
Mapeamento científico e tecnológico sobre Impressão 3D

Scientific and technological mapping on the history of 3D printing technologies

Isabella Sampaio Sampaio, Msc.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5794-1133>

Universidade do Estado da Bahia/Brasil

E-mail: isabellassampaio@gmail.com

Eduardo Manuel de Freitas Jorge, Dr.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8597-5805>

Universidade do Estado da Bahia/Brasil

E-mail: emjorge1974@gmail.com

Mayara Maria Almeida de Jesus, Dr^a.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0838-7436>

Universidade do Estado da Bahia/Brasil

E-mail: mayarajalmeida@gmail.com

Peterson Albuquerque Lobato, Msc.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9990-1818>

Universidade do Estado da Bahia/Brasil

E-mail: peterston.lobato@gmail.com

Aloisio Santos Nascimento Filho, Dr.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5601-8459>

Centro Universitário SENAI/CIMATEC

E-mail: aloisio.nascimento@gmail.com

Marcio Luís Valença, Dr.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2376-0160>

Instituto Federal da Bahia/Brasil

E-mail: maraujo.valenca@gmail.com

Hugo Saba Pereira Cardoso, Dr.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8402-6416>

Universidade do Estado da Bahia/Brasil

E-mail: hugosaba@gmail.com

RESUMO

A Impressão 3D é tida como uma das tecnologias reveladas pela quarta revolução industrial e considerada por muitos autores elemento fundamental nas transformações dos processos produtivos do século XXI. Para além dos ambientes fabris, a Impressão 3D está presente em diversos espaços e nas mais diversas áreas na sociedade global. Esta foi a motivação desta pesquisa, que se debruçou na realização de um mapeamento histórico e tecnológico baseado em informações de publicações científicas e tecnológicas (artigos e patentes) com o objetivo de compreender como é o processo de surgimento e desenvolvimento de tecnologias no processo de inovação. Assim, a partir de uma categorização temporal histórica por décadas, foi possível analisar as interações científicas e tecnológicas com os processos de inovação e desenvolvimento desde a descoberta de fatores que motivaram a invenção dos primeiros processos e equipamentos da manufatura aditiva. Essa investigação, portanto, possibilitou construção de um novo percurso metodológico, definição de cenários importantes sobre a impressão 3D, além de identificação dos principais atores associados à impressão 3D.

Palavras-chave: impressão 3D; Mapeamento Tecnológico; CT & I

ABSTRACT

3D Printing is considered one of the technologies revealed by the fourth industrial revolution and considered by many authors to be a fundamental element in the transformation of production processes in the 21st century. In addition to factory environments, 3D Printing is present in various spaces and in the most diverse areas of global society. This was the motivation of this research, which focused on carrying out a historical and technological mapping based on information from scientific and technological publications (articles and patents) with the aim of understanding how the process of emergence and development of technologies in the innovation process is. Thus, based on a historical temporal categorization by decades, it was possible to analyze scientific and technological interactions with innovation and development processes since the discovery of factors that motivated the invention of the first additive manufacturing processes and equipment. This investigation made possible to build a new methodological path, to define important scenarios about 3D printing, and to identify the main actors associated with 3D printing.

Keywords: 3d printing; Technological Mapping; ST&I

INTRODUÇÃO

No final do século XX, com a chegada da quarta revolução industrial, a inovação começou a ser codificada e compreendida pelos governos como um tema de importância global. Isso ocorreu devido à convergência do conhecimento científico para o avanço do sistema produtivo, especialmente no que diz respeito à modernização das engenharias e das ciências da informação, que se tornaram cada vez mais sofisticadas. Essa sofisticação promoveu uma maior interação entre as tecnologias físicas e as tecnologias digitais (SCHWAB, 2017).

Esse avanço tem causado transformações em toda a esfera da produção industrial em rede, com melhorias nos processos de manufatura, design industrial, produtos, operações e sistemas relacionados. O uso e desenvolvimento de elementos tecnológicos baseados em automação e robótica avançada permitiram a fusão entre as realidades física e virtual, dando origem à Indústria 4.0. À medida que a modernização tecnológica acelera, ocorrem melhorias no ambiente produtivo, criando condições para o surgimento de novas tecnologias derivadas (DELOITTE, 2014).

Este artigo aborda um dos componentes da quarta revolução: a tecnologia de impressão 3D, que possui um potencial inovador em diversas áreas, permitindo novas soluções de produção em diferentes escalas. Essa tecnologia tem a capacidade de transformar processos produtivos, oferecer maior liberdade na modelagem e no design de produtos, além de reduzir os custos de gestão. A revisão de literatura realizada sobre a temática revelou informações diferentes das conhecidas pelo senso comum e uma lacuna a despeito comum relacionadas sobre a origem e evolução das tecnologias que compõem a impressão 3D (FIRJAN, 2016).

