

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS
CÂMPUS DE ARARAQUARA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BIOMATERIAIS E
BIOPROCESSOS
MESTRADO PROFISSIONAL

PROPOSTA DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA PARA
BIOIMPRESSÃO 3D AUXILIADA POR MANIPULADOR ROBÓTICO

WILLIAN FERNANDO BARROSO

ORIENTADOR: Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa

ARARAQUARA - SP

2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS
CÂMPUS DE ARARAQUARA

PROPOSTA DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA PARA
BIOIMPRESSÃO 3D AUXILIADA POR MANIPULADOR ROBÓTICO

WILLIAN FERNANDO BARROSO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos (Mestrado Profissional), Área de Biomateriais, Bioprocessos, Bioprodutos da Faculdade de Ciências Farmacêuticas, UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa

ARARAQUARA - SP

2019

B277p Barroso, Willian Fernando.
Proposta de viabilidade técnica-econômica para bioimpressão 3D auxiliada por manipulador robótico / Willian Fernando Barroso. – Araraquara: [S.n.], 2019.
85 f. : il.

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Estadual Paulista. "Júlio de Mesquita Filho". Faculdade de Ciências Farmacêuticas. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos. Área de Biomateriais, Bioprocessos, Bioprodutos.

Orientador: Gustavo Franco Barbosa.

1. Impressão 3D. 2. Bioimpressão 3D. 3. Manufatura digital. 4. Robôs. I. Barbosa, Gustavo Franco, orient. II. Título.

Diretoria do Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - Faculdade de Ciências Farmacêuticas
UNESP - Campus de Araraquara

CAPES: 33004030170P0
Esta ficha não pode ser modificada

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: PROPOSTA DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA PARA BIOIMPRESSÃO 3D AUXILIADA POR MANIPULADOR ROBÓTICO

AUTOR: WILLIAN FERNANDO BARROSO

ORIENTADOR: GUSTAVO FRANCO BARBOSA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA DE BIOMATERIAIS E BIOPROCESSOS, área: Biomateriais, Bioprocessos, Bioprodutos pela Comissão Examinadora:

Professor Adjunto GUSTAVO FRANCO BARBOSA

Departamento de Engenharia Mecânica – DEMec / Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. ANTONIO CARLOS GUASTALDI

Departamento de Físico-Química / Instituto de Química - UNESP - Araraquara

Prof. Dr. MARCELO WILSON ANHESINE

Universidade de Araraquara - UNIARA

Araraquara, 19 de setembro de 2019

Dedicatória

Dedico esse trabalho à minha família, em especial à minha esposa Ana Carolina, pois foi quem sempre apoiou e incentivou minhas escolhas.

À minha amada filha Laura, por ser a razão de todos os esforços e mudanças em minha vida.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por conceder saúde, sabedoria e guiar meus passos durante essa caminhada.

Agradeço imensamente ao meu orientador Profº Dr. Gustavo Franco Barbosa, por acreditar em minha capacidade como discente, permitir e apoiar meu ingresso no curso.

Agradeço a UNESP, pela estrutura e apoio no decorrer do curso.

Agradeço ao pessoal da Seção Técnica de Pós-graduação da Faculdade de Ciências Farmacêuticas – Campus de Araraquara, em especial para Cláudia Lúcia Molina e Aniele Vilella por todas as dúvidas esclarecidas e apoio no decorrer do curso.

Um agradecimento especial aos colegas de sala Renan Roque, Gustavo e Tércio, pois ajudaram muito na execução das atividades de aula.

Agradeço ao Profº Dr. Antônio Carlos Guastaldi e aos demais professores da UNESP, por fazerem parte da mudança em minha vida.

Agradeço ao Profº Dr. Marcelo Wilson Anhesine pela orientação e propostas de melhorias em meu trabalho.

Agradeço a UNIVESP em parceria com a UNESP, pela oportunidade de estagiar nas disciplinas TCC I e II, e pelo ingresso nos cursos de Mediação Pedagógica na EaD e Ensino e Aprendizagem Colaborativos na EaD.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código do Financiamento 001.

*“Direi do Senhor: Ele é o meu Deus, o meu refúgio,
a minha fortaleza, e nele confiarei.”*

(Salmos 91.2 – A Bíblia Sagrada)

RESUMO

O presente projeto de pesquisa, tem como objetivo estudar a viabilidade técnica e financeira para implementação de um manipulador robótico colaborativo, para bioimpressão, utilizando seringas para aplicação da biotinta, definindo os parâmetros de impressão, materiais e equipamentos disponíveis. Propõe-se um estudo sobre os desafios da bioimpressão, tanto na área de desenvolvimento de novos equipamentos, processos e materiais, assim como os desafios sobre impressão de tecidos humanos com células vivas. O trabalho foi realizado com base na revisão da literatura, abordando os principais autores e empresas especializadas no tema proposto, de modo a alcançar o objetivo. O presente projeto estudará a viabilidade de implementação das seringas como efetuator em um manipulador robótico. A metodologia consiste em modelo teórico, seleção dos materiais disponíveis, dividido em quatro etapas, onde serão analisados: concepção, modelo 3D, validação da ideia com simulação em ambiente virtual e fabricação do protótipo em um momento futuro. Os métodos aplicados no projeto contam com um enfoque descritivo qualitativo, com o objetivo de estudar as características e equipamentos apresentados para a fabricação de arcabouços (*scaffolds*) e tecidos com o uso de robô colaborativo.

Palavras-chave: Impressão 3D. Bioimpressão 3D. Manufatura digital. Robôs.

ABSTRACT

This research project aims to study the technical and financial feasibility of implementing a collaborative robotic manipulator, for bioprinting, using syringes for bioink application, defining the printing parameters, materials and equipment available. A study is proposed on the challenges of bioprinting, both in the area of development of new equipment, processes and materials, as well as the challenges of printing human tissues with living cells. The work was based on the literature review, approaching the main authors and companies specialized in the proposed theme, in order to reach the objective. This project will study the feasibility of implementing syringes as an effector in a robotic manipulator. The methodology consists of theoretical model, selection of available materials, divided into four stages, which will be analyzed: conception, 3D model, idea validation with simulation in virtual environment and prototype fabrication in a future moment. The methods applied in the project have a qualitative descriptive approach, aiming to study the characteristics and equipment presented for the manufacture of scaffolds and fabrics using a collaborative robot.

Keywords: 3D printing. Bioprinting 3D. Digital Manufacturing. Robots.

Lista de Figuras

Figura 1: Modelo de impressora 3D FDM. Imagem: NEI.com.br, 2018.....	21
Figura 2: Impressora Flashforge - SLA. Imagem: Flashforge, 2018.....	22
Figura 3: Modelo impresso na impressora SLA. Imagem: Formlabs, 2018.....	22
Figura 4: Acabamento manual. Imagem: Formlabs, 2018.....	23
Figura 5: Impressão SLS. Imagem: Fluxo Consultoria – UFRJ, 2018.....	23
Figura 6: Impressão DMLS. Imagem: Autor. Visita ao CTI, 2019.....	24
Figura 7: Peças impressas na técnica Polyjet. imagem: Stratasys, 2018.	25
Figura 8: Relação entre a engenharia tecidual, a biofabricação, a bioimpressão e a tecnologia da informação. Imagem: Adaptada de Janaina Dernowsek, 2018.	27
Figura 9: Etapas da produção de órgãos e tecidos humanos. Imagem: CTI, 2019...28	
Figura 10: Distinção de biomateriais para bioimpressão. Imagem: Adaptada de (GROLL et al., 2018)	31
Figura 11: Punho esférico. Imagem: Profelectro, 2018.	34
Figura 12: Cadeia cinemática aberta. Imagem: Edisciplinas – USP, 2017.....	35
Figura 13: Cadeia cinemática fechada. Imagem: Edisciplinas – USP, 2017.....	35
Figura 14: Manipulador Cartesiano. Imagem: Edisciplinas – USP, 2017.	36
Figura 15: Manipulador Cilíndrico. Imagem: Edisciplinas – USP, 2017.....	36
Figura 16: Manipulador Esférico. Imagem: Edisciplinas – USP, 2017.....	37
Figura 17: Manipulador SCARA. Imagem: Edisciplinas - USP, 2017.....	37
Figura 18: Manipulador Antropomórfico. Imagem Edisciplinas - USP, 2017.....	38
Figura 19: Célula robotizada. Imagem: AMER, 2018.	39
Figura 20: Robô colaborativo KUKA. Imagem: Direct Industry, 2018.....	40
Figura 21: Evolução da Revolução Industrial. Imagem: ABDI, 2018.....	42
Figura 22: Fluxo de atividades da fase de Planejamento Estratégico de Produtos. Imagem: Rozenfeld et. al, 2006.....	44
Figura 23: BIOASSEMBLYBOT. Imagem: Advanced Science, 2017.....	48
Figura 24: Efetuador BioAssemblyBot®. Imagem: Advanced Solutions, 2017.....	48
Figura 25: Ferramenta de mistura. Imagem: Advanced Solutions, 2017.....	49
Figura 26: Protótipo do implante desenvolvido no projeto “IntelliTUM”. Imagem: Wolf e Scholze, 2017.....	50
Figura 27: Extensões dos arquivos gerados. Imagem: Autodesk, 2019.....	51

Figura 28: Seringas 5 CC (a) e 10 CC (b). Imagem: (a) Advanced Solutions; (b) Allevi, 2019.....	52
Figura 29: Tipos de agulhas. Imagem: Allevi, 2019.....	52
Figura 30: LBR iiWA. Imagem: KUKA AG, 2019.	53
Figura 31: UR5e. Imagem: Universal Robots, 2019.....	54
Figura 32: TX2-60. Imagem: Stäubli, 2019.....	54
Figura 33: Software de modelagem e análise. Imagem: Advanced Solutions, 2019.	55
Figura 34: Impressão PCL. Imagem: Roque, 2019.	59
Figura 35: Ensaio mecânico. Imagem: Roque, 2019.....	60
Figura 36: Adaptador. Fonte: Autor.	66
Figura 37: Montagem da seringa, suporte e tool changer. Fonte: Autor.	66
Figura 38: Softwares Utilizados. Fonte: Autor.	67
Figura 39: Tool Changer. Fonte: Autor.....	68
Figura 40: Interface Stäubli. Fonte: Autor.....	68
Figura 41: Tela inicial. Fonte: Autor.....	69
Figura 42: Emulador. Fonte: Autor.	69
Figura 43: 3D Studio. Fonte: Autor.....	70
Figura 44: Tela de simulação Ur5e. Fonte: Autor.....	71
Figura 45: Programação por pontos UR5e. Fonte: Autor.	71
Figura 46: UR5e com o adaptador. Fonte: Autor.....	72
Figura 47: Extrusão de resina. Fonte: Autor.....	73
Figura 48: Painel Honeycomb. Fonte: PLASCORE, 2019.....	74
Figura 49: Célula Robótica para usinagem e proteção de bordas. Fonte: Autor.	74
Figura 50: Cabeçote de usinagem. Fonte: Autor.....	75
Figura 51: Extrusor. Fonte: ZETTATECCK.	75

Lista de Quadros

Quadro 1: Biomateriais utilizados e suas ligas, características mecânicas. Fonte: Adaptada de Fontes, 2010	30
Quadro 2: Método comparativo. Fonte: Autor.	57
Quadro 3: Robô versus bioimpressora 3D. Fonte: Autor.....	58
Quadro 4: Investimento inicial e taxa de desconto. Fonte: Autor	64
Quadro 5: VPs, VPL, TIR, Taxa de Lucratividade e Payback. Fonte: Autor	64

Lista de Tabelas

Tabela 1: Bico de extrusão, diâmetro e altura da camada (mm).....	59
Tabela 2: Parâmetros ideais para bioimpressão	61
Tabela 3: Itens para Investimento e valores em R\$	63
Tabela 4: Cálculo VP e VP Acumulado em R\$.....	64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 Geral	17
2.2 Específicos.....	17
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	18
3.1 Impressão 3D.....	18
3.1.1 Visão Geral da Impressão 3D	18
3.1.2 Tipos de impressão 3D	20
3.1.2.1 Fabricação com Filamento Fundido (FDM OU FFF)	20
3.1.2.2 Estereolitografia (SLA E DLP).....	21
3.1.2.3 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)	23
3.1.2.4 Sinterização Direta de Metal a Laser (DMLS).....	24
3.1.2.5 Polyjet	25
3.2 Materiais utilizados para impressão 3D.....	25
3.2.1 Bioimpressão 3D	27
3.2.2 Materiais utilizados na bioimpressão 3D	29
3.2.2.1 Biotintas	30
3.3 Automação	31
3.3.1 Robôs industriais.....	33
3.3.1.1 Volume de trabalho	35
3.3.1.2 Classificação dos manipuladores.....	36
3.3.2 Robô colaborativo	38
3.4 Indústria 4.0	41
3.5 Viabilidade econômica - PDP	43
4 METODOLOGIA.....	45
4.1 Integração	46
4.1.1 Integração da Indústria 4.0 com a Medicina 4.0.....	49
4.2 Materiais.....	50
4.3 Métodos	55
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
5.1 Proposta de Integração	62
5.2 Análise dos resultados	63

5.2.1 Estudo de viabilidade	63
5.3 Avaliação da integração	65
5.4 Discussões	76
6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	77
6.1 Conclusão	77
6.2 Trabalhos futuros	78
REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos tempos, a tecnologia de Manufatura Aditiva (MA) tem recebido atenção importante nas áreas de engenharia de tecidos e da ciência dos biomateriais (MOK *et al.*, 2016); (SHIM *et al.* 2012). O desenvolvimento de novos métodos de MA (ou impressão 3D), tem fornecido uma grande abertura para pesquisas a serem realizadas no projeto e fabricação de peças (arcabouços) com aplicações na área da saúde (GIANNATSIS; DEDOUSSIS, 2007); (GIBSON, 2005) e (HOPKINSON; HAGUE; DICKENS, 2006). A tecnologia de fabricação 3D permite a manufatura de implantes customizados e específicos para cada paciente, com grande potencial para fabricação de geometrias complexas e possibilidade de ajustes, possibilitando um cuidado médico dedicado. Essa técnica, além de ser um método rápido, customizado e economicamente viável, permite o planejamento antecipado do processo a ser implantado.

Dessa forma, o emprego de biomateriais nos processos de manufatura aditiva (MA) na área da saúde tem apresentado grande destaque, devido as características de biocompatibilidade, biofuncionalidade, geometria, porosidade e propriedades mecânicas (TEMPLE *et al.*, 2014). Assim, a integração dos processos de MA com os diferentes biomateriais, tem mostrado uma grande evolução no tocante ao ciclo de desenvolvimento, que se inicia através dos exames de imagem como: Tomografia Computadorizada (TC) e Ressonância Magnética (RM), passando pela digitalização dos processos, manipulação virtual de imagens e finalmente a fabricação fiel do tecido que precisa ser implantado e regenerado no paciente (RENGIER *et al.*, 2010).

Diante desse contexto e na direção tecnológica das tendências da manufatura avançada ou também chamada Indústria 4.0, o uso de robôs e da internet tem tornado fatores de extrema importância para a competitividade das empresas. A aplicação de robôs na manufatura traz benefícios para as empresas relacionados a flexibilidade no posicionamento, alcance de pontos dentro do envelope de trabalho, confiabilidade, versatilidade e maior volume de aplicação (CRAIG, 2005); (ROSÁRIO, 2005), o que agrega valor competitivo diante dos concorrentes no tocante a velocidade de fabricação e dimensões dos objetos fabricados.

Assim, busca-se uma inovação tecnológica para a área da saúde que atenda as demandas descritas acima, mediante ao uso de robôs comerciais integrados com

sistemas de aplicação de biomateriais para impressão 3D, de modo a elevar o estado-da-arte desse tipo de aplicação na área do conhecimento em evidência.

2 OBJETIVOS

O presente projeto tem como objetivo estudar e analisar a possibilidade de implementação de um manipulador robótico colaborativo com seringas para bioimpressão como efetuator (*end effector*).

2.1 Geral

Estudar a possibilidade de implementação das seringas de uma bioimpressora como efetuator (*end effector*) em um manipulador robótico colaborativo.

2.2 Específicos

Para alcançar o objetivo geral do projeto, será necessário estudar os diferentes tipos de biotintas utilizados na bioimpressão e suas combinações/ligas, para atingir o ponto ideal de escoamento pelo bico extrusor ou seringas, a disponibilidade de bioimpressoras disponíveis no mercado e suas respectivas resoluções, a espessura ideal da camada e sua precisão, qual o tipo ideal do processo de cura da biotinta e fazer uma análise de mercado sobre a necessidade e viabilidade de novos produtos na bioimpressão.

Analisar os *softwares* disponíveis no mercado – livres (código aberto ou não) e os que necessitam de aquisição de licença – para aquisição da imagem tridimensional e posterior tratamento e modelagem em *software* CAD. Verificar quais *softwares* de análise de engenharia CAE estão atualmente a disposição no mercado.

Será necessário verificar quais programas e tipos de linguagem estão disponíveis para programação de robôs colaborativos e células robóticas, comparando a viabilidade econômica do projeto, a viabilidade será apresentada no capítulo 5, subcapítulo 5.2 Análise dos resultados.

Definição do método para extrusão da biotinta, pressão adequada para extrusão da biotinta e sua velocidade de extrusão do biomaterial.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A problemática a ser estudada, aborda a técnica de impressão 3D na saúde e a necessidade de novos produtos e equipamentos para bioimpressão 3D, buscando a flexibilidade de trabalho e qualidade de impressão de arcabouços (*scaffolds*) e tecidos. Para realizar a revisão literária, foram utilizados artigos científicos no Repositório Institucional UNESP, utilização da Coordenadoria Geral de Biblioteca e consulta ao portal de periódicos CAPES.

Através do acesso pela VPN UNESP aos periódicos PubMed e Web of Science, possibilitando acesso a artigos de alta relevância na área da saúde.

Durante a pesquisa, foi realizado uma visita técnica ao CTI Renato Archer com o acompanhamento, apoio e disponibilização de artigos e livros pela pesquisadora Dr.^a Janaina de Andréa Dernowsek.

3.1 Impressão 3D

A tecnologia de impressão 3D pode ser aplicada em diversos setores, criando desde protótipos, peças simples e peças finais de alta complexidade e tecnologia, desde peças de avião até órgãos artificiais, aplicando camadas de células humanas (AUTODESK, 2019).

3.1.1 Visão Geral da Impressão 3D

A tecnologia de impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva, teve início no ano de 1983, quando o inventor norte americano Charles Hull criou a primeira peça impressa em 3D, criando a estereolitografia. Em 1984 Charles Hull patenteia a técnica de impressão utilizando a estereolitografia, que ficou conhecida como SLA (3D SYSTEMS INC., 2018), desde então a tecnologia de impressão 3D não para de crescer e ganhar novos mercados e adeptos, se antes ela era usada apenas para criar modelos experimentais e auxiliar em montagens, essa realidade mudou bastante, teve evolução tanto em equipamentos para impressão 3D, quanto em materiais para impressão (3D SYSTEMS INC., 2018). Houve avanços em vários setores, tais como: automobilístico, odontológico, saúde, bens de consumo,

entretenimento, educação, aeroespacial e defesa (3D SYSTEMS INC., 2018), passando a ser usada para fabricar peças com uso final.

A fabricação de peças utilizando a impressão 3D, tem como um dos principais recursos a economia de material e redução dos tempos de fabricação, uma vez que seu processo de fabricação é conhecido como manufatura aditiva, ou seja, a peça é fabricada pela adição do material, nas formas tradicionais de fabricação o material é removido – sendo conhecido como manufatura subtrativa – e, com a fabricação feita pelo processo de torneamento ou fresamento (LWT SISTEMAS, 2018). As etapas de fabricação são similares em ambas manufaturas, aditivas e subtrativas, passando desde criação do modelo com o uso do CAD (*Computer Aided Design*, em português Desenho Assistido por Computador), realização das análises de engenharia CAE (*Computer Aided Engineering*, em português Engenharia Assistida por Computador) e por último o CAM (*Computador Aided Manufacturing*, em português Manufatura Assistida por Computador) (LEÃO, 2016).

Gigantes da impressão 3D como as empresas Stratasys e 3D Systems, trabalham para desenvolver e melhorar seus softwares, equipamentos e materiais de impressão 3D, aumentando sua eficiência e garantindo peças com maior qualidade e complexidade (FEIMEC, 2018). Em 2017 a Airbus, produziu o A350 XWB com peças impressas em 3D, que teve peças feitas desde termoplástico ULTEM 9085 (STRATASYS, 2017), até a fabricação de um suporte do pilone, onde é feita a junção das asas com os motores da aeronave, feito em titânio, produzido através da técnica de fabricação de camada aditiva (CANALTECH, 2017).

