de projeto de próteses de membros superiores com a utilização da engenharia e análise do valor*. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-12012006-103703/publico/TextoDissertCompleto.pdf>. Acesso em: 23 de agosto, 2020.
- Correia, K.S.A, Leal, F., & Almeida D.A.A. (2002). Mapeamento de processo: uma abordagem para análise de processo de negócio. Anais do XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP. Curitiba,

- Brasil. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2002_tr10_0451.pdf. Acesso em: 23 de agosto, 2020.
- Cunha, A.U.N. (2012). *Mapeamento de processos organizacionais da UnB: caso Centro de Documentação da UnB – CEDOC*. Monografia de Especialização em Administração da Universidade de Brasília, Brasília.
- Cunha, F.L. (2002). *Mão de São Carlos, uma prótese multifuncional para membros superiores: Um estudo de mecanismos, atuadores e sensores*. Tese de doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos (USP). São Paulo.
- Davenport, T.H. (1994). *Reengenharia de Processos: Como inovar na empresa através da tecnologia da informação*. Rio de Janeiro: Campus, 5ª Ed.
- De Mello, A.E.N.S. (2011). *Aplicação do Mapeamento de Processo e da simulação no desenvolvimento de projetos de processos produtivos*. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil.
- De Miranda, C.A.S., Mottin, A. C., Ferreira, J. C. P., & de Melo Trindade, C. (2016). Design e engenharia: um case de empreendedorismo social. *Blucher Design Proceedings*, 2(9): 888-899.
- Dimitrov, D., Schreve, K., & De Beer, N. (2006). Advances in three dimensional printing—state of the art and future perspectives. *Rapid Prototyping Journal*. 12: 136-147. DOI: 10.1108/13552540610670717.
- e-Nable. *Enabling the Future “Which Design”*. Disponível em: <http://enablingthefuture.org>. Acesso em: 22 de agosto, 2020.
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer-Verlag, Springer, 2ª Ed.
- Gil, A.C. (2017). *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas, 6ª Ed.
- Gross, B.C., Erkal, J.L., Lockwood, S.Y., Chen, C., & Spence, D.M. (2014). Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences. *Analytical Chemistry*, 86(7): 3240-3253. <https://doi.org/10.1021/ac403397r>
- Harrington, H.J. (1996). *Aperfeiçoando processos empresariais*. São Paulo: Makron Books.
- Kottke, F.J., & Lehmann, J.F. (1994). *Tratado de medicina física e reabilitação de Krusen*. Vol. 2. São Paulo: Manole, 4ª Ed.
- Lipson, H., & Kurman, M. (2013). *Fabricated: The new world of 3D printing*. Indianápolis: John Wiley & Sons, 1ª Ed.
- Ministério da Saúde. (2016). Datasus. Informações de Saúde (Tabnet). Distrito Federal, Brasília. Disponível em: <http://www2.datasus.gov.br/DATASUS/index.php?area=0202>. Acesso em: 22 de agosto, 2020.
- Monteiro, M.T.F. (2015). *A impressão 3D no meio produtivo e o design: um estudo na fabricação de joias*. Dissertação de mestrado (Mestrado em Design). Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
- Open Bionics. Disponível em: <http://www.openhandproject.org/>. Acesso em: 22 de agosto, 2020
- Peixoto, A.M., Zimpel, S.A., Oliveira, A.C.A., Monteiro, R.L.S., & Carneiro, T.K.G. (2017). Prevalência de amputações de membros superiores e inferiores no estado de Alagoas atendidos pelo SUS entre 2008 e 2015. *Fisioterapia e Pesquisa*. 24(4): 378-384. <https://doi.org/10.1590/1809-2950/17029524042017>
- Porto, T.M.S. (2016). *Estudo dos avanços da tecnologia de impressão 3D e da sua aplicação na construção civil*. Projeto de graduação (Monografia) em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Resnik, L., Meucci, M.R., Lieberman-Klinger, S., Fantini, C., Kelty, D.L., Disla, R., & Sasson, N. (2012). Advanced Upper Limb Prosthetic Devices: Implications for Upper Limb Prosthetic Rehabilitation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 93(4): 710-717. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2011.11.010>
- Silva, E., & Menezes, E. (2005). *Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação*. Florianópolis: UFSC, 4ª Ed.
- Silva, J.V.L., & Maia, I.A. (2014). Desenvolvimento de dispositivos de tecnologia assistiva utilizando impressão 3D. Reflexões sobre tecnologia assistiva. Anais do I Simpósio Internacional de Tecnologia Assistiva - Centro Nacional de Referência em Tecnologia Assistiva / CTI Renato Archer. Campinas, Brasil. Disponível em:

https://www.cti.gov.br/sites/default/files//images/cnrta_livro_150715_digital_final_segunda_versao.pdf. Acesso em: 22 de agosto, 2020.

Slack, N., Brandon-Jones, A., & Johnston, R. (2018) *Administração da Produção*. São Paulo: Atlas, 8ª Ed.

Takagaki, L.K. (2012). Tecnologia de impressão 3D. *Revista Inovação Tecnológica*, São Paulo, 2(2): 28-40.

USPTO. (2020). *United States Patent and Trademark Office*. Disponível em: <http://www.uspto.gov/>. Acesso em: 23 de agosto, 2020.

Volpato, N. (2007). *Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações*. São Paulo: Blucher, 1ª Ed.

Volpato, N. (2017). *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. São Paulo: Blucher, 1ª Ed.