A impressão 3D é o conjunto de diversas técnicas que transformam a matéria-prima em um objeto tridimensional, camada por camada, com base em um desenho digital assistido por computador. Sua origem é conhecida como manufatura aditiva e tem o objetivo de otimizar processos produtivos por meio da fabricação de peças de reposição, customização e experimentação. Isso difere da manufatura tradicional, que envolve a remoção de material indesejado de um artefato (RELVAS, 2018).

Além da indústria, a impressão 3D se popularizou na sociedade civil e no mercado doméstico, tornando-se um elemento fundamental para o surgimento da cultura maker. Essa cultura se desenvolve em ambientes de inovação e fabricação digital em universidades, organizações sociais e arranjos produtivos. A impressão 3D também está

presente em espaços compartilhados de fabricação digital, estimulando a criatividade, a aprendizagem e o surgimento de ideias e projetos inovadores. Isso cria uma rede social que conecta os usuários de forma colaborativa. Um exemplo desse ambiente é o projeto "Fab Lab - investigações sobre fabricação digital" desenvolvido no Massachusetts Institute of Technology em 2001 (EYCHENNE; NEVES, 2013).

Neste trabalho, foi realizada uma investigação sobre a impressão 3D, que se revela uma prática com múltiplas potencialidades, com possibilidade de aplicação em vários setores da sociedade e do mercado. Esta foi a motivação desta pesquisa, que se debruçou na realização de um mapeamento histórico e tecnológico baseado em informações de publicações científicas e tecnológicas (artigos e patentes) com o objetivo de compreender como é o processo de surgimento e desenvolvimento de tecnologias no processo de inovação. Ela permite a padronização de processos e produtos e a redução de custos em produções em larga escala.

O mapeamento tecnológico e histórico foi realizado em documentos de patentes e artigos vinculados a bancos de dados técnicos e científicos, demonstrando as inúmeras possibilidades de inovações sociais e tecnológicas que a impressão 3D possui, bem como sua viabilidade nos contextos macroeconômico (transformação da lógica da produção mundial) e microeconômico (uso individual e em pequenos empreendimentos) (DAY, 2011).

A categorização cronológica do estudo em décadas foi realizada para disseminar informações tecnológicas e mercadológicas, a fim de embasar pesquisas futuras e subsidiar a tomada de decisões no contexto de gestão da inteligência competitiva (COELHO, 2003). Além dessa introdução, o artigo aborda uma contextualização sobre a impressão 3D, a apresentação dos procedimentos metodológicos da pesquisa e dos dados obtidos, a discussão dos resultados e considerações finais.

ASPECTOS E CONSIDERAÇÕES SOBRE IMPRESSÃO 3D

e acordo com o Manual de Frascati (2013) a ciência e a tecnologia (C&T) têm o objetivo de aprimorar cada vez mais os conhecimentos de uma sociedade para a promoção do bem-estar socioeconômico pela criação de produtos e de processos originados a partir de as atividades de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) a fim de atender as necessidades humanas e sociais. Deste modo, a pesquisa e o desenvolvimento abrangem o trabalho

criativo e disciplinado com o objetivo de expandir o volume de conhecimento dos indivíduos ou de uma comunidade por meio de novas e sucessivas aplicações.

O conhecimento e a disseminação a respeito impressão 3D têm seus primeiros registros na quarta onda da evolução da indústria. Uma vez que a busca da efetividade dos processos de produção, componentes cada vez mais avançados tecnologicamente se tornam pré-requisitos essenciais nos meios fabris.

A utilização de práticas como sistemas ciber-físico (CSP), internet das coisas (IOT), internet de serviços (IOS), inteligência artificial (AI) e a manufatura aditiva (AM) ou impressão 3d (3DP) que vem sendo desenvolvidos em variadas proporções sensoriais e funcionais, bem como em dimensões macro, micro, nano etc. que permitem o desenvolvimento de fábricas inteligentes pela existência de características como interoperabilidade pela comunicação através das redes; virtualização por meio da utilização de modelos virtuais; descentralização dos controles dos processos produtivos; adaptação da produção em tempo real; orientação a serviços para flexibilidade de adaptação de acordo com as necessidades dos clientes; e sistemas modulares de equipamentos para otimização de alterações necessárias (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015).