Outro ponto importante da tecnologia de impressão 3D, é a possibilidade da manufatura híbrida, que surgiu com a necessidade de aumentar a produtividade e reduzir custos de fabricação, a empresa ROMI desenvolveu um Centro de Usinagem Vertical 5 eixos – ROMI DCM 620-5X *Hybrid* – que permite a combinação da manufatura subtrativa com a manufatura aditiva em peças metálicas, podendo aumentar de forma estratégica a resistência em locais que ocorrem maior desgaste da peça fabricada, com a adição de materiais de maior resistência (ROMI, 2017).

Além da fabricação de peças com o advento da manufatura aditiva para diversos setores da indústria, também temos avanços no setor de construção civil, onde universidades e empresas buscam implementar a tecnologia para fabricar casas, podendo construir uma casa com cerca de 185 m² em menos de 24 horas (CC CORP, 2017).

Estima que investimentos em tecnologias disruptivas alcance um patamar econômico na casa dos trilhões de dólares, sendo que entre estas tecnologias estão 3 apresentadas neste trabalho, são elas:

- Robótica avançada – com investimentos e potencial econômico entre US\$1.7 trilhão – US\$4.5 trilhões;
- Impressão 3D – com investimentos e potencial econômico entre US\$200 bilhões – US\$600 bilhões.
- Materiais avançados – com investimentos e potencial econômico entre US\$200 bilhões – US\$500 bilhões.

A impressão 3D representa uma economia entre 25 – 60% em custos aos consumidores que utilizam esta tecnologia, além de permitir um alto nível de customização de seus produtos (MANYIKA *et al.*, 2013) (DABAGUE, 2014).

3.1.2 Tipos de impressão 3D

Existem vários métodos de impressão e modelos de impressoras 3D, para explanação sobre os cinco tipos de impressão 3D mais utilizados, utilizaremos o artigo da Fluxo Consultoria UFRJ escrito por Lucas Fernandes, destacando os modelos abaixo:

- Fabricação com Filamento Fundido (FDM ou FFF)
- Estereolitografia (SLA e DLP)
- Sinterização Seletiva a Laser (SLS)
- Sinterização Direta de Metal a Laser (DMLS)
- PolyJet

3.1.2.1 Fabricação com Filamento Fundido (FDM OU FFF)

É a técnica mais utilizada, pois não tem um custo tão elevado, porém não permite uma fabricação detalhada. A técnica vem do aquecimento de um filamento plástico, geralmente PLA ou ABS, até um estado semissólido e posteriormente a deposição pelo bico extrusor nos eixos X, Y e Z, camada por camada (FERNANDES, 2016). A Figura 1 representa um modelo de impressora 3D por Fabricação com Filamentos Fundidos

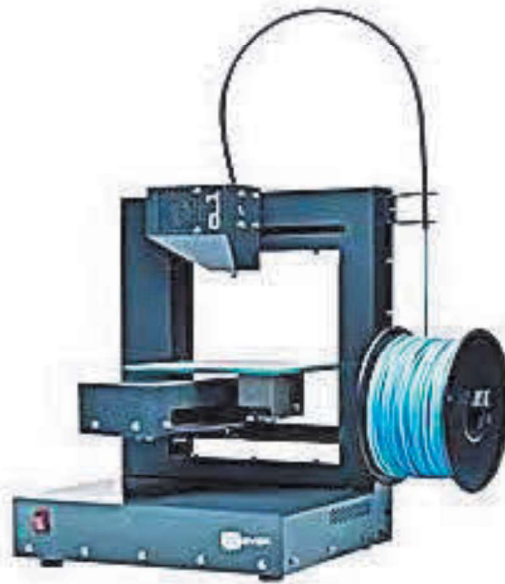


Figura 1: Modelo de impressora 3D FDM. Imagem: NEI.com.br, 2018.

3.1.2.2 Estereolitografia (SLA E DLP)

SLA e DLP são tipos de impressão baseados em laser, onde as impressoras SLA utilizam dois motores – galvanômetro ou galvos – um no eixo X e outro no eixo Y, para direcionar rapidamente um raio laser em toda área de impressão, enquanto a técnica DLP utiliza um projetor digital, esse projetor pisca uma única imagem em cada camada ao mesmo tempo, atingindo uniformemente a plataforma de impressão, resultando em camadas conhecidas como voxels (DROPLAB, 2019).

A qualidade das peças fabricadas por essa técnica é notável, esse método foi desenvolvido por Chuck e é a mais antiga técnica entre os tipos de impressão 3D. São utilizados um laser e uma mesa com reservatório de resina líquida, quando a resina é atingida pelo laser, essa parte se solidifica e se cola a camada anterior, formando o modelo que tem suas camadas em escala microns, a Figura 2 mostra um modelo de impressora SLA com a espessura da camada entre 25 e 100 microns e, um resolução de + ou – 50 microns (DROPLAB, 2019).



Figura 2: Impressora Flashforge - SLA. Imagem: Flashforge, 2018.

A Figura 3 mostra como o modelo impresso sai da impressora, é necessário a criação de suportes para auxiliar a fixação do modelo durante a impressão, sendo necessário um trabalho de acabamento manual após a impressão.

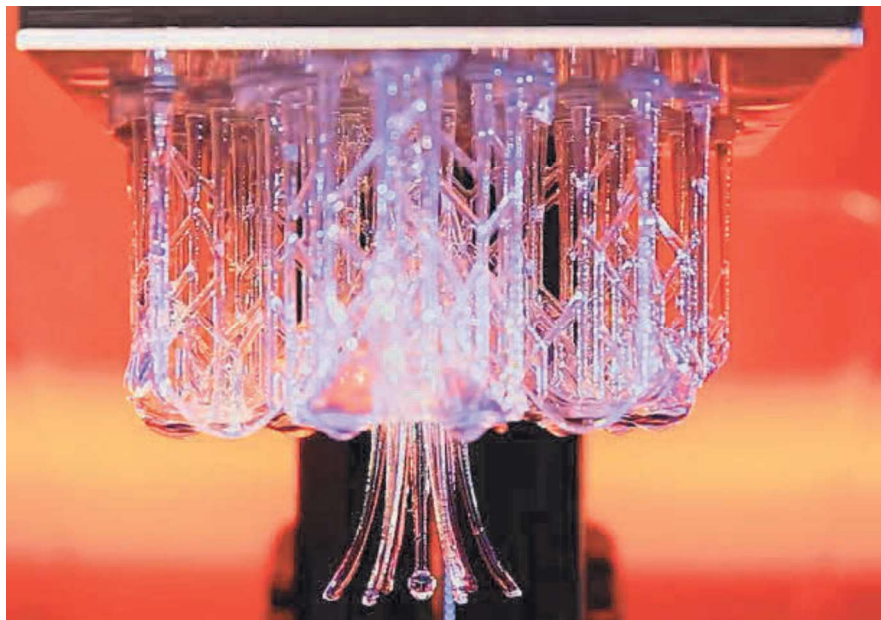


Figura 3: Modelo impresso na impressora SLA. Imagem: Formlabs, 2018.

A Figura 4 mostra o processo de acabamento manual do modelo impresso.

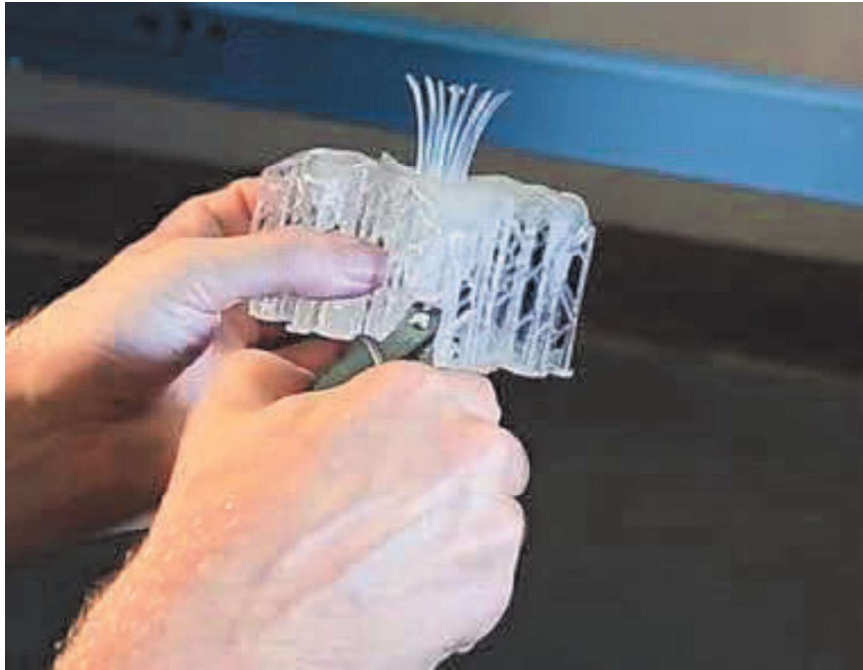


Figura 4: Acabamento manual. Imagem: Formlabs, 2018.

3.1.2.3 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

Uma das vantagens desse método é o fato dele não necessitar de suportes para fabricação do modelo, reduzindo o seu tempo de fabricação e acabamento, permitindo a fabricação de peças de alta complexidade e tendo como resultado um acabamento excelente, a Figura 5 apresenta um modelo após sua impressão, ainda na mesa de impressão da impressora.



Figura 5: Impressão SLS. Imagem: Fluxo Consultoria – UFRJ, 2018.

Essa técnica utiliza um laser (CO₂) e permite confeccionar peças com combinações de materiais, desde nylon em pó e a mistura do nylon com fibra de carbono (FERNANDES, 2016). Outra vantagem é a alta resistência mecânica que a peça pode ter dependendo do material utilizado para fabricação do modelo.

O material que fica na bandeja de impressão após a fabricação pode ser reaproveitado para futuras impressões.

3.1.2.4 Sinterização Direta de Metal a Laser (DMLS)

Técnica similar a técnica SLS, a diferença aqui está no material – metal – utilizado para impressão, para fabricação do modelo é utilizado um poderoso laser (**Yb-fibre laser**) para fundir o metal e consiga criar as camadas, permitindo a criação de peças complexas e finas. A Figura 6, apresenta uma peça fabricada pela técnica DMLS (FLUXO CONSULTORIA UFRJ, 2019).

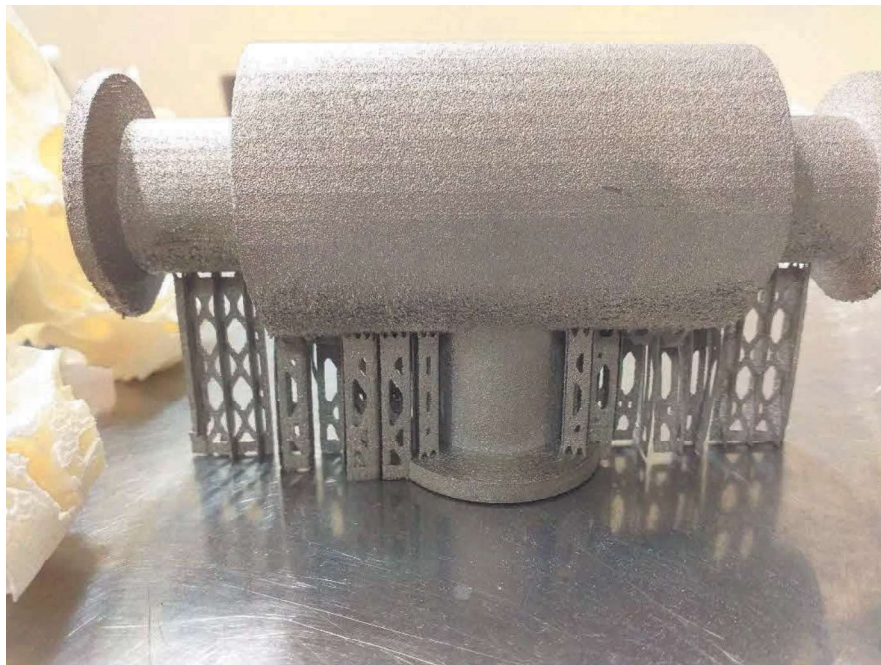


Figura 6: Impressão DMLS. Imagem: Autor. Visita ao CTI, 2019.

Após a impressão pode ser necessário realizar o acabamento das peças fabricadas.

3.1.2.5 Polyjet

A impressão utilizando a técnica Polyjet é similar a impressão jato de tinta, porém ao invés de despejar gotas de tinta sobre o papel, elas jateiam camadas de um fotopolímero líquido, que cura sobre a bandeja de impressão. As impressoras do modelo Polyjet permitem imprimir em uma mesma bandeja peças com texturas e cores diferentes, entregando peças com um acabamento final excelente, porém seu custo de impressão é elevado.

A Figura 7 mostra peças após a impressão com a técnica Polyjet, além da resistência mecânica e flexibilidade adquiridas com a impressão Polyjet, também é possível imprimir peças com materiais biocompatíveis.



Figura 7: Peças impressas na técnica Polyjet. imagem: Stratasys, 2018.

3.2 Materiais utilizados para impressão 3D

Entre os principais avanços da tecnologia de impressão 3D, além das técnicas de fabricação e equipamentos, está o desenvolvimento de materiais para impressão, tais como:

- Plástico PLA (Ácido Polilático) – é um dos materiais mais utilizados na manufatura aditiva, utiliza a técnica FDM (Fused Deposition Modeling, em português Modelagem de Deposição Fundida), isto se dá pelo baixo custo do material e alta durabilidade, além das diversas cores e por ser um material biodegradável e atóxico.
- Plástico ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) – o ABS é um material com ampla aceitação, apresenta resistência mecânica boa, possui

resistência térmica e é muito utilizado na fabricação de protótipos, utiliza a técnica FDM para fabricação. Por se tratar de um material derivado do petróleo, seu uso não é indicado para contato constante com a pele – pois pode causar irritação.

- Plástico PET (Politereftalato de etileno) – resistente a impactos, devido a sua translucidez, ele é utilizado amplamente para testes de forma em protótipos, assim como o PLA e o ABS, o PET também utiliza a técnica FDM para fabricação.
- Nylon – é um polímero leve e resistente, é encontrado em filamento para impressão por FDM ou em pó, sendo impresso pela sinterização a laser ou sinterização seletiva a laser.
- Gesso – é um material poroso, possui baixa resistência mecânica, pode ser impresso com múltiplas cores em impressoras Fullcolor, sua aplicação é mais direcionada para modelos de arquitetura e desenho de produtos, sua técnica de fabricação é a Deposição Seletiva.
- Resina – detalhamento superior aos demais materiais, possui um acabamento suave, possibilita alta complexidade e velocidade de impressão, sua técnica de fabricação é o SLA (Stereolithography, em português Estereolitografia) (CAMMADA, 2018).
- Alumínio – a liga AlSi10Mg é utilizada em peças com uma geometria complexa, com linhas e contornos finos, altamente durável e resistente a altas pressões. Sua aplicação é ideal para a produção de objetos com propriedades térmicas adequadas e que necessitam de baixo peso.
- Titânio – além da resistência mecânica, o titânio também possui uma boa resistência a corrosão e é um material leve, com ampla aplicação nos setores da medicina, química, aeroespacial e automobilístico. O titânio, com sua liga Ti6Al4V, é utilizado em forma de pó e possui as propriedades mecânicas adequadas para aplicação na engenharia de alta performance (3DILLA, 2014).

3.2.1 Bioimpressão 3D

A bioimpressão é uma técnica inovadora e com um potencial imenso na indústria da saúde, ela surgiu a partir da impressão 3D e possui etapas semelhantes, permitindo a fabricação de scaffolds e microtecidos, garantindo uma distribuição uniforme de moléculas e materiais ao longo da estrutura impressa (DERNOWSEK, 2018).

Essa tecnologia é relativamente nova e, grandes esforços estão sendo realizados no desenvolvimento de técnicas de bioimpressão e desenvolvimento de novos materiais biocompatíveis, biomoléculas indutoras e esferoides. Entre as vantagens dos esferoides teciduais ou aglomerados celulares, estão a alta densidade celular, sua estruturação 3D e a possibilidade de construção da microvascularização (DERNOWSEK, 2018).

O processo de biofabricação e bioimpressão tem uma relação significativa com a engenharia de tecidos e a tecnologia da informação, quando integradas, essas tecnologias proporcionam o desenvolvimento de novos métodos e avanços na construção de órgãos (DERNOWSEK, 2018). A Figura 8 mostra a relação entre a engenharia tecidual com os processos de biofabricação e tecnologia da informação.

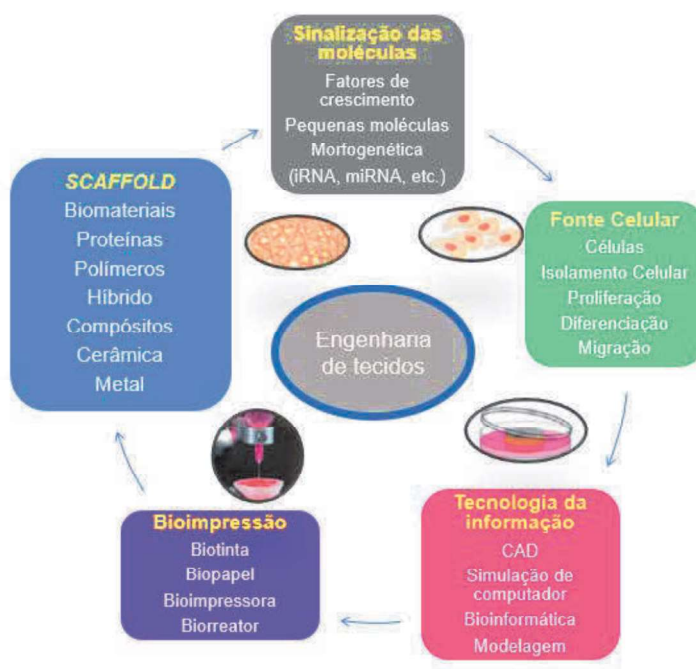


Figura 8: Relação entre a engenharia tecidual, a biofabricação, a bioimpressão e a tecnologia da informação. Imagem: Adaptada de Janaina Dernowsek, 2018.

No Brasil, os avanços na área da tecnologia de bioimpressão vem sendo desenvolvidos pelos pesquisadores do Núcleo de Tecnologias Tridimensionais – NT3D, do Centro de Tecnologia de Informação Renato Archer – CTI, o centro é referência na área de pesquisa, ele faz parte de uma das unidades de pesquisa do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, além do desenvolvimento de impressoras 3D, o CTI também desenvolveu softwares gratuitos para elaboração de modelos CAD a partir de imagens de tomografia e ressonância magnética e bioimpressoras experimentais (CIÊNCIA, 2011).

Para a realização da bioimpressão é necessário a integração interdisciplinar entre a Engenharia e a Biologia, entre outras áreas do conhecimento, a Figura 9 representa as etapas necessárias para a bioimpressão (CIÊNCIA, 2011).

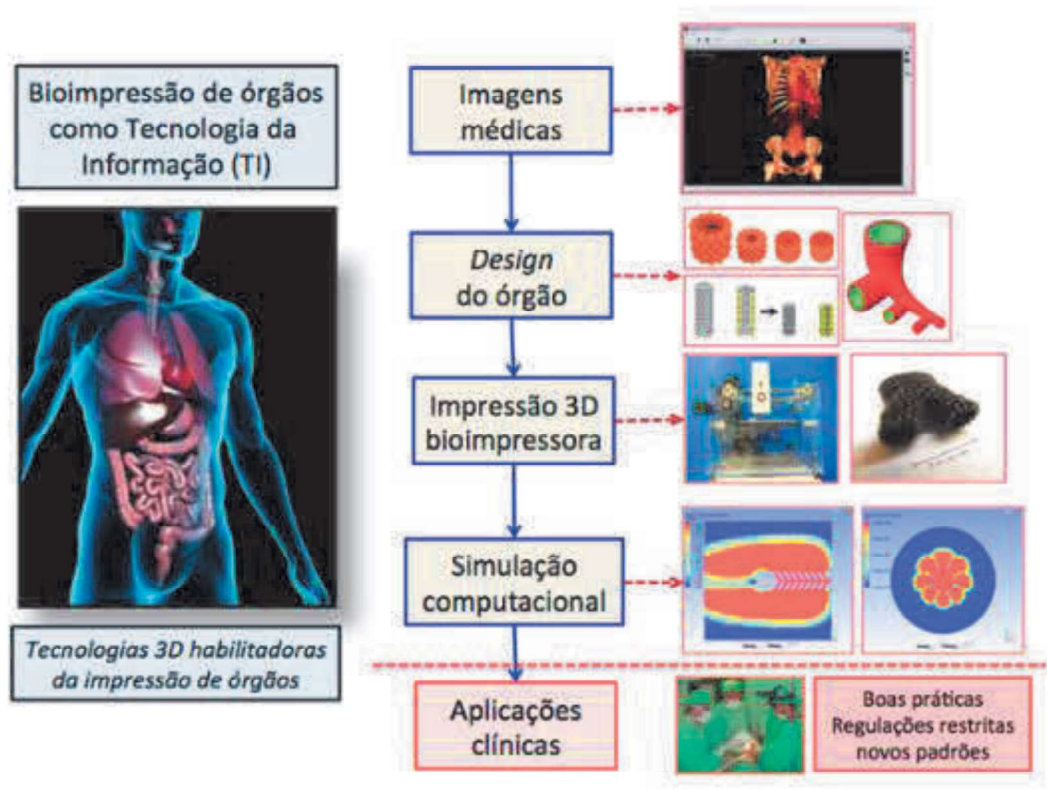


Figura 9: Etapas da produção de órgãos e tecidos humanos. Imagem: CTI, 2019.

Conforme mostra a imagem acima, o processo de bioimpressão passa praticamente pelos mesmos passos da impressão 3D, desde obtenção da imagem e tratamento no software CAD, passando pela análise de engenharia CAE e fabricação CAM, o diferencial fica por parte do material biocompatível.

3.2.2 Materiais utilizados na bioimpressão 3D

O processo para obtenção de um biomaterial se inicia com a identificação da necessidade para uma determinada aplicação, podendo ser para tratamento de uma doença, substituição de uma prótese ou uso cosmético (PIRES; BIERHALZ; MORAES, 2014). Com o uso da biotinta apropriada, torna-se potencialmente capaz a fabricação de tecidos e órgãos precisos, a biotinta é a mistura de um material biocompatível com células vivas, tornando-se em um biomaterial (LI; TAN; LI, 2018). Um bom exemplo de biomaterial é o hidrogel, quando adicionados biomateriais como a quitosana e a hidroxiapatita ele se torna uma solução para o preenchimento ósseo, principalmente na região da face (INOVA UNICAMP, 2011).

Os materiais utilizados na bioimpressão necessitam passar por vários testes em animais e laboratórios antes da aplicação em humanos, entre os materiais encontra-se a PCL (Polycaprolactone, em português Policaprolactona), que é um polímero semicristalino, tenaz e flexível, com uma temperatura de transição vítrea (T_g), entre -60 e -70 °C, com o ponto de fusão respectivamente baixo – em torno de 60 °C (ROA *et al.*, 2010), a biocompatibilidade da PCL permite sua aplicação na indústria biomédica e farmacêutica.

Entre os materiais utilizados, encontram-se os biopolímeros, utilizados na produção das matrizes tridimensionais, servindo como um elo mecânico para o crescimento de células na medicina regenerativa (MAURMANN *et al.*, 2015), sendo possível a combinação de biopolímeros, tais como a PCL e o PLGA – poli(ácido láctico-co-ácido glicólico), em um estudo realizado por pesquisadores de diferentes universidades e apresentado no 13º Congresso Brasileiro de Biopolímeros em 2015, foram produzidos por intermédio da impressão 3D, matrizes utilizando a PCL e o PLGA, para avaliar as células-tronco mesenquimais, onde as matrizes utilizavam a PCL na impressão 3D e posteriormente cobertas com fibras de PLGA, obtidas por eletrofiação (MAURMANN *et al.*, 2015), concluindo que:

A combinação dos dois polímeros permitiu a produção de um suporte com maior estabilidade mecânica devido à presença de PCL depositado em filamentos e a adesão celular devido às fibras de PLGA. As matrizes são adequadas para utilização em terapia celular e podem ser utilizadas na regeneração de tecidos (MAURMANN *et al.*, 2015, p. 1).

Segundo Fontes (2010), o fosfato de cálcio é utilizado como um dos principais materiais para bioimpressão, nomeados como hidroxiapatite e trifosfatos de cálcio, o material é utilizado amplamente como um ligante, pois pode ter uma origem orgânica

ou polimérica, o que influencia nas propriedades mecânicas do *scaffold* produzido. O Quadro 1 apresenta os biomateriais e seus ligantes mais comumente utilizados na bioimpressão, assim como sua tensão de compressão.

Quadro 1: Biomateriais utilizados e suas ligas, características mecânicas. Fonte: Adaptada de Fontes, 2010

	Principal constituinte em pó para a impressão	Adicional/Liga	Tensão de compressão (MPa)
3D	Brushite	Ácido fosfórico	23,4
	Monetite	Ácido fosfórico	15,3
	Monetite	Ácido fosfórico	0,9 - 8,7
	Hidroxiapatita	Polivinilpirrolidona	0,5
	Hidroxiapatita	Orgânico	22,2
	Trifosfato de cálcio	Polivinilpirrolidona	0,7
	Trifosfato de cálcio	Ácido cítrico	4,3

3.2.2.1 Biotintas

A palavra biotinta foi usada pela primeira vez em 2003 por Vladimir Mironov em um artigo na revista *Expert Opinion*, introduzindo também o termo biopapel. A ideia inicial era produzir o biopapel feito com hidrogel e inserir células vivas ou esferoides de tecido, assim o termo biotinta refere-se inicialmente as células que foram posicionadas dentro ou sobre o hidrogel tridimensionalmente (GROLL *et al.*, 2018).

A Figura 10 mostra:

Distinção entre uma biotinta do lado esquerdo, onde as células são um componente obrigatório da formulação de impressão na forma de células individuais, células revestidas e agregados celulares (de um ou vários tipos de células), ou também em combinação com materiais (por exemplo em microcarregadores, embutidos em microgéis, formulados em hidrogel físico, ou formulados com precursores de hidrogel), e uma tinta de biomaterial lado direito, onde um biomaterial é usado para impressão e o contato celular ocorre após a fabricação. As imagens neste esquema não são exibidas em escala (GROLL *et al.*, 2018, p. 4).

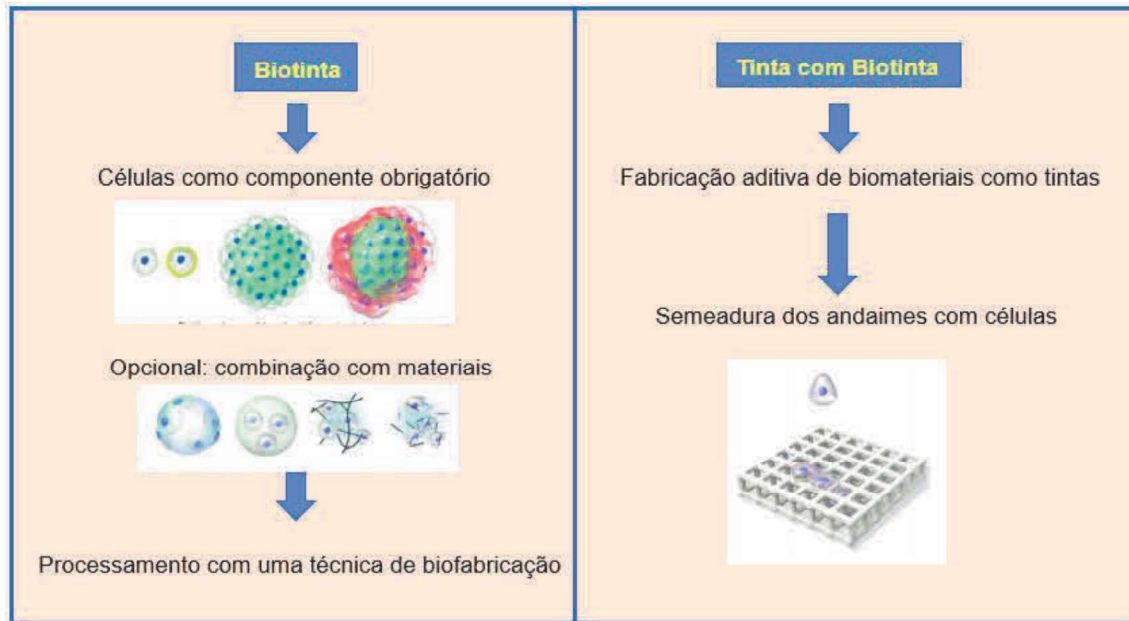


Figura 10: Distinção de biomateriais para bioimpressão. Imagem: Adaptada de (GROLL et al., 2018)

Exemplos de tintas de biomaterial são polímeros termoplásticos, como a Policaprolactona como um exemplo biodegradável, polipropileno como exemplo não degradável, e polioxazolininas como um não degradável, mas termo resistente. Por exemplo, biopolímeros tais como gelatina, materiais inorgânicos tais como cimentos e lamas e metais, geralmente sob a forma de pós, cobrindo assim uma vasta gama de biomateriais, com a exigência adicional de que o material deve ser processável por uma manufatura aditiva ou por uma tecnologia de biofabricação. Essas tintas de biomaterial podem também incluir resinas que oferecem substratos biocompatíveis com alta recursos de resolução para suportar a fabricação de andaimes, semeadura ou fabricação de dispositivos microfluídicos, mas não contêm células que os distingue de um bioresina (GROLL et al., 2018).

3.3 Automação

Segundo Silveira (2018), a automação dos processos produtivos, tem como objetivo a criação de mecanismos capazes de entregar o melhor, com o menor custo e no melhor tempo de produção. Entre os objetivos da automação, destacam-se a busca por:

- Melhorar a produtividade das empresas em diferentes setores da economia;
- Melhora a ergonomia do profissional, reduzindo os riscos de incidentes e acidentes, reduzindo ou até mesmo eliminando os trabalhos perigosos ao trabalhador;

- Simplificar o processo, aumentando a disponibilidade dos equipamentos e peças fabricadas, entregando as no momento certo.

A automação não se limita as indústrias de grande porte ou da metalurgia, pois ela pode e deve ser utilizada em empresas de diferentes portes e setores (ABREU, 2017).

Um sistema automatizado pode ser dividido em duas partes, sendo a primeira delas a parte operacional e a segunda a parte de controle (SILVEIRA, 2018).

Segundo Bianchi (2005), existem três tipos de automação, sendo elas:

- Fixa;
- Programável;
- Flexível.

A Automação Fixa é o primeiro modelo de automação e suas vantagens são:

- Utilização em volumes de produção muito alto;
- Equipamentos projetados para produzir com alta velocidade e baixo custo;
- Dividindo o custo total de peças produzidas pela quantidade de peças produzidas.

Exemplos de itens produzidos são: vidros e blocos de motores.

Suas desvantagens são:

- Risco, por se tratar de um investimento alto, pois caso não ocorra a demanda esperada, o custo unitário da peça fica elevado.
- Economicamente inviável para produção de peças com ciclo de vida curto.

A Automação Programável, suas vantagens são:

- Demanda de produção é pequena;
- Diversidade de fabricação;
- Equipamentos com produção planejada em lotes;
- Dividindo o custo total de peças produzidas pela quantidade de peças produzidas.
- Fácil adaptação as necessidades de produção.

A Automação Flexível, suas vantagens são:

- Utilizada quando tem um volume de produção é mediano;
- Trabalha em linha de estações de trabalho, utilizando equipamentos para manipulação dos materiais;
- É controlada por um computador central, controlando diferentes produtos. Tem a possibilidade de produzir diferentes produtos ao mesmo tempo.

As automações Programável e Flexível, possuem um alto investimento, porém devido a flexibilidade de produção, seus processos produtivos tornam-se viáveis, não possuindo desvantagem em relação a Automação Fixa.

Segundo Alecrim (2018), a automação não se limita apenas a aplicação em grandes indústrias, podendo ser aplicada em diferentes seguimentos, desde automatização de uma planta de trabalho em uma montadora de veículos, até em gestão de contratos, otimizando os processos entre os diversos departamentos e evitando multas e ações judiciais.

3.3.1 Robôs industriais

Por definição da ISO (*International Organization for Standardization*, em português Organização Internacional para Padronização), através da ISO-10218, um robô industrial é uma máquina de manipulação, contendo vários graus de liberdade, com comandos automáticos, reprogramável e multifuncional, podendo ter base fixa ou móvel, para utilização em automação industrial (EDISCIPLINAS - USP, 2017).

Basicamente, o robô possui:

- i.) Uma estrutura mecânica ou Manipulador:

Corpos rígidos ligados sequencialmente, denominados de ligamentos ou membros, conectados por juntas.

O braço é o provedor de mobilidade, o punho para garantir a delicadeza, qualidade e velocidade de movimentos, e um efetuador ligado a extremidade do punho.

O tipo de punho que proporciona maior qualidade é formado por três juntas, a Figura 11 apresenta um esboço de um punho esférico.

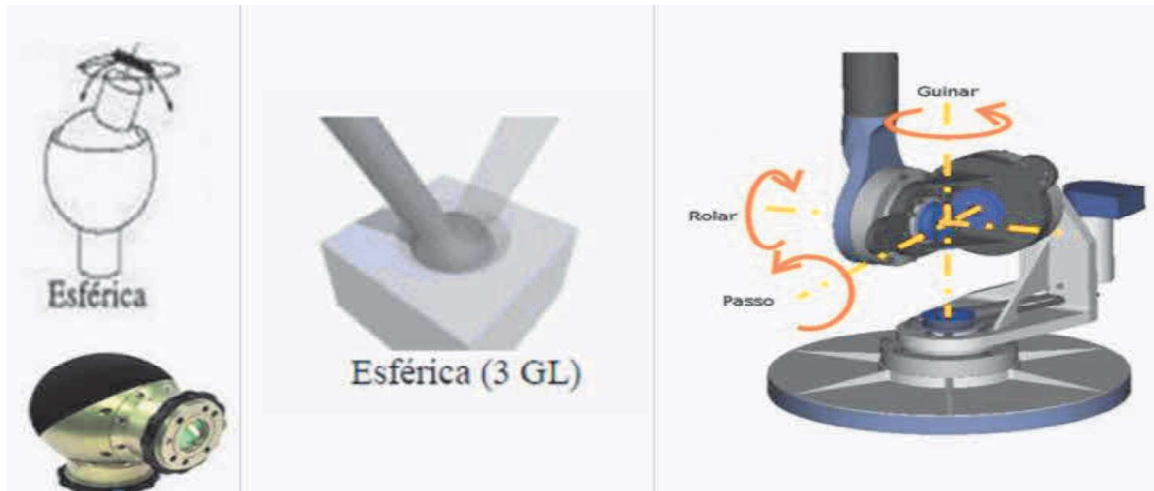


Figura 11: Punho esférico. Imagem: Profelectro, 2018.

ii.) Atuadores:

É o que dá o movimento ao manipulador, através do acionamento das juntas, podendo ser atuadores elétricos, hidráulicos e pneumático, sendo o último usado em menor escala.

iii.) Sensores:

Medem o *status* do manipulador, tais como posição e velocidade de juntas.

iv.) Sistema de controle:

Possibilita planejar, controlar e supervisionar o movimento do manipulador.

Existem duas estruturas de manipuladores, a mais comum é a cadeia cinemática aberta, é quando há somente uma sequência de ligamentos conectando duas extremidades (Figura 12).

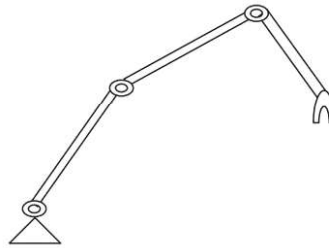


Figura 12: Cadeia cinemática aberta. Imagem: Edisciplinas – USP, 2017.

Quando essa sequência entre as extremidades do manipulador forma um laço ou quando uma junta se liga a mais de duas juntas, forma uma cadeia cinemática fechada (Figura 13).

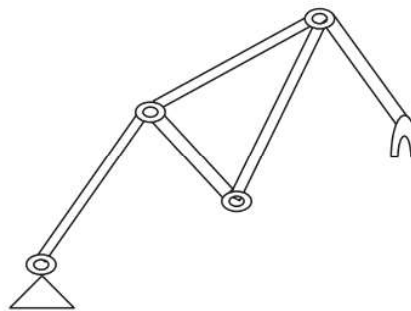


Figura 13: Cadeia cinemática fechada. Imagem: Edisciplinas – USP, 2017.

As juntas ou articulações do manipulador asseguram a mobilidade, elas podem ser de dois tipos:

1. Prismática – proporciona o movimento do ligamento unido a junta;
2. Revolução – proporciona a rotação do ligamento unido a junta.

3.3.1.1 Volume de trabalho

Segundo Bianchi (2005), o volume de trabalho é o espaço do ambiente que rodeia o manipulador que o efetuador pode alcançar, a forma e medida do volume de trabalho depende da estrutura do manipulador e as limitações de suas juntas.

3.3.1.2 Classificação dos manipuladores

Robô Cartesiano: possui 3 juntas prismáticas (PPP), resulta em um movimento composto de 3 translações, coincidindo com um sistema de coordenadas cartesianas (EDISCIPLINAS - USP, 2017). A Figura 14 apresenta o modelo de robô cartesiano.

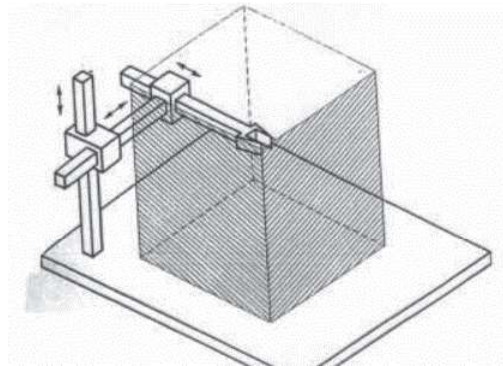


Figura 14: Manipulador Cartesiano. Imagem: Edisciplinas – USP, 2017.

Esse tipo de estrutura proporciona rigidez mecânica e exatidão de posicionamento em qualquer ponto do volume de trabalho, devido à exclusividade das juntas prismáticas, essa estrutura tem um baixo grau de destreza.

Robô Cilíndrico: A Figura 15 apresenta o robô cilíndrico, possui 2 articulações prismáticas e 1 de rotação, a junta de rotação substitui a primeira junta prismática do modelo cartesiano. A exatidão decai quando o alcance do braço aumenta (EDISCIPLINAS - USP, 2017).

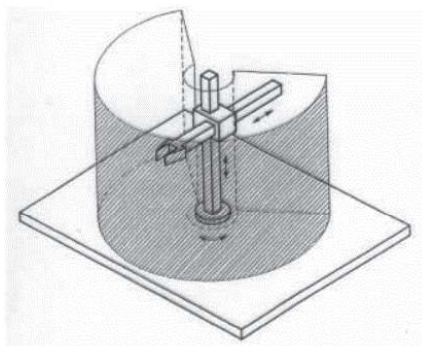


Figura 15: Manipulador Cilíndrico. Imagem: Edisciplinas – USP, 2017.

Robô esférico: Os eixos de movimentação formam uma referência polar, possui 1 junta prismática e 2 juntas de rotação. Essa concepção torna o manipulador cilíndrico. Sua rigidez mecânica é inferior quando comparado com os modelos anteriores. Sua exatidão de posicionamento é proporcionalmente inferior ao alcance da extremidade do braço.

A Figura 16 apresenta o volume de trabalho gerado pelo modelo, parecido com uma esfera.

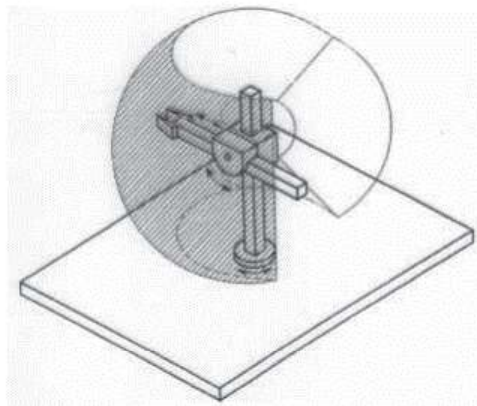


Figura 16: Manipulador Esférico. Imagem: Edisciplinas – USP, 2017.

Robô Scara (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*, em português Braço Robótico para Montagem de Conformidade Seletiva): Contém 2 juntas de rotação, com eixos paralelos para movimentação do efetuador em um plano de trabalho, e uma junta prismática, perpendicular a esse plano. A Figura 17 apresenta seu volume de trabalho possui uma forma cilíndrica.

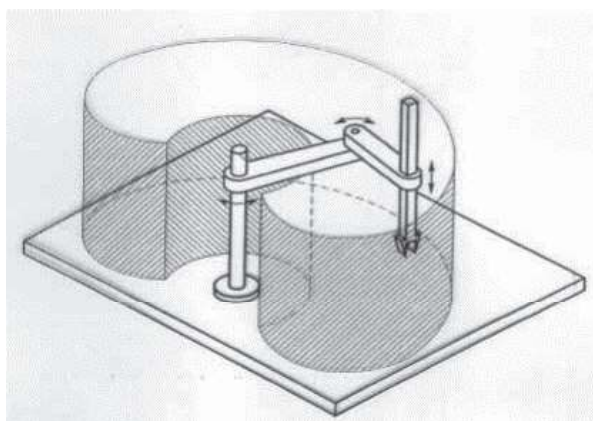


Figura 17: Manipulador SCARA. Imagem: Edisciplinas - USP, 2017.

Robô Articulado ou Antropomórfico: Possui pelo menos 3 juntas de rotação, o eixo de rotação da base é perpendicular aos outros eixos, esse modelo de manipulador possui uma mobilidade maior quando comparada aos outros manipuladores (EDISCIPLINAS - USP, 2017). A Figura 18 apresenta o volume de trabalho desse modelo, sua rigidez depende da posição no envelope de trabalho.

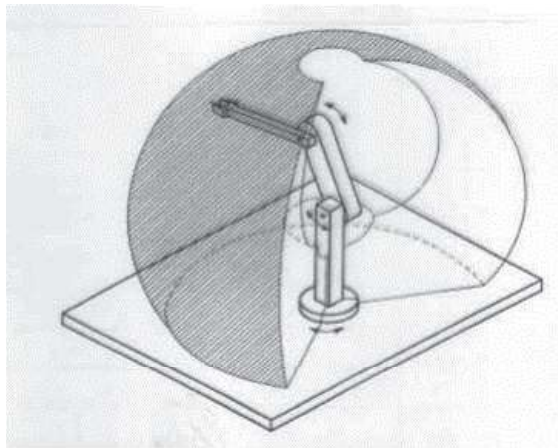


Figura 18: Manipulador Antropomórfico. Imagem Edisciplinas - USP, 2017.

3.3.2 Robô colaborativo

Quando se fala em automação, logo pensamos em células robóticas, onde a máquina – manipulador robótico – faz tudo, sendo monitorada e controlada por um ou mais operadores, porém com o intuito de aumentar a produção e a segurança dos colaboradores, esse conceito de célula robótica vem mudando, dando espaço aos robôs colaborativos, pois robôs colaborativos são intuitivos e podem trabalhar em conjunto com o ser humano, sem a necessidade de toda a proteção que temos em uma célula robótica (ROBOTERIN, 2017).

Na Figura 19, temos um modelo de célula robótica, onde o operador fica do lado de fora da célula e faz todo o controle utilizando o controle manual do braço robótico e o painel de comandos.



Figura 19: Célula robotizada. Imagem: AMER, 2018.

A área de manipulação – produção – fica enclausurada e o operador só tem acesso com o equipamento desligado, seguindo as normas da NR 12, ou seja, para entrar ele necessita parar a produção e, isso gera um tempo de produção maior, pois será necessário desligar os alarmes de proteção da máquina e reposicionar o braço robótico.

Segundo informativo da empresa ROBOTERIN (2017), quando falamos em robô colaborativo, muitos pensam em um robô sem enclausuramento e trabalha em conjunto com os humanos, porém isso em si só não o torna colaborativo, de acordo com as normas internacionais ISO-10218 partes 1 e 2, são necessários quatro tipos de características para tornar-se um robô colaborativo, são elas:

- Parada monitorada de segurança – esse sistema permite ao ser humano entrar no espaço de trabalho do robô quando ele está trabalhando de forma autônoma;
-Ensino manual do percurso: Esse é um recurso que determinados robôs possuem para serem guiados e gravar o percurso que o operador quer que ele faça, esse recurso pode ser adicionado utilizando um sensor de torque de força.
- Limitação de Potência e Força – muitos robôs colaborativos são certificados para trabalho humano-robô, a certificação técnica deles é feita pela a ISO/TS 15066, especificando as forças máximas (N) e energia (J) que um ser humano pode sofrer sem causar danos;

- Responde a esforços – Uma das características desse tipo de robô, é o fato de suas articulações permitirem e lerem forças. Permitindo detectar forças aplicadas sobre eles, podendo nesses casos mudarem sua trajetória ou pararem;
- Monitoramento – o robô colaborativo trabalha com o sistema de monitoramento SSM (*Speed and Separation Monitoring*, em português Monitoramento de Velocidade e Separação), nesse modelo o robô é programado para continuar trabalhando quando detecta a presença de um humano, porém com uma redução de velocidade de acordo com as distâncias programadas, podendo evoluir para o sistema SMS (*Safety Monitored Stop*, em português Parada Monitorada de Segurança) para garantir a segurança do operador.

Atualmente temos vários fornecedores de robôs colaborativos, onde podemos escolher sua aplicação entre carga útil, alcance, número de eixos, funções, etc.

Na Figura 20, temos um modelo de robô colaborativo da empresa KUKA.

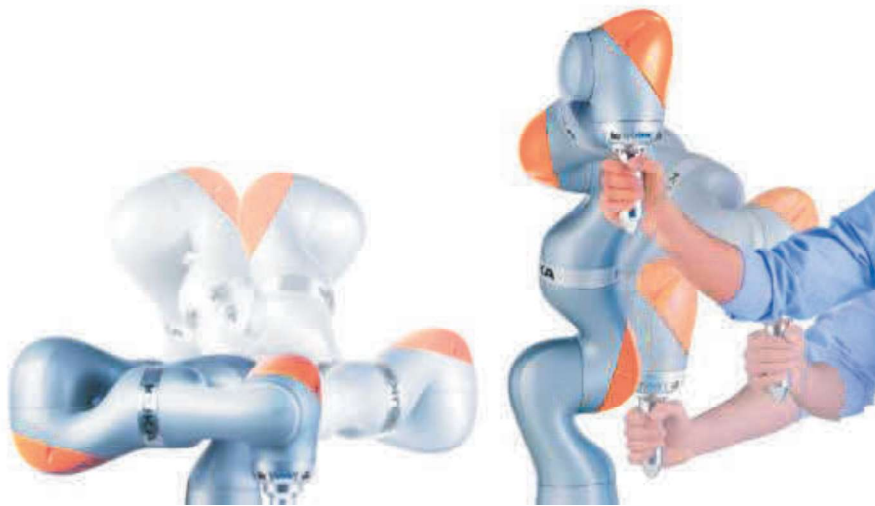


Figura 20: Robô colaborativo KUKA. Imagem: Direct Industry, 2018.

O modelo apresentado na imagem é do tipo articulado, possui 7 eixos, tem um alcance de 800mm, possui uma carga útil de 7 kg (15.432 lb) e uma repetibilidade de 0,1 mm (DIRECT INDUSTRY, 2018).

3.4 Indústria 4.0

Indústria 4.0, também conhecida como a 4ª Revolução Industrial, é um conceito de indústria proposto recentemente, o termo foi utilizado pela primeira vez na Feira de Hannover em 2011 e, em 2012 os responsáveis pelo projeto ministrado por Siegfried Dais da indústria Bosch e Henning Kagermann da ACATECH (*German Academy of Science and Engineering*, em português Academia Alemã de Ciências e Engenharia), o objetivo do grupo era apresentar um conjunto de ações e recomendações ao Governo Federal Alemão, tendo o relatório final do grupo apresentado novamente na Feira de Hannover de 2013 (SILVEIRA, 2018).

O relatório final apresentado conta com seis princípios para projeto na Indústria 4.0, esses princípios norteiam empresas a identificarem e implementar alguns cenários previstos (ACURA, 2018), tais como:

- Interoperabilidade – habilidade de sistemas ciber-físicos, dos humanos e fábricas inteligentes em conectarem entre si, através da internet e Computação em Nuvem, Big Data;
- Virtualização – cópia virtual das fábricas inteligentes, criada por sensores (que monitoram os processos físicos com modelos virtuais de planta em ambiente de simulação);
- Descentralização – habilidade de tomarem decisões sem intervenção humana nos sistemas de fábrica inteligente, Inteligência Artificial;
- Capacidade em tempo real – coleta e análise de dados, entregando conhecimento imediatamente após a análise;
- Orientação a serviços – utilização de *softwares* orientados a serviços, aliados ao conceito de internet de serviços;
- Modularidade – produção por demanda, adaptação flexível das fábricas inteligentes aos módulos de produção, permitindo flexibilidade para alteração dos trabalhos das máquinas.

De acordo com o Ministério da Indústria, Comércio e Serviços a quarta revolução industrial se caracteriza por um conjunto de tecnologias que permitem a fusão do mundo físico, digital e biológico. Ela é representada pela Inteligência Artificial, Robótica, Big Data entre outros.

Segundo Silveira (2018), a indústria 4.0 é um conceito de indústria que emprega inovações tecnológicas da automação, aplicadas nos processos de manufatura. Através de controles de sistemas, internet das coisas, os processos de manufatura se tornarão cada vez mais eficientes, autônomos e customizáveis.

A Figura 21 apresenta a evolução da Revolução Industrial iniciada em 1780.



Figura 21: Evolução da Revolução Industrial. Imagem: ABDI, 2018.

Segundo dados da ABDI (2019), o Brasil tem uma estimativa de redução de custos industriais com a migração industrial para o conceito de indústria 4.0, será em torno de R\$7 bilhões/ano.

Segundo Silveira (2018), o maior impacto que a indústria 4.0 causará, será uma mudança que impactará o mercado mundial, criando novos modelos de serviços.

A tendência de um mercado cada vez mais exigente, as empresas procuram agregar aos seus produtos as necessidades e especificação de cada cliente, fornecendo um serviço – produto – exclusivo. A necessidade de customizar de acordo com a necessidade prévia do consumidor, torna-se uma variável a mais na manufatura 4.0, porém fábricas inteligentes serão capazes de entregar produtos personalizados de acordo com cada cliente.

Outra tendência é a demanda por qualificação de profissionais, pois surgirão novas profissões, por outro lado, algumas profissionais deixarão de existir, os

trabalhos repetitivos realizados de forma manual tendem a serem substituídos por mão de obra automatizada (VENTURELLI, 2018). Entre as vantagens da indústria 4.0 já mencionadas, podemos citar também: a economia de energia; redução de custos; otimização dos recursos naturais; e a redução de erros.

3.5 Viabilidade econômica - PDP

Uma questão importante para o Processo de Desenvolvimento de Produtos – PDP é saber sua viabilidade econômica, tendo isto em mente o livro *Gestão de Desenvolvimento de Produtos* de Daniel Capaldo Amaral *et. al.*, serve como um guia de orientação no desenvolvimento de produtos.

Entre os objetivos do livro, está a visão ampla do negócio, abrangendo todo o ciclo de vida do produto, compreendendo a estratégia da empresa na concepção e definição da carteira de produtos. Está visão engloba toda a parte de engenharia, lançamento, acompanhamento do produto durante sua comercialização até sua descontinuação (ROZENFELD *et al.*, 2006).

Uma abordagem apresenta por Rozenfeld *et. al.*, (2006), está ligada a definição do Time de Planejamento Estratégico e entre os critérios para formação do Time, estão:

- time formado por 10 ou menos membros;
- todos do time são voluntários;
- trabalham da concepção até o produto final;
- dedicação em tempo integral;
- reportam diretamente ao líder;
- funções centrais, tais como: Marketing, Engenharia e Produção precisam estar contidos no time;
- proximidade física de todos os membros, pois isto facilita o diálogo e a percepção de todos.

Outro ponto importante segundo Rozenfeld, *et. al.*, (2006), é manter a liderança de um projeto sob um único líder, pois exigem habilidades de aproximação em uma única pessoa, tendo o líder como principal habilidade a liderança do time, ficando o líder designado a fazer a interface com outras áreas dentro de setores internos ou externos da instituição.

A Figura a seguir representa o fluxo de atividades da fase de Planejamento Estratégico de Produtos proposta por Rozenfeld, *et. al*, (2006).

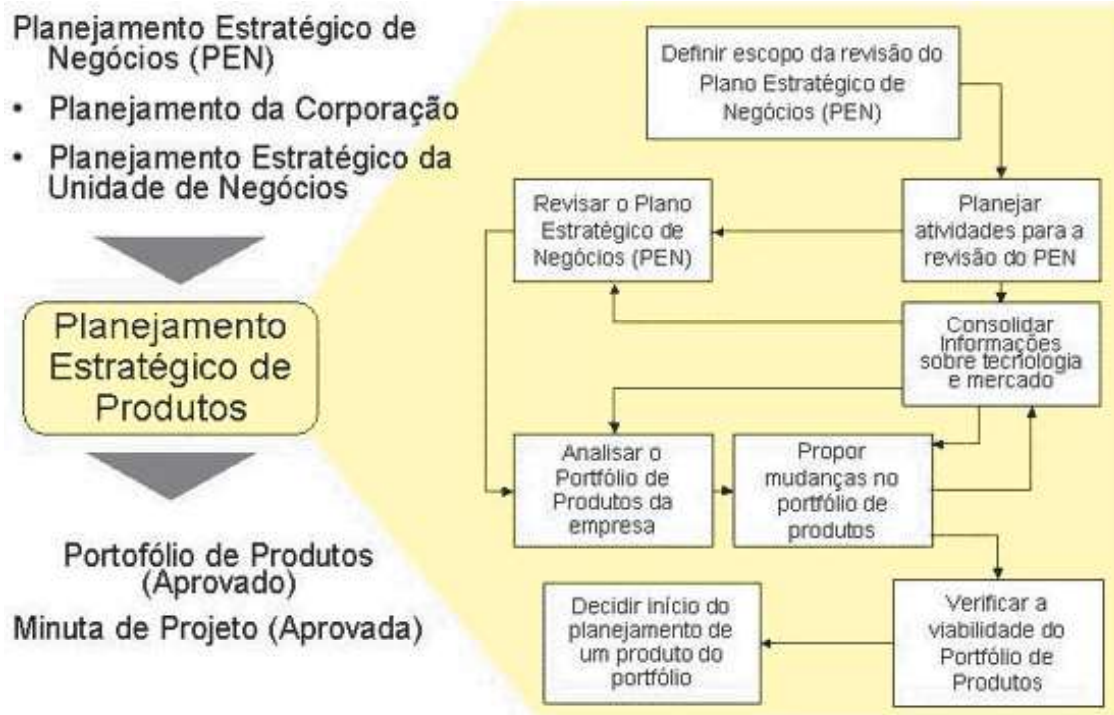


Figura 22: Fluxo de atividades da fase de Planejamento Estratégico de Produtos. Imagem: Rozenfeld *et. al*, 2006

4 METODOLOGIA

Através da revisão da literatura, foi realizado um estudo de biomateriais disponíveis para fabricação de biotintas e quais as melhores adições de ligantes para aumentar a resistência mecânica dos arcabouços (*scaffolds*) produzidos por bioimpressão, com potencial para bioimpressão por robô colaborativo.

O projeto apresenta na introdução uma revisão sobre a literatura disponível, um levantamento dos tipos de impressão 3D e bioimpressão disponíveis e, também uma revisão sobre as biotintas e seus ligantes.

A metodologia aplicada consiste no conceito proposto para robotização da bioimpressão, com a finalidade de:

- Utilizar robôs colaborativos para fabricar tecidos humanos e arcabouços;
- Método de bioimpressão 3D;
- Mobilidade e flexibilidade;
- Reduzir o ciclo de produção;
- Melhorar e implementar a interface multidisciplinar sobre o tema;
- Alocar o equipamento em centros médicos;
- Redução do tempo de espera pelo paciente por próteses;
- Baixo custo em relação aos vários modelos de impressora 3D;
- Aumentar o uso de robôs na saúde.

O conceito proposto foi:

- Utilizar o robô colaborativo;
- Utilizar as seringas da bioimpressora ALLEVI 2;
- Integrar os sistemas;
- Integração da Tomografia Computadorizada/Ressonância Magnética com os softwares CAD/CAM;
- Automatizar o processo;
- Aplicação do conceito de indústria 4.0;
- Inovação na manufatura.

Para estudar a viabilidade de implementação das seringas como efetuator no robô colaborativo, utilizaremos os robôs da KUKA – modelo IIWA 7 R800; Universal Robots – modelo UR5e e Stäubli – modelo TX2, apresentando vantagens e desvantagens de cada modelo, considerando suas aplicabilidades, repetibilidades e alcance aproximados.

Os critérios de escolhas dos robôs foram os seguintes:

- KUKA – por ser um modelo de uma empresa conceituada que oferece todas as funcionalidades exigidas no projeto;
- Universal Robots – por ser um modelo igualmente conceituado como o KUKA e ter um preço de aquisição melhor;
- Stäubli – o modelo TX2 selecionado não é colaborativo, e sua escolha se deu pelo fato dos robôs da Stäubli serem amplamente utilizados em células robóticas na indústria, sendo uma opção para implementação de funcionalidades colaborativas, sendo que o mesmo TX2 possui uma versão de robô colaborativo.

Estes três modelos foram escolhidos por representarem bem o que temos disponíveis no mercado em questão de robôs colaborativos, uma vez que temos mais fabricantes de robôs colaborativos ou não, disponíveis no mercado (COBOTSGUIDE, 2019), podemos citar alguns:

- ABB;
- Kawasaki;
- Denso Wave;
- FANUC;
- Kawada;
- Yaskawa;
- COMAU.

4.1 Integração

A ideia teórica do projeto é a possibilidade de implementação do manipulador robótico colaborativo com as seringas de impressão, para obtenção desse resultado

iremos estudar as possibilidades de uso das seringas da bioimpressora ALLEVI 2 que temos no laboratório do IQ – UNESP.

Para analisar as possibilidades quanto ao envelope de trabalho, alcance e precisão do equipamento selecionado, será desenvolvido em *software* CAD os efetuadores e suportes para o efetuator, posteriormente será realizada simulações em ambiente virtual.

Segundo Klug (2017, p. 18), envelope de trabalho é o espaço que o robô tem para manipular e extremidade de seu punho, tendo como configurações seriais: Cartesiano (PPP); Cilíndrico (RPP); Esférico (RRP); Scara (RRP) e Vertical Articulado (RRR).

Segundo Riascos (2010), os robôs podem ser classificados de acordo com vários critérios, tais como: autonomia do sistema de controle, mobilidade da base, estrutura cinemática, forma de acionamento, graus de liberdade, geometria do espaço de trabalho, entre outros.

Com o intuito de aumentar o envelope de trabalho que temos disponíveis com as impressoras para bioimpressão de mesa, o robô colaborativo pode ser uma alternativa interessante, ele substituiria o uso de vários modelos de bioimpressoras, pois quanto maior for a área de impressão da bioimpressora, maior será seu valor de compra, por outro lado com a aquisição e implementação das seringas no robô colaborativo, esse custo seria mantido somente na aquisição da primeira unidade do robô, podendo ter seu efetuator alterado para diversos serviços dentro do laboratório.

Atualmente, a empresa Advanced Solutions desenvolveu um braço robótico contendo 6 eixos para bioimpressão e biofabricação de tecidos (ADVANCED SOLUTIONS, 2017), segundo informações da empresa trata-se do primeiro braço robótico utilizado para biofabricação.

A Figura 23 apresenta o modelo desenvolvido pela empresa.



Figura 23: BIOASSEMBLYBOT. Imagem: Advanced Science, 2017.

O conceito do BioAssemblyBot® é um conceito de bancada, ou seja, estação fixa de trabalho, mais parecido com a bioimpressora convencional.

Na Figura 24, temos um modelo de efetuador do BioAssemblyBot®, a ideia teórica do projeto é similar a esse efetuador.

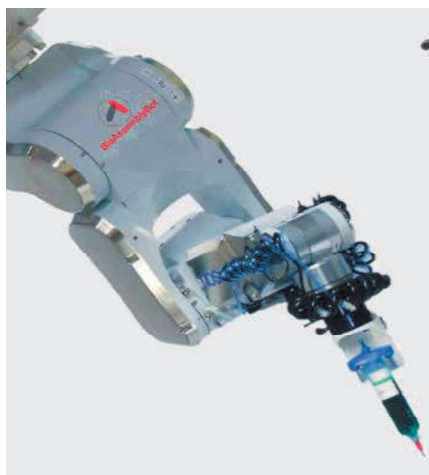


Figura 24: Efetuador BioAssemblyBot®. Imagem: Advanced Solutions, 2017.

A Figura 25 apresenta um modelo de seringa utilizado no braço robótico da Advanced Solutions, que pode extrudar dois biomateriais ao mesmo tempo.



Figura 25: Ferramenta de mistura. Imagem: Advanced Solutions, 2017.

4.1.1 Integração da Indústria 4.0 com a Medicina 4.0

Segundo Wolf e Scholze (2017), a evolução na medicina ocorreu por séculos, no início a medicina necessita de médicos altamente capacitados e utilizava-se de um número reduzido de medicamentos, esta era a Medicina 1.0; já na Medicina 2.0, foram descobertas novas drogas e o uso de máquinas de raios-x, mudando significativamente a medicina e gerando um grande avanço; nas décadas subsequentes aconteceram avanços nos processos cirúrgicos, onde foram desenvolvidas e introduzidas novas tecnologias e a eletrônica de microsistemas, possibilitando avanços impensáveis nas cirurgias, tornando-se a Medicina 3.0; e agora com os avanços na indústria 4.0, a medicina também está se desenvolvendo rapidamente, tornando a Medicina 4.0 uma realidade, pois hoje o alto nível das tecnologias de informação e das comunicações combinados com a microeletrônica,

permitem novas formas de procedimentos e tratamentos, melhorando a qualidade de vida do paciente.

Um exemplo é o implante do protótipo da Figura 26, desenvolvido com o apoio do governo alemão, no qual foi desenvolvido um sistema para monitoramento do oxigênio dissolvido, podendo identificar a deficiência de oxigênio (hipóxia) encontrada em muitos tumores sólidos, fornecendo informações sobre o tumor, e assim direcionando uma terapia mais otimizada para cada paciente (WOLF; SCHOLZE, 2017).



Figura 26: Protótipo do implante desenvolvido no projeto “IntelliTUM”. Imagem: Wolf e Scholze, 2017.

4.2 Materiais

Para elaboração dos modelos CAD propostos no projeto, será utilizado o software Inventor® Professional 2018, versão para estudantes. Este *software* foi selecionado pelo fato de oferecer as funcionalidades de modelagem e simulação. A versão para estudantes tem uma licença de três anos, somente para critérios de comparação, o valor anual da licença do Inventor® Professional fica em torno de R\$5.200,00. Esse valor pode ser reduzido comprando a licença por mais tempo.

A Figura 27 apresenta as extensões de arquivos gerados com *software* Inventor®.

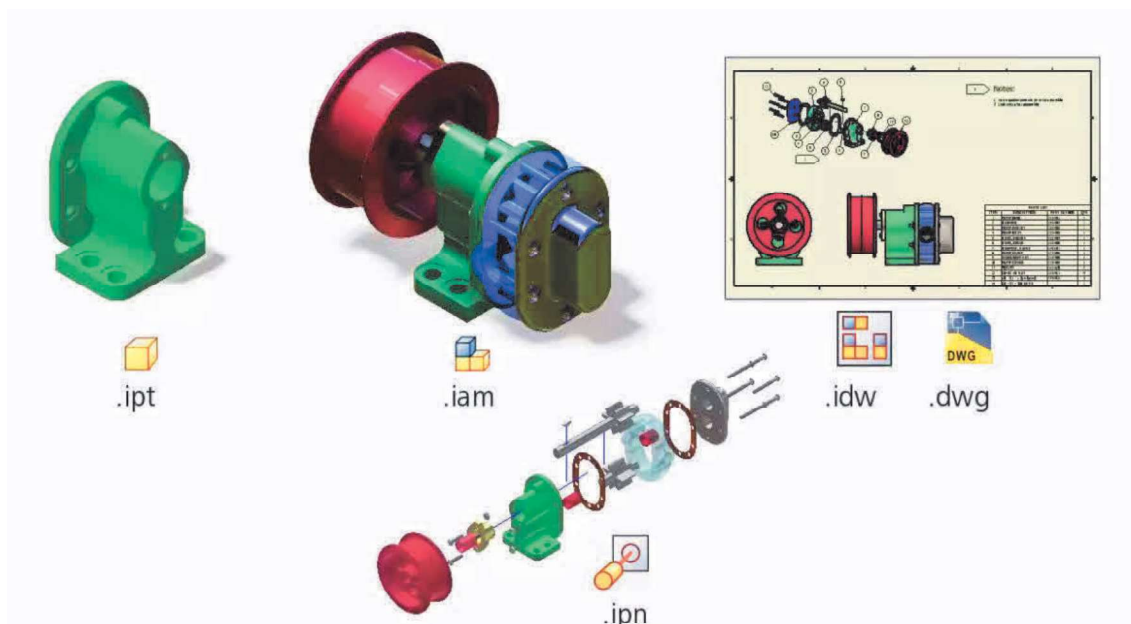


Figura 27: Extensões dos arquivos gerados. Imagem: Autodesk, 2019.

As extensões têm as seguintes funcionalidades:

1. Arquivos de peças (.ipt);
2. Arquivos de montagem (.iam);
3. Documentos de desenhos (.idw e .dwg);
4. Arquivo de apresentação (.ipn).

O arquivo (.ipn) tem a finalidade exclusiva de gerar projeções explodidas de montagem e junto com a funcionalidade de simulação, será essencial para o entendimento do projeto proposto.

Outra funcionalidade importante do Inventor® é a possibilidade de referenciar um arquivo em um outro arquivo no banco de dados, dessa forma qualquer alteração feita no arquivo de peça, salva automaticamente a alteração no arquivo de desenho.

A criação de um esboço 2D é uma funcionalidade do *software* que permitirá a criação do modelo 3D do suporte do efetuator para o robô colaborativo.

A proposta usará seringas, a princípio, de 3 e 5 CC (Centímetro Cúbico), pois são os modelos disponíveis na ALLEVI 2 do Instituto de Química, pistões e tampões fixados em um suporte e anexada ao punho do robô para a bioimpressão, a Figura 28 apresenta um modelo de seringa utilizada na bioimpressora ALLEVI 2, que será implementada no punho do robô.

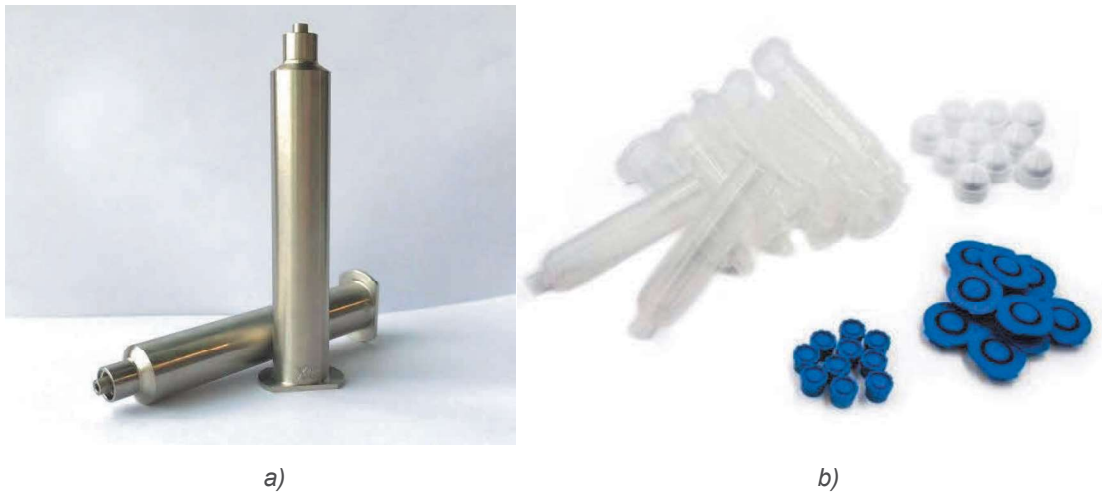


Figura 28: Seringas 5 CC (a) e 10 CC (b). Imagem: (a) Advanced Solutions; (b) Allevi, 2019.

As seringas ou barris como são conhecidas, podem ser fabricadas em material plástico para aplicação em temperatura ambiente ou metálica, para aplicação em alta temperatura.

Além das seringas ideais para fixar no suporte, temos também a escolha adequada da ponta da agulha de acordo com a biotinta usada, os modelos de agulha variam seus comprimentos entre 6,35 e 12,7 mm, variando o diâmetro de extrusão de acordo com o biomaterial a ser utilizada na bioimpressão, o diâmetro das seringas é dado por seu calibre (*gauge*), a imagem 29 apresenta o modelo de agulha utilizada na proposta.

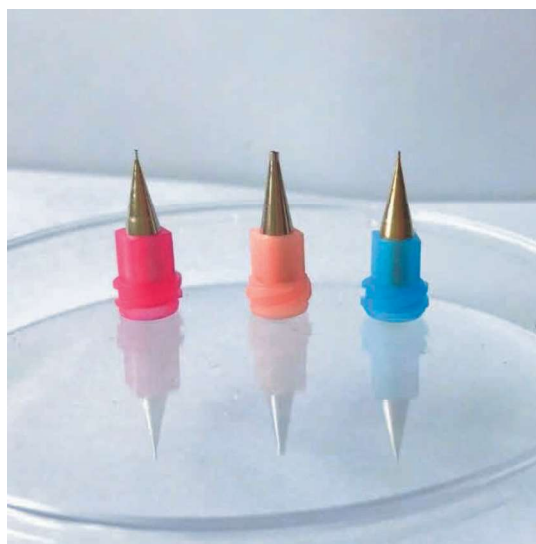


Figura 29: Tipos de agulhas. Imagem: Allevi, 2019.

A proposta foi elaborada no conceito de robô colaborativo, para simulação e método comparativo utilizaremos os três modelos citados acima.

A Figura 30 apresenta o robô colaborativo da empresa KUKA, modelo LBR iiWA, com capacidade de carga entre 7 – 14 kg e raio de alcance entre 800 – 820 mm.

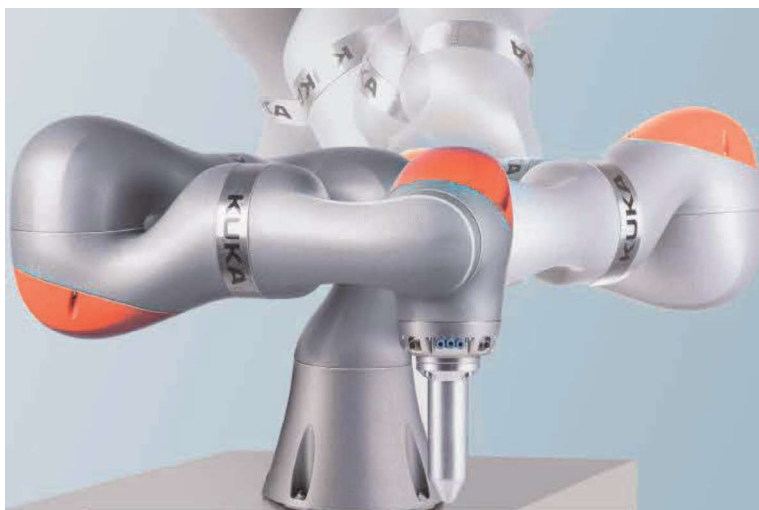


Figura 30: LBR iiWA. Imagem: KUKA AG, 2019.

O modelo apresentado acima possui suprimento de energia para os componentes externos, toda parte de cabeamento fica escondido dentro da estrutura cinemática do robô, existem dois tipos de flanges disponíveis para suprir o fornecimento de energia do robô:

- Pneumático – possui duas saídas de ar com diâmetro de 4 mm, duas saídas elétricas 1 mm² e cabeamento compatível com Ethernet;
- Elétrico – possui três fios par trançado (AWG28), quatro saídas elétricas 1 mm² e cabeamento compatível com Ethernet.

Todos os flanges de mídia possuem padrão de furo em conformidade com a DIN ISO 9409-1-50-7-M6.

A Figura 31 apresenta o robô colaborativo da empresa Universal Robots, modelo UR5e, com capacidade de carga útil de 5 kg e raio de alcance de 850 mm.



Figura 31: UR5e. Imagem: Universal Robots, 2019.

O modelo UR5e não possui um sistema de proteção de cabos, sendo necessário colocá-los externamente, o modelo possui flange compatíveis para as mais variadas aplicações industriais, desde movimentação, colagem e medição de peças, até usinagem.

A Figura 32 apresenta o modelo TX2-60 da empresa Stäubli, possui uma carga útil de 4,5 kg e um raio de alcance de 670 mm, dentre os modelos apresentados o TX2-60 é que tem o maior peso, 51 kg.



Figura 32: TX2-60. Imagem: Stäubli, 2019.

O modelo TX2-60 diferentemente do modelo iiWA 7, não possui um sistema de locomoção autônoma, em relação ao modelo UR5e, ambos permitem a inserção de um 7 eixo fixado ao solo.

Outro componente importante para alcançar o objetivo proposto, será a escolha do *software* utilizado na prototipagem digital e desenho dos modelos 3D. A Figura 33 apresenta o TSIM, um *software* proprietário da empresa Advanced Solutions, além do *software* gratuito InVesalius.

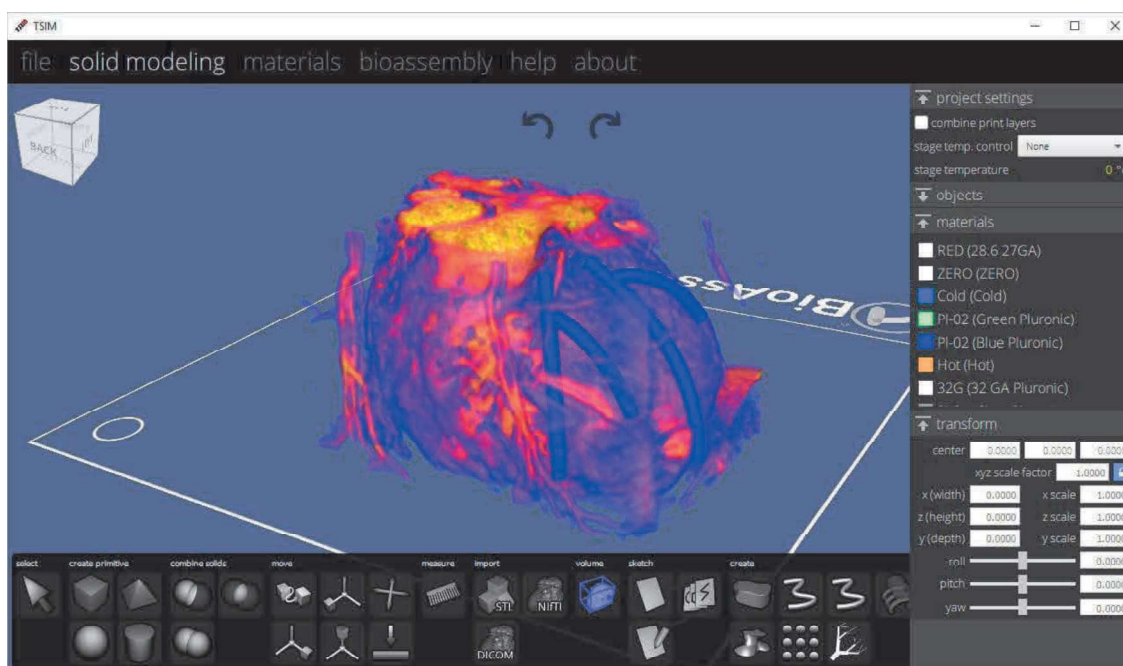


Figura 33: Software de modelagem e análise. Imagem: Advanced Solutions, 2019.

4.3 Métodos

Os métodos aplicados seguirão quatro etapas, a primeira etapa é concepção do produto, onde temos: a ideia inicial; requisitos necessários; design industrial; e viabilidade. Durante a primeira etapa foram analisados os seguintes requisitos, tipos de robôs colaborativos, envelope de trabalho e custos de implementação em relação a bioimpressoras 3D disponíveis, para verificar a viabilidade.

Na segunda etapa foi pensado em um modelo CAD ideal, onde verificou-se: o design final; montagens; e funcionamento. Nesta etapa será elaborado o modelo CAD 3D do suporte para seringas, que será implementado no punho do

manipulador, a ligação do suporte ao punho e a simulação de movimentos do manipulador robótico, para conferir o seu funcionamento.

A terceira etapa é a validação, onde será possível validar o modelo proposto através de simulação em ambiente virtual, esgotando todas as possibilidades para posterior validação em um protótipo físico, a validação faz-se necessário para simular os possíveis desvios e a qualidade do modelo proposto, evitando custos desnecessários com desvios futuros.

A última etapa será a fabricação do produto, por se tratar de um projeto teórico a fabricação poderá ser realizada em um projeto futuro após a confirmação da viabilidade do produto e o desenvolvimento de todo ferramental necessário.

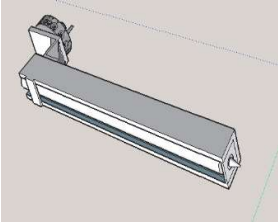
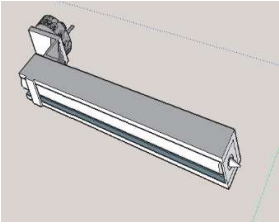
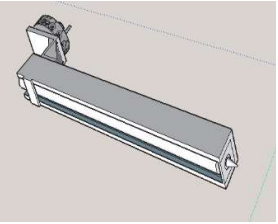
Para obtenção do resultado esperado, o projeto baseia-se no método Taguchi/Projeto Robusto, que pode ser entendido por uma nova abordagem da qualidade voltada para o projeto do produto e do processo. Taguchi desenvolveu a técnica e denominou como controle de qualidade *off-line* (FERREIRA; SIQUEIRA, 2001). O método Taguchi será essencial para definir os possíveis “ruídos” durante os estágios de desenvolvimento do protótipo.

A qualidade pode ser medida pelo desvio que uma característica funcional apresenta em função ao valor da mesma, fatores tratados tais como, por exemplo:

- Ruído – temperatura, umidade, poeira, deterioração, entre outros fatores – causam tais desvios e resultam na perda da qualidade dos produtos, causando prejuízo ao processo, podendo ser avaliado através de uma função de perda, inicialmente proposta por Taguchi (PAREDES, 2017).

O Quadro 2 apresenta um método comparativo entre os robôs, adaptador; suas vantagens e desvantagens do projeto proposto. O Quadro 3 apresenta uma comparação entre os robôs e as bioimpressoras 3D, comparando seus preços e envelope de trabalho.

Quadro 2: Método comparativo. Fonte: Autor.

Modelo	Robô	Adaptador	Seringa	Vantagens	Desvantagens	Preço
KUKA iiWA 7				Envelope de trabalho 800 mm; Capacidade de carga útil entre 7 e 14 kg; Mobilidade; Flexibilidade de trabalho; Repetibilidade +/- 0,1 mm.	Custo de aquisição	Entre US \$ 50K a US \$100K
UR5e				Envelope de trabalho 850 mm; Capacidade de carga útil 5 kg; Mobilidade; Flexibilidade de trabalho; Repetibilidade 0,1 mm a 0,0039 mm.	Custo de aquisição	Custo estimado em US \$46K
TX2-60				Envelope de trabalho 670 mm; Capacidade de carga útil de 3,5 a 9 kg; Flexibilidade de trabalho; Repetibilidade +/- 0,02 mm.	Custo de Aquisição; Baixa mobilidade, equipamento com 51,4 kg.	Custo estimado em US \$18K

Quadro 3: Robô versus bioimpressora 3D. Fonte: Autor.

Robô	Vantagens	Desvantagens	Bioimpressora	Vantagens	Desvantagens
	Envelope de trabalho 800 mm; Capacidade de carga útil entre 7 e 14 kg; Mobilidade; Flexibilidade de trabalho; Repetibilidade +/- 0,1 mm.	Custo de aquisição		Permite a impressão de tecido humano, alta precisão	Custo de aquisição US \$18K; Envelope de trabalho.
	Envelope de trabalho 850 mm; Capacidade de carga útil 5 kg; Mobilidade; Flexibilidade de trabalho; Repetibilidade 0,1 mm a 0,0039 mm.	Custo de aquisição	BIOASSEMBLYBOT 	Permite a impressão de tecido humano, alta precisão	Custo de aquisição US \$160K; Envelope de trabalho.
	Envelope de trabalho 670 mm; Capacidade de carga útil de 3,5 a 9 kg; Flexibilidade de trabalho; Repetibilidade +/- 0,02 mm.	Custo de Aquisição; Baixa mobilidade, equipamento com 51,4 kg	Allevi 6 	Custo de Aquisição US \$10K; Precisão; Permite imprimir células orgânicas.	Envelope de trabalho.

Os valores utilizados como referência em ambas planilhas, foram adquiridos no site Cobotsguide para comparação de tecnologias emergentes.

Abaixo temos uma ideia de como será a bioimpressão 3D proposta, a Figura 34 apresenta a entrada com o biomaterial PCL com fosfato de cálcio desenvolvido no IQ de Araraquara, a bioimpressão por extrusão e a saída com o arcabouço finalizado.



Figura 34: Impressão PCL. Imagem: Roque, 2019.

Os três robôs utilizados para comparação, foram escolhidos por representarem as necessidades de colaboração para o projeto, entretanto existem vários outros fabricantes e modelos que podem em um eventual desenvolvimento suprir as necessidades do projeto.

Em relação as alturas das camadas para a bioimpressão, ficam definidas como objetivo e padrão as especificações aplicadas por Roque (2019, p.41), onde ficaram estabelecidos os diâmetros dos bicos extrusores e suas respectivas alturas de camada para o biomaterial desenvolvido, a Tabela a seguir exibe os valores especificados.

Tabela 1: Bico de extrusão, diâmetro e altura da camada (mm).

Bico de extrusão	Diâmetro (mm)	Altura da Camada (mm)
19 Gauge	0,912	0,9
25 Gauge	0,455	0,4
27 Gauge	0,360	0,3
30 Gauge	0,255	0,2

Fonte: Adaptado de Roque, 2019.

Com a combinação de bico extrusor e biomaterial adequado, foram possíveis a impressão do arcabouço na bioimpressora ALLEVI 2 do IQ UNESP, entre os testes realizados encontram-se os diferentes tipos de biomateriais (polímeros), tais como: PCL; Alginato; PLGA; *Pluronic® F127* e PEG-PCL. Durante os testes, biocerâmicas foram utilizadas, tais como: ACP, OCP, Hidroxiapatita e β -TCP (ROQUE, 2019).

A condição ideal para a bioimpressão durante os testes realizados por Roque (2019), no laboratório de bioimpressão do IQ UNESP, foram alcançadas com a combinação de altura da camada, velocidade do cabeçote e liga do biomaterial, após vários testes, o resultado foi alcançado, proporcionando uma viscosidade ideal para bioimpressão do arcabouço.

Após a definição e bioimpressão do arcabouço ideal, foi realizado um ensaio mecânico, onde pode-se observar na Figura 35 a curva de tensão x deformação.

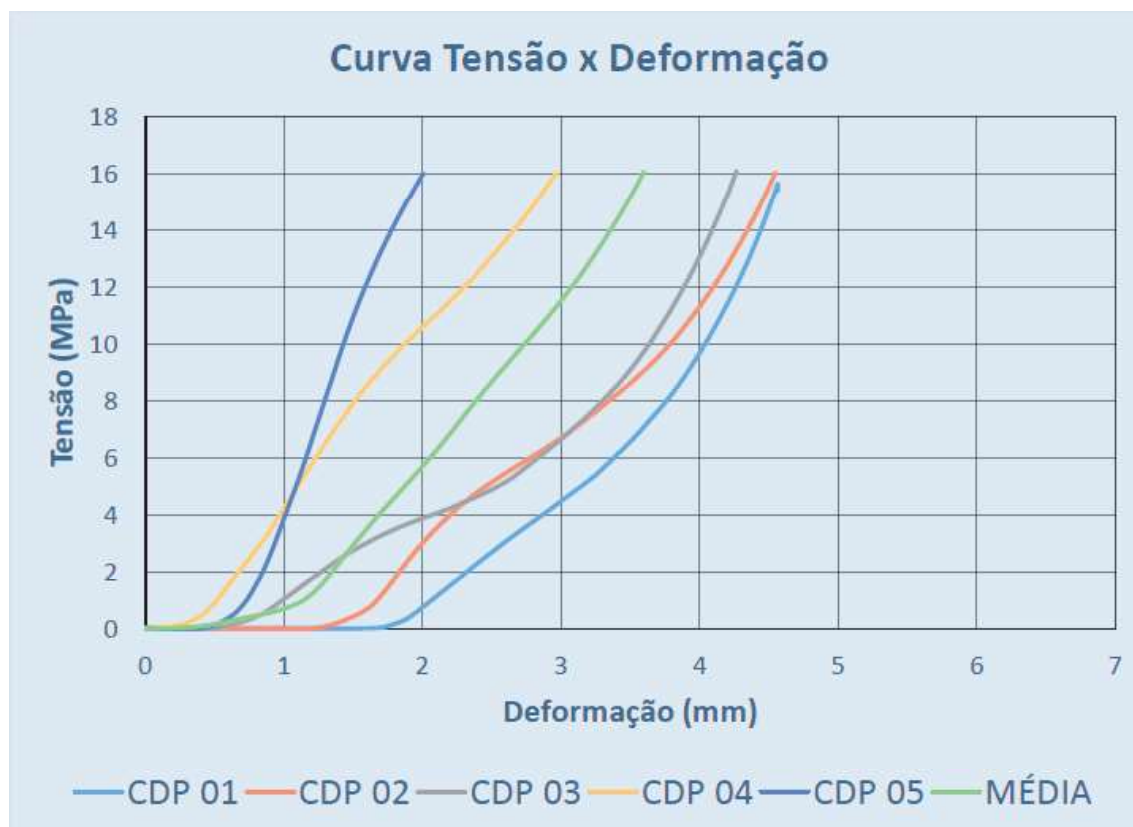


Figura 35: Ensaio mecânico. Imagem: Roque, 2019.

O ensaio foi realizado por Roque (2019), utilizando a máquina universal EMIC DL 2000, seguindo a norma ASTM F2150-13. A carga e velocidade de compressão utilizadas foram respectivamente, 5 KN e $1,3 \pm 0,3$ mm/min. Sendo utilizado o software Tesc (Test Script) EMIC versão 3.04, mesmo fabricante da máquina utilizada.

Após os testes no laboratório o biomaterial que apresentou melhor característica para bioimpressão na ALLEVI 2, foi o PCL + ACP (ROQUE, 2019, p. 41).

Os parâmetros utilizados por Roque (2019) para a bioimpressão na ALLEVI 2, serão adotados como padrão para o biomaterial desenvolvido pelo o IQ UNESP em um possível desenvolvimento do protótipo do robô colaborativo para bioimpressão, podendo este sofrer alterações futuras. Entre os parâmetros testados estão a pressão, que variou entre 100 a 130 PSI e a variação da velocidade de impressão, que foi de 1 a 5 mm/s, obtendo como resultado a pressão ajustada em 125 PSI e uma velocidade de impressão de 2 mm/s.

O Corpo de Prova – CDP 2 foi o que apresentou os parâmetros ideais para bioimpressão na ALLEVI 2.

A Tabela a seguir apresenta os parâmetros ideais definidos por Roque (2019).

Tabela 2: Parâmetros ideais para bioimpressão

Parâmetros de fatiamento do modelo	
Altura das camadas	0,7 mm
Altura da 1ª camada	0,6 mm
Diâmetro do bico	19 Gauge
Velocidade de impressão	2 mm/s
Velocidade da 1ª camada	1,5 mm/s
Parâmetros de processamento da impressão	
Temperatura	110 °C
Pressão	125 PSI

Fonte: Adaptado de Roque, 2019.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Proposta de Integração

Aqui serão apresentados os dados referentes à escolha do robô colaborativo que melhor se enquadra nas necessidades do projeto, fazendo uma análise entre os resultados obtidos com o trabalho entre os modelos disponíveis no mercado e o modelo proposto, os itens avaliados foram valor de aquisição, envelope de trabalho, repetibilidade, mobilidade e carga útil.

Para o modelo de robô selecionado, será necessário implementar as seringas através do adaptador em seu efetuator, existem duas propostas de seringas para o projeto, o primeiro é a utilização das seringas de um modelo similar ao do *BioAssemblyBot*®, a segunda é a utilização de uma seringa única, com a extrusão realizada por mangueiras, onde o material ficará armazenado e será extrudado de acordo com a necessidade de uso. A segunda opção seria viável para fabricação de arcabouços maiores, onde um volume maior de material a ser utilizado fique reservado de maneira segura, seguindo todas as normas de biossegurança indicadas para a Biofabricação.

Durante as pesquisas para elaboração do presente trabalho, o modelo *BioAssemblyBot*® da empresa Advanced Solutions, foi o modelo robótico utilizado atualmente para bioimpressão que melhor se adequa ao projeto de bioimpressão proposto neste trabalho, porém sua capacidade máxima de construção de arcabouços é limitada em 250 x 300 x 250 mm, com um preço médio de US\$ 159,990, um outro modelo da mesma fabricante, o *BIOBOT*™ BASIC, área útil 190 x 190 x 100 mm, tem um preço médio de US\$ 4,995, ambos modelos possuem tecnologia para impressão de materiais com células vivas orgânicas (ANIWAA, 2019), um ponto interessante do *BioAssemblyBot*® é o fato dele possuir seu próprio *software* CAD TSIM (*Tissue Structure Information Manager*, em português Gerenciador de Informações de Estrutura de Tecidos) (SHER, 2014) (GILPIN; HINER, 2014), o que torna o seu sistema de biofabricação mais atrativo, uma vez que adquirindo o *BioAssemblyBot*® não seria necessário comprar a licença do *software* CAD para modelagem.

5.2 Análise dos resultados

Após análise dos dados dos Quadros 2 e 3, chegou-se à escolha do robô colaborativo da Universal Robots UR5e, lembrando que existem uma extensa gama de fabricantes de robôs colaborativos, podendo em um eventual desenvolvimento do projeto realizar a escolha de outro modelo de robô colaborativo.

O UR5e possui um envelope de trabalho 850 mm – sendo o maior entre os modelos selecionados, com capacidade de carga útil 5 kg, maior mobilidade em relação ao modelo TX2-60, assim como o modelo iiWA7 da empresa KUKA também possui uma ótima flexibilidade de trabalho e a repetibilidade do UR5e é 0,1 mm a 0,0039 mm.

Quando comparado os valores o modelo TX2-60 tem um melhor custo de aquisição, entretanto trata-se de um modelo com finalidades industriais, o que elevaria seu custo de aquisição para viabilizar o projeto e torná-lo em um modelo colaborativo, já o modelo iiWA7 tem um elevado custo de aquisição, o que inviabiliza sua escolha para o projeto, tornando o modelo UR5e o melhor custo benefício entre os três modelos selecionados.

5.2.1 Estudo de viabilidade

Para cálculo de VP, VPL, TIR e Payback, utiliza-se funções da planilha Excel, através de simulação de investimento da Tabela 3, pode-se observar em quanto tempo o investimento se paga, o payback pode ser encontrado através da fórmula:

$$PB = \left(\frac{\text{Investimento inicial}}{\text{saldo médio do fluxo de caixa}} \right) \quad (1)$$

Tabela 3: Itens para Investimento e valores em R\$

Itens – Investimento/Implementação	Valores em R\$
Robô	173.880,00
Efetuator	10.000,00
Periféricos/outros	5.000,00
Integração	3.000,00

Fonte: Autor

Já os valores de VP, VPL e TIR são apresentados na Tabela 3, os valores utilizados fazem referências ao robô UR5e do Quadro 2.

O investimento inicial se dará pela soma dos valores da Tabela 2, para simulação usaremos uma taxa de desconto de 10%.

Quadro 4: Investimento inicial e taxa de desconto. Fonte: Autor

Investimento Inicial	R\$191.880,00
Taxa de desconto	10%

Os valores do fluxo de caixa são simulados, com base nos valores de simulação disponíveis no site da Fersiltec (2019), uma vez que a UNESP é uma instituição de ensino público e não tem fins lucrativos.

Tabela 4: Cálculo VP e VP Acumulado em R\$

Período (Ano)	Fluxo de Caixa	Valor Presente	VP Acumulado
0	-191.880,00	-191.880,00	-191.880,00
1	40.000,00	36.363,64	-155.516,36
2	60.000,00	49.586,78	-105.929,59
3	70.000,00	52.592,04	-53.337,55
4	90.000,00	61.471,21	8.133,66
5	100.000,00	62.092,13	70.225,79

Fonte: Autor

Através dos valores simulados na Tabela 4, são apresentados no Quadro 5 os resultados com as somas dos VPs, VPL, TIR, Taxa de Lucratividade e Payback.

Quadro 5: VPs, VPL, TIR, Taxa de Lucratividade e Payback. Fonte: Autor

Soma VPs	R\$262.105,79
VPL	R\$2.211,83
TIR	10%
Taxa de lucratividade	1,37
Payback	3,87 – aprox. 3 anos e 11

Para saber se o investimento terá um retorno, pode-se utilizar a métrica ROI (*Return On Investment*, em português Retorno Sobre Investimento), o ROI é utilizado para apresentar o desempenho de um investimento, desta forma é possível saber quando um investimento apresenta um ganho ou perda, o ROI pode ser obtido através da fórmula:

$$ROI = \left(\frac{\text{Ganhos do investimento} - \text{Custos do investimento}}{\text{Custos do investimento}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Aplicando valores na fórmula ROI, temos:

$$ROI = \left(\frac{262.105,79 - 191.880,00}{191.880,00} \right) \times 100 \quad (3)$$

Temos uma taxa de retorno de 37%.

5.3 Avaliação da integração

A integração do robô colaborativo para bioimpressão, contará com uma equipe multidisciplinar, para isto foi realizada uma visita ao CTI – Renato Archer em janeiro de 2019, onde em conversas com o Coordenador do Grupo de Bioengenharia de Tecnologia da Informação Dr. Pedro Yoshito Noritomi e a pesquisadora Dra. Janaina de Andréa Dernowsek, foi apresentado a ideia para bioimpressão com o uso de robôs colaborativos, sendo possível uma futura parceria entre o CTI e a FCFAR UNESP para desenvolvimento do protótipo, o Dr. Noritomi também deixa em aberto a disponibilidade de treinamentos no CTI para os softwares desenvolvidos no CTI, como por exemplo o InVesalius, que será de grande importância no desenvolvimento do modelo CAD 3D para bioimpressão.

No caso de uma possível parceria entre o CTI e a FCFAR UNESP para o desenvolvimento do protótipo, pode-se utilizar o robô da Stäubli que o CTI possui, reduzindo os custos de desenvolvimento.

Avaliando as possibilidades de bioimpressão para arcabouços, utilizando o robô colaborativo, torna-se um projeto viável quando comparado ao preço de bioimpressoras para arcabouços médios ou grandes, no caso de bioimpressão de

arcabouços pequenos, o desenvolvimento do protótipo torna-se inviável, levando-se em consideração os custos de aquisição do robô colaborativo, desenvolvimento do efetuator e aquisição de softwares para sua programação.

Para alcançar o objetivo de bioimpressão com robô colaborativo, a Figura 36 apresenta o modelo CAD da seringa com o suporte pensado para o protótipo.

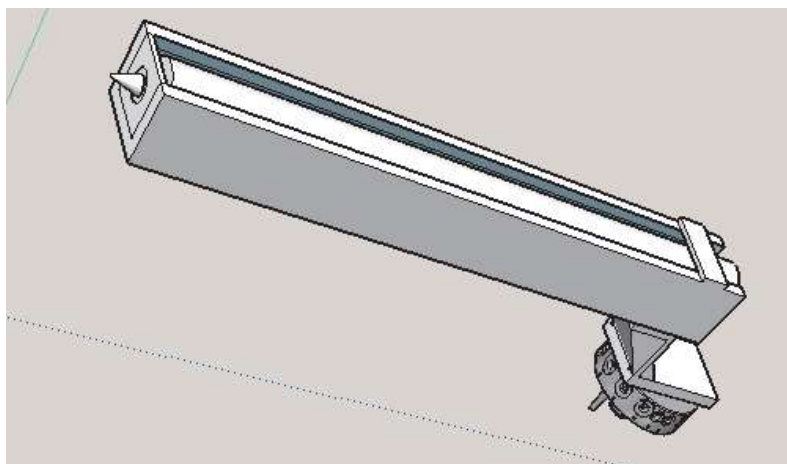


Figura 36: Adaptador. Fonte: Autor.

A Figura 37 apresenta a montagem da seringa, suporte e *tool changer*.

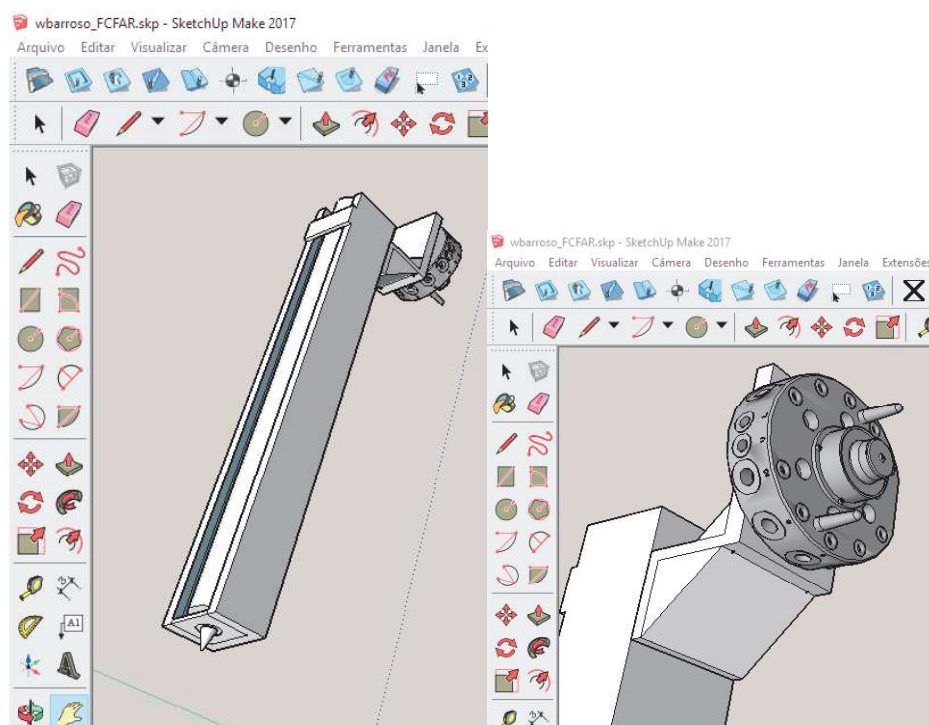


Figura 37: Montagem da seringa, suporte e *tool changer*. Fonte: Autor.

Na Figura 37 é possível ver a ideia para o adaptador do efetuator do robô colaborativo com uma seringa para extrusão do biomaterial e sua estrutura montada no *tool changer* (em português, trocador de ferramentas).

Entre as ferramentas necessárias para simulação da viabilidade de bioimpressão com robô colaborativo, estão os *softwares* Oracle VM Virtual Box – para simulação do robô UR5e, o Stäubli Robotics Suite 7.3.1 – para simulação dos modelos dos robôs da Stäubli, Autodesk Inventor Professional 2018 – para elaboração dos modelos CAD, assim como o SketchUp2017 e o AutoCAD 2018, outro *software* que será necessário para o desenvolvimento é o InVesalius, apresentados na Figura 38.

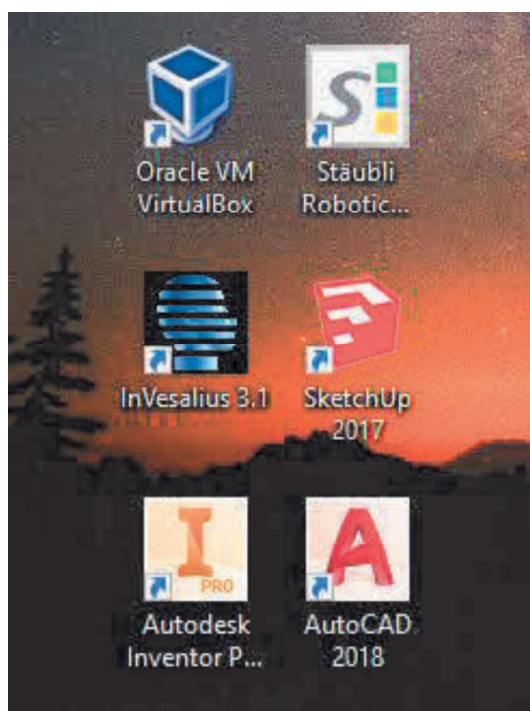


Figura 38: Softwares Utilizados. Fonte: Autor.

A Figura 39 apresenta o *tool changer* para elaboração do adaptador.

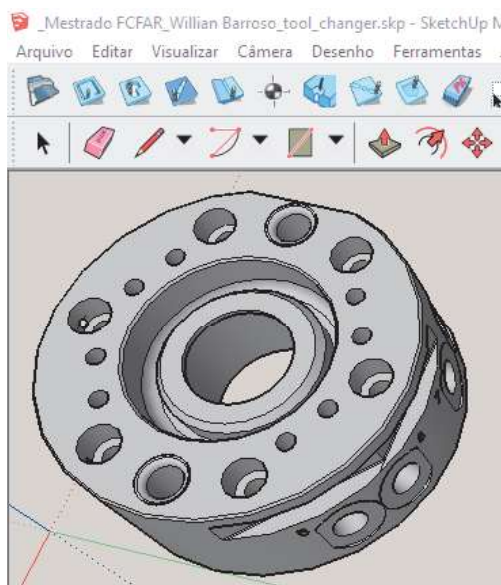


Figura 39: Tool Changer. Fonte: Autor.

Através da máquina virtual é possível realizar a simulação e o treinamento básico dos robôs da Universal Robots, assim como o Stäubli Robotics Suite 7.3.1 permite a simulação e criação de programas por pontos de movimentação em seu simulador.

Na Figura 40 temos a interface de simulação da Stäubli, onde podemos escolher o nome da célula e o modelo do robô.

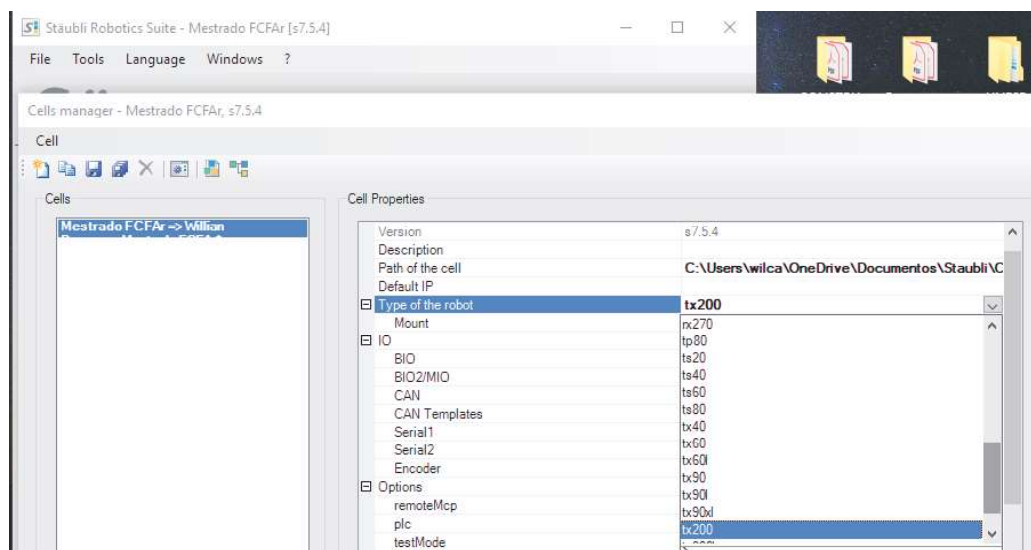


Figura 40: Interface Stäubli. Fonte: Autor.

Para habilitar a simulação na interface da Stäubli, após a escolha do nome da célula e modelo do robô, é necessário habilitar Emulator e 3D Studio, conforme Figura 41, já a Figura 42 apresenta a tela do Emulator e na Figura 43 temos o 3D Studio.

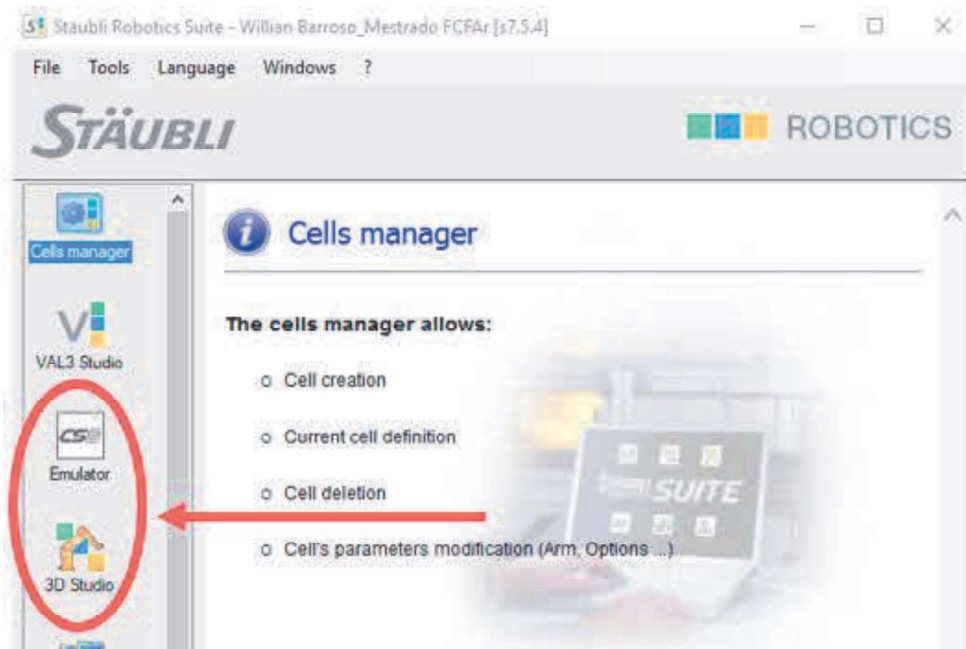


Figura 41: Tela inicial. Fonte: Autor.

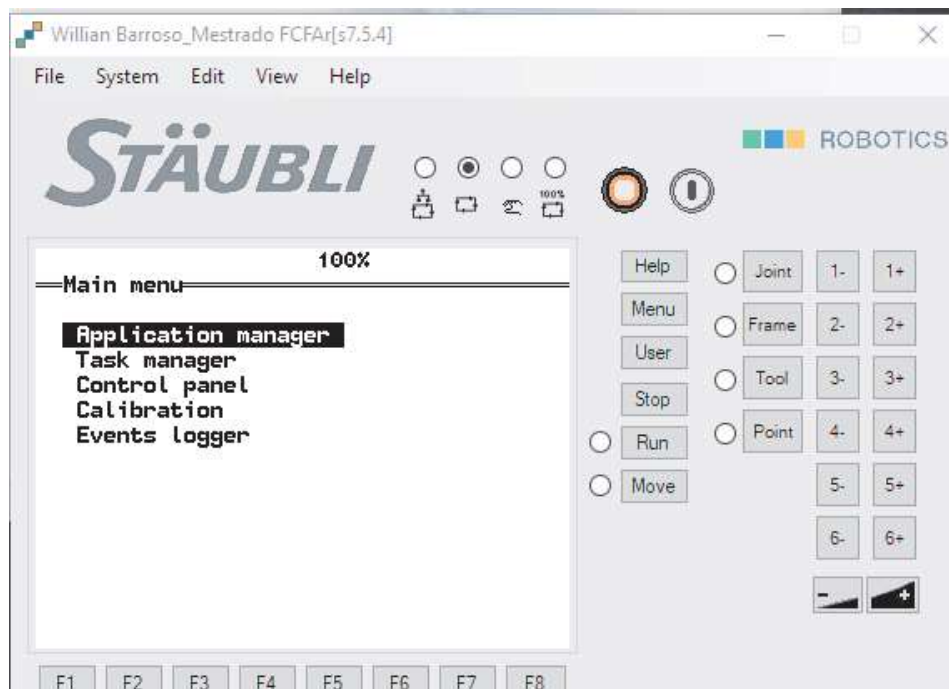


Figura 42: Emulator. Fonte: Autor.

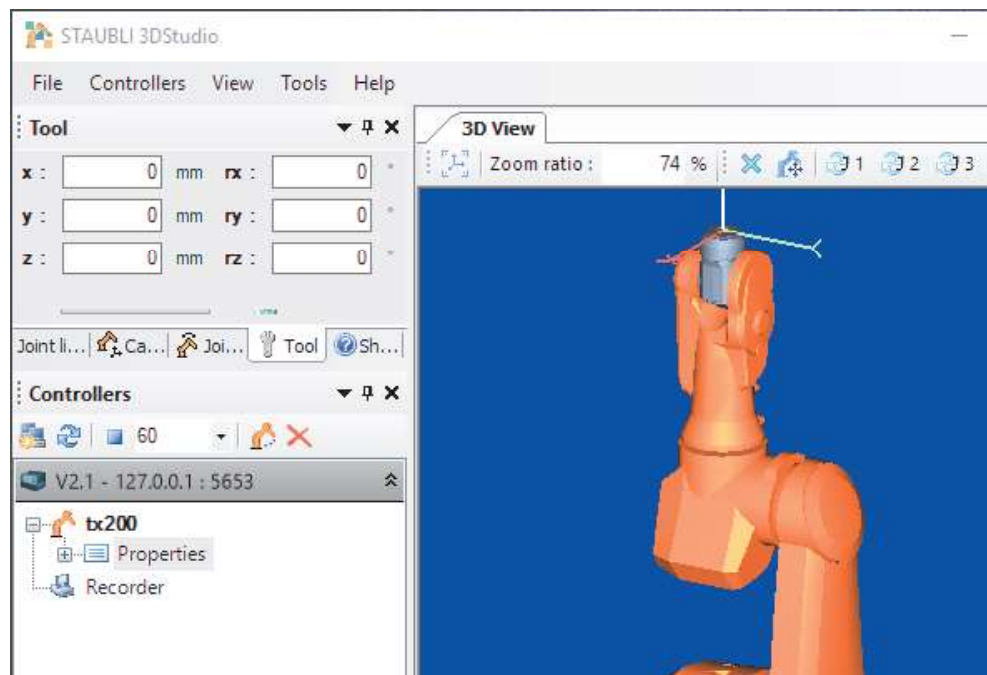


Figura 43: 3D Studio. Fonte: Autor.

Assim como tem a possibilidade de simulação da Stäubli, a Universal Robots também disponibiliza uma máquina virtual para treinamentos. A Figura 44 apresenta a tela de treinamento da Universal Robots, juntamente com o controle de operações do UR5e.

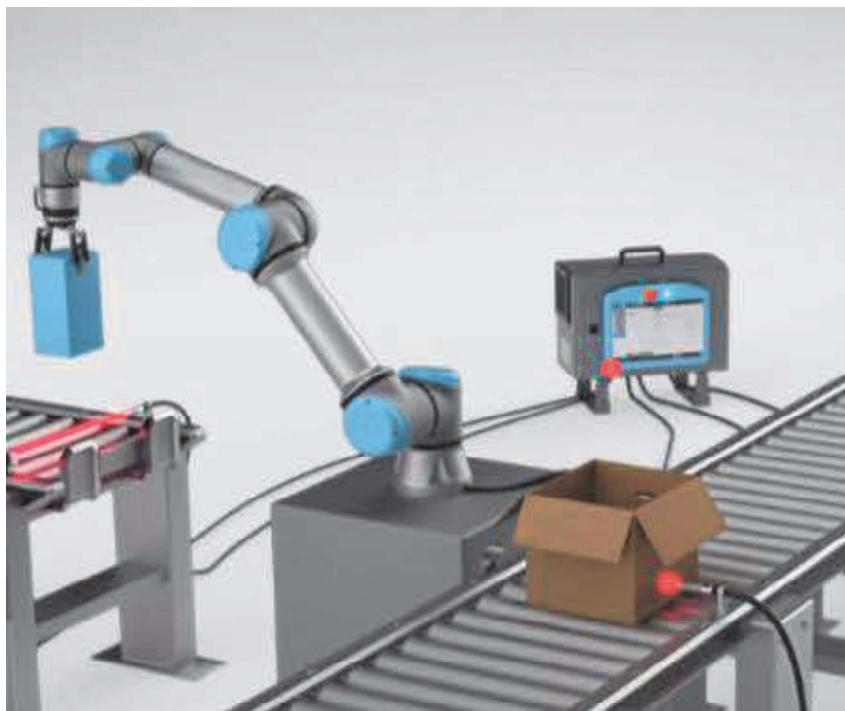


Figura 44: Tela de simulação Ur5e. Fonte: Autor.

A estrutura de simulação e treinamento da Universal Robots, permite a utilização e programação por pontos, conforme pode-se ver na Figura 45.

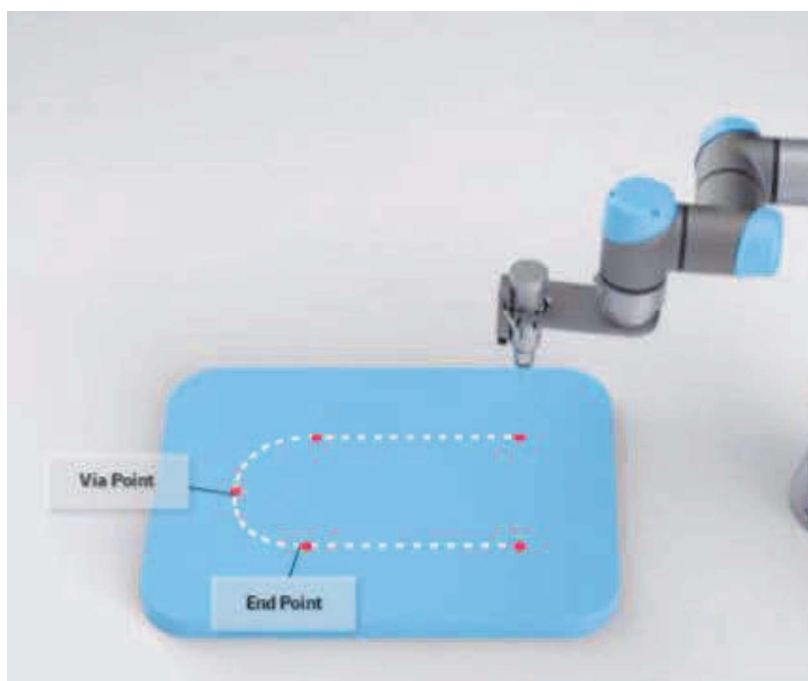


Figura 45: Programação por pontos UR5e. Fonte: Autor.

Todo o processo de simulação dos robôs e confecção de um modelo CAD do Robô UR5e, faz-se necessário para avaliar a integração proposta no projeto.

Após realizada a simulação e elaboração do modelo CAD, foi realizada uma pesquisa para verificar um modelo similar de extrusão de material por meio de robô em escala industrial, uma vez que a empresa Advanced Solutions já possui o BioAssemblyBot®, que é um modelo de célula robótica com 6 eixos para bioimpressão.

As Figuras 46 e 47, apresentam respectivamente, o modelo final do robô colaborativo UR5e com o adaptador e o modelo em escala industrial de extrusão de materiais por meio de célula robótica.

O modelo CAD da Figura 46 é apenas uma ilustração com o conceito/modelo proposto, podendo em um possível desenvolvimento sofrer alterações de acordo com a necessidade de bioimpressão.

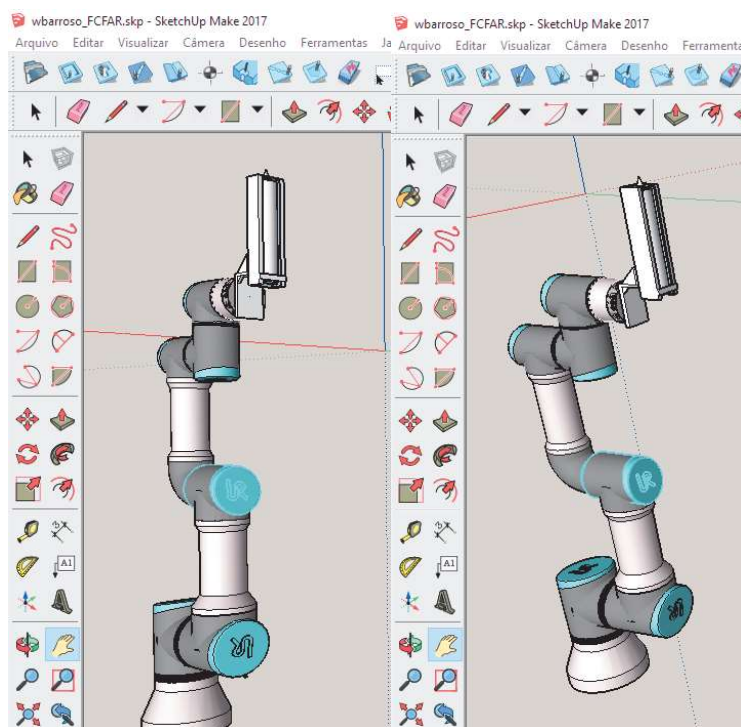


Figura 46: UR5e com o adaptador. Fonte: Autor.



Figura 47: Extrusão de resina. Fonte: Autor.

Empresas dos setores de automação, aeronáutico e até mesmo construção civil, já utilizam células robóticas para fazer usinagem, pintura, soldagem, preenchimento de bordas em painéis sanduíche e fabricação de imóveis – assentamento de blocos e extrusão de argamassa, reduzindo seus custos, reduzindo os riscos de lesões por esforços repetitivos em seus colaboradores.

O equipamento apresentado na Figura 46, foi desenvolvido e implementado pela empresa ZETTATEC (2016) CK no ano de 2013, para suprir a necessidade de uma empresa do setor aeronáutico, onde as operações manuais foram reduzidas, reduzindo o risco de lesão dos operadores (DOCPLAYER, 2013).

Um modelo de célula robótica que utiliza bico extrusor para resinagem de painel sanduíche é apresentado na Figura 46, onde podemos observar a possibilidade de extrudar o biomaterial por manipuladores robóticos, outro ponto importante desta célula robótica é o fato dela realizar usinagem de painéis *honeycomb* – painel sanduíche, geralmente com 5 camadas (PLASCORE, 2019), conforme Figura 48.

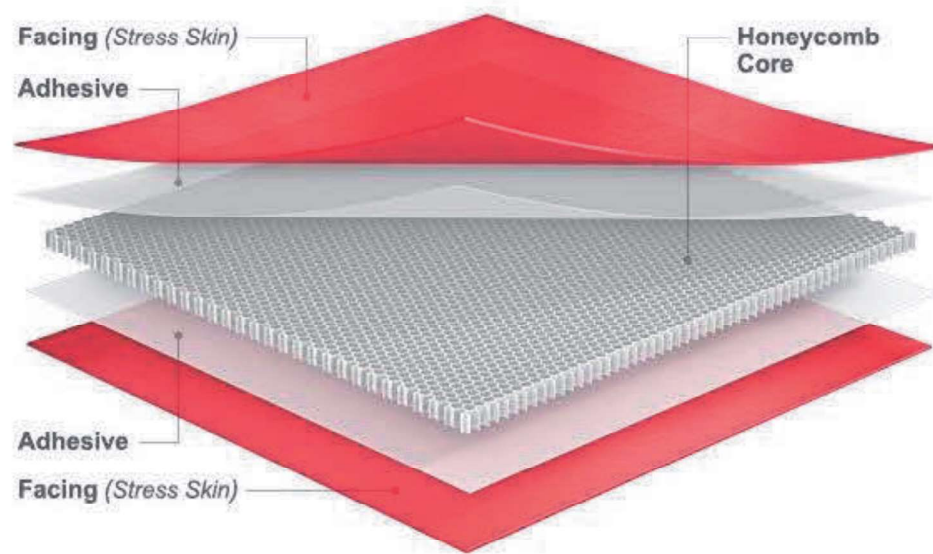


Figura 48: Painel Honeycomb. Fonte: PLASCORE, 2019.

Outro ponto importante desta célula robótica é o fato de a mesma realizar operações de usinagem de painéis sanduiche em alumínio e vibra de vidro, a Figura 49 apresenta o robô TX200 da célula robótica, com 6 eixos, possuindo um sétimo eixo para movimentação do robô.

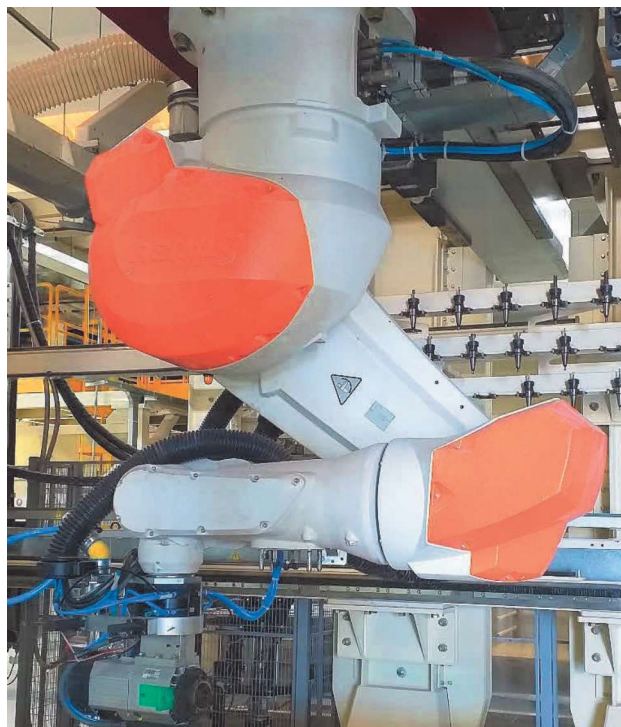


Figura 49: Célula Robótica para usinagem e proteção de bordas. Fonte: Autor.

A Figura 50 apresenta o cabeçote de usinagem utilizado na célula robótica.

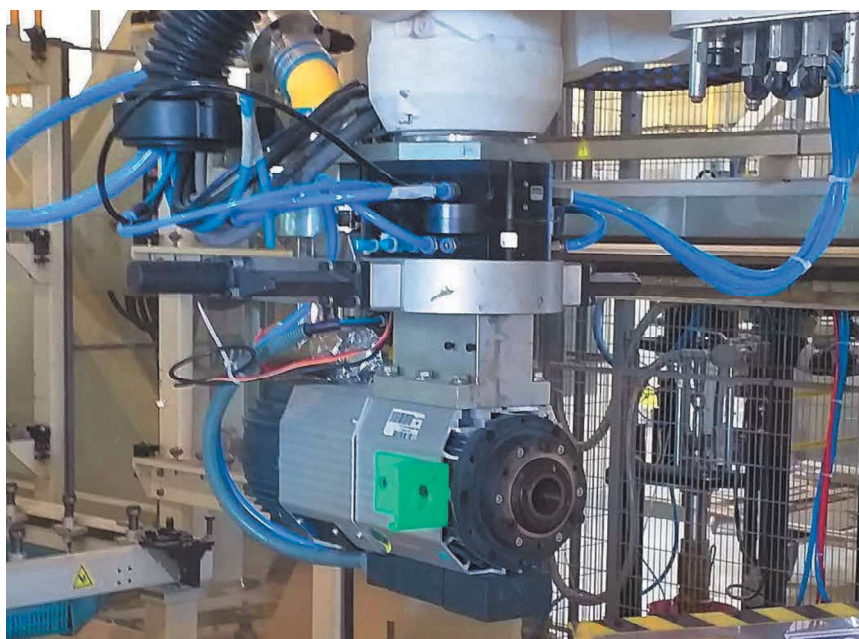


Figura 50: Cabeçote de usinagem. Fonte: Autor.

A Figura 51 apresenta o modelo de extrusor de materiais desenvolvido pela empresa ZETTATECCK, que foi implantado na célula robótica.

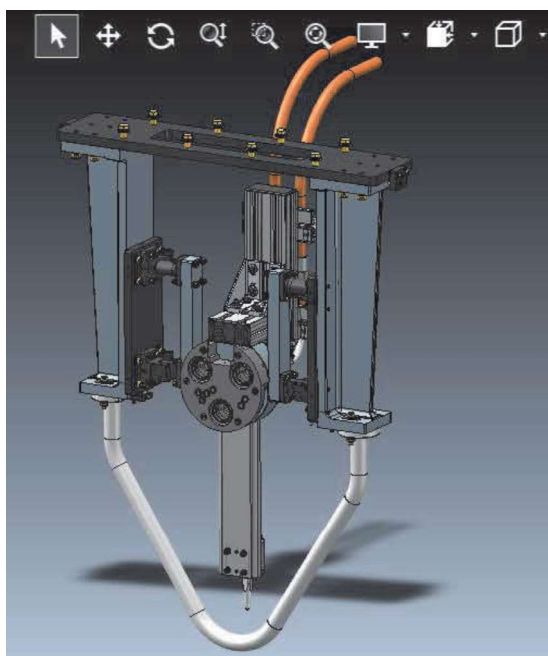


Figura 51: Extrusor. Fonte: ZETTATECCK.

5.4 Discussões

Após análise dos dados adquiridos no decorrer do curso, mostrou-se possível obter um protótipo para bioimpressão 3D com manipulador robótico colaborativo, sua viabilidade financeira é plausível, conforme apresentado no Quadro 5.

Entre os custos para aquisição de um manipulador robótico da Advanced Solutions e as bioimpressoras existentes no mercado, o desenvolvimento de um robô colaborativo para disseminação da bioimpressão de arcabouços, mostra-se relevante o seu investimento em P&D, tanto em instituições de ensino públicas quanto em instituições privadas.

A ideia do robô colaborativo, dar-se-á pelo fato do técnico do laboratório conseguir trabalhar lado a lado com a máquina, algo que não seria possível com um manipulador robótico convencional e pelo valor para adquirir novas bioimpressoras para a impressão de arcabouços maiores, tornando viável a aquisição de um robô colaborativo.

Quando realizada a simulação do VPL e Payback do protótipo percebe-se que a ideia é viável, uma vez que a aquisição do robô colaborativo suprirá as necessidades para bioimpressão de arcabouços maiores, além do fato do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos da Faculdade de Ciências Farmacêuticas UNESP, passar a ser uma referência na área da bioimpressão com robôs colaborativos, podendo aplicar o uso de robôs colaborativos em outras áreas dentro da Engenharia de Biomateriais, Bioprocessos e Bioprodutos.

Entre as opções para o desenvolvimento estão as Parcerias Público-Privadas (PPP), que possibilitam o desenvolvimento do protótipo, as parcerias entre instituições de ensino e pesquisas, assim como a possibilidade de um projeto PIPE – Pesquisa para Inovação na Pequena Empresa da FAPESP ou até mesmo a criação de uma empresa filha da UNESP, para se ter uma ideia do potencial de empresas filhas, pode-se citar a UNICAMP, que possui mais de 485 firmas ativas, gerando mais de 28.000 empregos, com receitas anuais que ultrapassam os R\$ 3 bilhões por ano (FAPESP, 2017).

A criação de um laboratório para P&D de bioimpressão por robôs colaborativos, seria marco na Indústria 4.0 ou Medicina 4.0, abrindo um leque de opções de fabricação sobre demanda e personalizados na biofabricação e bioimpressão 3D.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

As tecnologias disruptivas, estão estimadas com um potencial econômico até 2025 de US\$40.4 trilhões (MANYIKA *et al.*, 2013, p. 12), entre estas tecnologias estão materiais avançados com até US\$500 bilhões, impressão 3D com até US\$600 bilhões e robótica avançada com até US\$4.5 trilhões, que juntas somam 13,86% do total previsto como potencial econômico das tecnologias disruptivas, esses valores representam novos modelos de negócios, modelos estes que vieram e quebraram o padrão, disponibilizando produtos e serviços personalizados, modificando a forma de pensar, investir e consumir das pessoas, suprimindo necessidades específicas do dia a dia.

O trabalho e pesquisa realizado aqui, vem mostrar o potencial econômico da bioimpressão 3D com manipulador robótico colaborativo, pois este nicho de tecnologia possui um potencial em investimentos de US\$5.6 trilhões até 2025, tornando investimento em P&D imprescindíveis para atender essa tecnologia disruptiva na área da Medicina 4.0.

6.1 Conclusão

Esse trabalho apresenta uma análise de viabilidade técnica e financeira para bioimpressão com a utilização de manipuladores robóticos, apresentando a possibilidade de biofabricação e bioimpressão por robôs colaborativos, o objetivo principal foi apresentar as principais tecnologias de impressão 3D, seus respectivos equipamentos, impressoras e materiais, assim como apresentar a possibilidade de implementação do robô colaborativo na bioimpressão, uma vez que o uso desta tecnologia é amplamente utilizada em operações industriais que necessitam de repetibilidade manual do operador, causando perdas nos indicadores de produção e até mesmo causando lesões por esforços repetitivos nos colaboradores.

A integração da extrusora para bioimpressão 3D com os demais acessórios no robô colaborativo, apresenta-se de forma viável e real, uma vez que os avanços da tecnologia de bioimpressão evoluem a todo momento, assim como os novos materiais para bioimpressão, os novos equipamentos pedem passagem para suprir a demanda de produtos cada vez mais evoluídos e fabricados sob medida para atender as necessidades dos clientes, aqui pacientes, que necessitam de enxertos.

O desenvolvimento de novos equipamentos para bioimpressão é necessário para acompanhar o desenvolvimento da indústria em geral, atendendo as expectativas da indústria biomédica, disponibilizando produtos no conceito de Indústria 4.0, onde é possível desenvolver produtos e acompanhar seu processo de fabricação, podendo corrigir possíveis falhas em seu processo produtivo, da mesma maneira, que novos equipamentos substituem processos e entregam produtos melhores, com custo menores e tempos de fabricação menores.

Entre as possibilidades para bioimpressão com o robô colaborativo, estão:

- Implementação de um novo modelo de bioimpressão e novo modelo de negócio;
- Redução nos custos de aquisição de novas bioimpressoras;
- Fabricação sob demanda;
- Fortalecimento da P&D na bioimpressão;
- Criação de um laboratório de excelência em bioimpressão.

Além das possibilidades já citadas, temos também a possibilidade de desenvolvimento de novos softwares para controle de produção, programação e manufatura dos arcabouços, impulsionando o crescimento e a P&D na área de biomateriais, bioprocessos e bioprodutos.

6.2 Trabalhos futuros

Como possíveis trabalhos futuros, estão a criação e implementação no cabeçote de bioimpressão, de um sistema de visão para analisar se o arcabouço fabricado encontra-se dentro do padrão especificado, similar ao proposto por Perruci (2018) e, caso o sistema de visão encontre desvios, pode-se utilizar de um cabeçote para retificar ou usinar a peça com uma fresa de topo ou diamantada, similar ao apresentado por Barbosa e Savazzi (2016).

REFERÊNCIAS

- 3D SYSTEMS INC. **Impressoras 3D Systems**. Nossa História. 2018. Disponível em: <<https://br.3dsystems.com/our-story>>. Acesso em: 27 Novembro 2018.
- 3D SYSTEMS INC. **3D Systems Soluções**. 2018. Disponível em: <<https://br.3dsystems.com/solutions>>. Acesso em: 27 Novembro 2018.
- 3DILLA. **Impressão 3D em Metal**. 2014. Disponível em: <<http://pt.3dilla.com/materiais/metall/>>. Acesso em: 27 Novembro 2018.
- ABREU, M. MURR ELEKTRONIK. O que é Automação Industrial? **Blog Murr Elektronik**, 2017. Disponível em: <<http://blog.murrelektronik.com.br/automacao-industrial/>>. Acesso em: 02 Janeiro 2019.
- ACURA. SOLUÇÕES. **Indústria 4.0**. 2018. Disponível em: <<https://www.acura.com.br/pt/tecnologia/industria-4-0>>. Acesso em: Janeiro out. 2019.
- ADVANCED SOLUTIONS. LIFE SCIENCE. BioAssemblyBot®. **World's first 6-axis robotic arm for agile and Advanced tissue biofabrication**. 2017. Disponível em: <<https://lifesciences.solutions/bioassemblybot/>>. Acesso em: 6 Janeiro 2019.
- AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. ABDI. **Agenda Brasileira para a Indústria 4.0: O Brasil preparado para os desafios do futuro**. 2019. Disponível em: <<http://www.industria40.gov.br/>>. Acesso em: 9 Janeiro 2019.
- ALECRIM, E. 5 exemplos de como a automação faz toda a diferença nas empresas. **Tecnoblog**, 2018. Disponível em: <<https://tecnoblog.net/244245/automacao-solucoes-empresas-exemplos/>>. Acesso em: 6 Janeiro 2019.
- ANIWAA. **BIOASSEMBLYBOT**: Advanced Solutions. 2019. Disponível em: <<https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/advanced-solutions-bioassemblybot/>>. Acesso em: 19 agosto 2019.
- AUTODESK. IMPRESSÃO 3D. **O que é impressão 3D?** 2019. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/solutions/3d-printing>>. Acesso em: 9 Janeiro 2019.
- BARBOSA, G. F.; SAVAZZI, J. O. Influence of cutting tool's angle on milling of composite materials performed by robots. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, São Carlos, v. 13, n.2, p. 226-231, 2016. 226-231.

BIANCHI, R. Robótica. **SCRIBD**, 2005. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/395943533/Robotica-01-a-Historico>>. Acesso em: 6 Janeiro 2019.

CAMMADA. Materiais para impressão 3D. **Entenda como são os materiais para impressão 3D**. 2018. Disponível em: <<https://www.cammada.com/materiais>>. Acesso em: 27 Novembro 2018.

CANALTECH. **Airbus está usando peça feita em impressora 3D na fabricação de aeronaves**. 2017. Disponível em: <<https://canaltech.com.br/produtos/airbus-esta-usando-peca-feita-em-impressora-3d-na-fabricacao-de-aeronaves-100452/>>. Acesso em: 27 Novembro 2018.

CC CORP. **Contour Crafting. Offering Automated Construction of Various Types of Structures**. 2017. Disponível em: <<http://contourcrafting.com/building-construction/>>. Acesso em: 28 Novembro 2018.

CANAL CIÊNCIA. Portal Divulgação Científica e Tecnológica. **Impressão 3D de órgãos humanos: uma realidade cada vez mais próxima**. 2011. Disponível em: <http://www.canalciencia.ibict.br/pesquisa/0281_Impressao_3D_de_orgaos_humanos.html>. Acesso em: 26 Dezembro 2018.

COBOTSGUIDE. MEET THE COBOTS. **Cobot Comparison Chart**. 2019. Disponível em: <<https://cobotsguide.com/cobots/#charts>>. Acesso em: 20 agosto 2019.

CRAIG, J. J. **Introduction to Robotics Mechanics and Control**. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005.

DABAGUE, L. A. M. **O processo de inovação no segmento de impressoras 3d**. 2014. 51 p. Trabalho de conclusão de Curso (Bacharel em Ciências Econômicas) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

DERNOWSEK, J. D. A. **Biofabricação & Bioimpressão**. 2018. Disponível em: <<https://www.biofabricacao.com/bioimpressao-3d>>. Acesso em: 26 Dezembro 2018.

DIRECT INDUSTRY. **Robôs colaborativos**. 2018. Disponível em: <<http://www.directindustry.com/pt/fabricante-industrial/robo-colaborativo-146473.html>>. Acesso em: 6 Janeiro 2019.

DOCPLAYER. DOCPLAYER - Apresentamos-lhe umas ferramentas confortáveis e gratuitas para publicar e compartilhar informações. **Informativo ZETTATECCK**, Ano 3, n. 10, set. 2013. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/6258665-Inicio-13-09->

2006-em-rio-claro-araras-2007-posse-da-cipa-2008-festa-de-fim-de-ano-dos-colaboradores-2009-aniversario-zettatecck-2010.html>. Acesso em: 15 agosto 2019.

DROPLAB. Droplab - Juntos fazemos mais sorrisos. 2019. Disponível em: <<https://droplab.com.br/>>. Acesso em: 11 março 2019.

EDISCIPLINAS. Universidade de São Paulo. Moodle USP. **Introdução aos robôs industriais modelagem geométrica**. 2017. Cap. 1, 6 p. Disponível em: <https://edisiplinas.usp.br/pluginfile.php/4394330/mod_resource/content/1/Teoria%20Cap%201.pdf>. Acesso em: 8 Janeiro 2019.

FAPESP. **Apoio à Pesquisa para Inovação Tecnológica em Pequenas Empresas**. 13 Dezembro 2017. 34 slides. Arquivos do PowerPoint. Disponível em: <http://www.fapesp.br/eventos/2017/pipe-1-2018/PIPE_Dialogo_13-12-2017.pdf>. Acesso em: 15 agosto 2019.

FEIMEC. A VOZ DA INDÚSTRIA. Entenda por que combinar usinagem e manufatura aditiva na indústria. 2018. Disponível em: <<https://avozdaindustria.com.br/entenda-por-que-combinar-usinagem-e-manufatura-aditiva-na-industria/>>. Acesso em: 25 Novembro 2018.

FERNANDES, L. Fluxo Consultoria - UFRJ. 5 Tipos de Impressão 3D e seus Benefícios. **FLUXO. Blog de Engenharia**, 2016. Disponível em: <<http://fluxoconsultoria.poli.ufrj.br/blog/projetos-mecanicos/tipos-de-impressao-3d/>>. Acesso em: 02 Janeiro 2019.

FERREIRA, R. C. R.; SIQUEIRA, J. R. C. **Planejamento e otimização de experimentos via método Taguchi: uma aplicação no processo de cromação de anéis**. Trabalho de conclusão para Diploma. Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Instituto de Engenharia Mecânica, Itajubá, 2001. 9 p.

FERSILTEC AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL. Quanto custa um robô industrial colaborativo não é a pergunta certa. **Blog Fersiltec**, 2019. Disponível em: <<http://fersiltec.com.br/blog/quanto-custa-um-robo-industrial-colaborativo/>>. Acesso em: 20 julho 2019.

FONTES, R. A. M. **Fabrico e Caracterização de Scaffolds à Base de Fosfatos de Cálcio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) 2010. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Disponível em: <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395142134023/disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 02 Janeiro 2019.

GIANNATSIS, J.; DEDOUSSIS, V. Additive fabrication technologies applied to medicine and health care. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, v. 40, p. 116-127, dez. 2007.

GIBSON, I. **Manufacturing Technology for Medical Applications: Reverse Engineering, Software Conversion and Rapid Prototyping**. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.

GILPIN, L.; HINER, J. **3D bioprinter to reproduce human organs, change the face of healthcare**: The inside story. TechRepublic, 1 Agosto 2014.

GROLL, J. et al. A definition of bioinks and their distinction from biomaterial inks. **Biofabrication**, v. 11, n. 1, p.1-6, 23 Novembro 2018. <https://doi.org/10.1088/1758-5090/aaec52>

HOPKINSON, N.; HAGUE, R. J.; DICKENS, P. M. **Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age**. Chichester: John Wiley & Sons, 2006.

INOVA UNICAMP. Agência de Inovação da UNICAMP. 14 Março 2011. Disponível em: <<https://www.inova.unicamp.br/noticia/1722/>>. Acesso em: 26 Dezembro 2018.

KLUG, M. ROBÓTICA (ROB74) – AULA 1. **Introdução a Robótica**. Joinville: IFSC. 2017. 62 p.

LEÃO, L. E3 SERIES CENTER. **Blog de Engenharia Elétrica Moderna - Engenharia Elétrica 80/20**, 2016. Disponível em: <<https://www.e3seriescenter.com/blog-engenharia-eletrica-moderna/cad-cae-e-cam-qual-a-diferenca>>. Acesso em: 27 Novembro 2018.

LI, H.; TAN, C.; LI, L. Review of 3D printable hydrogels and constructs. **Materials and Design**, Nanyang, v. 159, p. 20-38, 2018.

LWT SISTEMAS. **Qual a diferença entre as manufaturas aditiva e subtrativa?** 2018. Disponível em: <<http://www.lwtsistemas.com.br/manufaturas-aditiva-e-subtrativa/>>. Acesso em: 26 Novembro 2018.

MANYIKA, J. et al. **Disruptive technologies**: Advances that will transform life, business, and the global economy, p. 162, Maio 2013. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/our-insights/disruptive-technologies>>.

MAURMANN, N. et al. Matrizes 3D de PCL cobertas por nanofibras de plga para a engenharia de tecidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 13., 2015., NATAL, RN: Anais [...]. 2015. São Carlos: ABPol, 2015. p.

- MOK, S.-W. et al. From the printer: Potential of three-dimensional printing for orthopaedic applications. **Journal of Orthopaedic Translation**, v. 6, p. 42-49, 2016.
- PAREDES, R. S. C. **O Método Taguchi/Projeto robusto**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. Departamento de Engenharia Mecânica Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagem Especiais. 2017. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME714/Projeto%20Robusto.pdf>
- PERRUCCI, M. D. J. **Sistema de visão computacional com microcomputador de baixo**. Faculdade de Tecnologia SENAI Antonio Adolpho Lobbe. São Carlos, 2018. p. 109.
- PIRES, A. L. R.; BIERHALZ, A. C. K.; MORAES, Â. M. Biomateriais: tipos, aplicações e mercado. **Química Nova**, v. 38, n. 7, p. 957-971, 2014.
- PLASCORE. Honeycomb Panels. What is a Honeycomb Panel? 2019. Disponível em: <https://www.plascore.com/honeycomb/honeycomb-panels/>. Acesso em: 16 agosto 2019.
- RENGIER, F. et al. 3D printing based on imaging data: review of medical applications. **International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery**, v. 5, p. 335-341, 2010.
- RIASCOS, L. A. M. **Fundamentos de Robótica**: manipuladores e robôs móveis. São Paulo: Pleiade, 2010. 211 p. ISBN 978.85.7651.158.8. Disponível em: <http://pgene.ufabc.edu.br/docentes/Riascos/ensino/disciplinas/Robotica/FundamentosRobotica.html>. Acesso em: 6 Janeiro 2019.
- ROA, J. P. B. et al. Síntese e caracterização do copolímero poli(3-hidroxibutirato-co- ϵ -caprolactona) a partir de poli (3-hidroxibutirato) e poli(ϵ -caprolactona), São Carlos, **Polímeros**, v. 20, n 3, p. 221-226, 2010.
- ROBOTERIN. O que é um robô colaborativo? 2017. Disponível em: <http://roboterin.com.br/o-que-e-um-robo-colaborativo/>. Acesso em: 6 Janeiro 2019.
- ROMI ADDITIVE MANUFACTURING. ROMI DCM 620-5X HYBRID. Usinagem e Manufatura Aditiva em um único equipamento. 2017. Disponível em: <http://www.romi.com/produtos/romi-hybrid/>. Acesso em: 27 Novembro 2018.
- ROQUE, R. **Biofabricação de scaffolds com fosfatos de cálcio e interconectividade estruturada entre poros**. 2019. Dissertação (Mestrado em Bioprocessos, Biomateriais e Bioprodutos) Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Faculdade de Ciências Farmacêuticas, UNESP, Araraquara. 2019.
- ROSÁRIO, J. M. **Princípios de Mecatrônica**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2005.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos**. São Paulo: Saraiva, 2006.

SHER, D. 3D printed organ evolution continues with bioassemblybot. In: 3D Printing Industry - The Authority on 3D Printing, 2014. Disponível em: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printed-organ-evolution-continues-bioassemblybot-30827>. Acesso em: agosto 2019.

SHIM, J.-H. et al. Bioprinting of a mechanically enhanced three-dimensional dual cell-laden construct for osteochondral tissue engineering using a multi-head tissue/organ building system. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 22, n. 8, 085014, 11p. 2012.

SILVEIRA, C. B. **O que é Automação Industrial**. Citisystems, 2018. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/o-que-e-automacao-industrial/>. Acesso em: 02 Janeiro 2019.

STRATASYS. **ULTEM™ 9085 Resin High-performance FDM PEI thermoplastic**. 2017. Disponível em: <https://www.stratasys.com/materials/search/ultem9085>. Acesso em: 25 Novembro 2018.

TEMPLE, J. P. et al. Engineering anatomically shaped vascularized bone grafts with hASCs and 3D-printed PCL scaffolds. **Journal of Biomedical Materials Research, Part A**, v. 102, n. 12, p. 4317-4325, 2014.

VENTURELLI, M. **Automação Industrial**. O Futuro do Emprego na Indústria 4.0, 4 Junho 2018. Disponível em: <https://www.automacaoindustrial.info/o-futuro-do-emprego-na-industria-4-0/>. Acesso em: 10 Janeiro 2019.

WOLF, B.; SCHOLZE, C. Medicine 4.0. **The role of electronics, information technology and microsystems in modern medicine**, Munique, v. 3, n. 2, p. 183-186, 2017.

ZETTATECCK. ZETTATECCK AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL. 2016. Disponível em: http://www.zettatecck.com.br/#ancora_conteudo. Acesso em: 10 agosto 2019.