Neste contexto, observa-se a utilização e o desenvolvimento de elementos tecnológicos com base na automação e na robótica avançada que permitem a fusão entre as realidades física e virtual formando a base da Indústria 4.0. À medida que acontece a aceleração e modernização tecnológica as melhorias no ambiente produtivo vão sendo aperfeiçoadas gerando condições para o surgimento de outras novas tecnologias derivadas (FIRJAN, 2016). A figura 1 apresenta uma linha do tempo com revoluções industriais e tecnologias até chegar a Indústria 4.0 que tem seu início na década XXI com o surgimento de tecnologias como: Inteligência Artificial, Internet das Coisas, Impressão 3D (alvo desse artigo), Big Data, Robótica Avançada, Sistemas Ciber-Físico e Computação em Nuvem (DELOITTE, 2014).

O desenvolvimento destas tecnologias que integram cada vez mais as realidades física e virtual apresentam também, para além da indústria, a transformação das relações sociais pelo que muitos autores caracterizam pela era da hiperconectividade, da cibercultura e do ciberespaço (LÉVY, 1998), na qual o comportamento e a cosmovisão são pautados pela interação do homem com agentes não humanos que são cada vez mais

autônomos e programados para “agir” e “decidir” de maneira mais ampla, complexa e significativa (BRANCO, 2019).

Figura 1 - Linha do Tempo: Revoluções Industriais e tecnologias da Indústria 4.0



Fonte: Elaborada pelos autores, adaptada do estudo sobre indústria 4.0 (DELOITTE, 2014)

A impressão tridimensional, umas das técnicas envolvidas com a impressão 3D, revela as raízes da manufatura aditiva na prototipagem, na fabricação, na utilização comercial, nas inovações e em outras aplicações trazidas pela tecnologia ao longo do tempo e em diversas áreas do conhecimento (RELVAS, 2018). A impressão tridimensional apresentou seus primeiros sinais a partir da década de setenta com estudos nas áreas da física e da química, principalmente no que se refere à processos de mudança de estado físico da matéria a partir da exposição ao calor da luz, à materialização de objetos a partir de processo de fotografia, bem como do aperfeiçoamento de técnicas de concretização feito por camadas, inspirado em práticas da topografia (MONTEIRO, 2015).

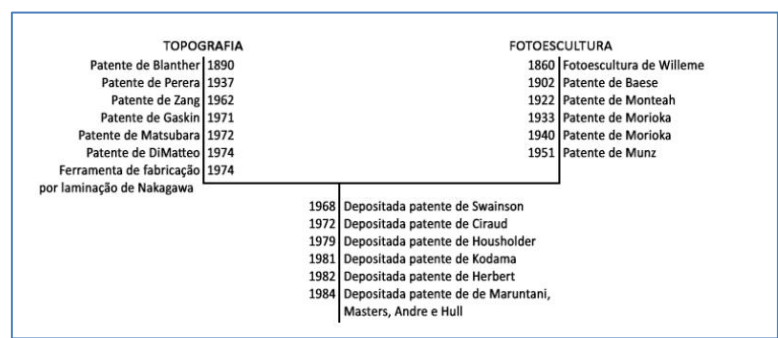
De acordo com Carlos Relvas (2018), os fenômenos e experiências sobre a interação luz-matéria e as respectivas reações físico-químicas em alguns materiais são observados desde a história antiga da humanidade e mais ainda na idade média nomeadamente com alquimistas, assim como outros processos que foram desenvolvidos pela ciência ao longo do tempo, que concatenados, permitiu a criação do que conhecemos atualmente como: Impressão 3D.

Desde meados do século XIX, no que se refere a reprodução tridimensional da imagem de uma pessoa ou objeto, surgiram experimentos relacionados à fotografiação feita por várias câmeras posicionadas de forma a registrar todos os ângulos para

reprodução e criação de uma escultura. Este processo era feito com base na concepção de um modelo tridimensional a partir da associação das silhuetas fotografadas e ficou conhecido como fotoescultura, cujo cientista pioneiro foi François Willème (VIEIRA, 2007). Além disso, técnicas na área da topografia foram desenvolvidas para criação de mapas de terrenos a partir do método de suavização de camadas sobrepostas feitas em cera, papel e outros variados tipos de materiais (MONTEIRO, 2014).

A associação de todas essas tecnologias a partir do final da década de sessenta e início de setenta é sistematizada na publicação: “*A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead.*” de David Bourrell em 2009 com a representação de um diagrama (Figura 2) com os depósitos de patentes dessas áreas e o surgimento de empreendimentos a partir dos resultados destas pesquisas de P,D&I.

Figura 2 - Diagrama com patentes que originaram a impressão 3D



Fonte: (MONTEIRO, 2014).

A origem do que conhecemos atualmente como a manufatura aditiva possui cerca de 50 anos congregados pelos desdobramentos e evolução da topografia e métodos de fotoescultura que em suas particularidades têm registros de mais de um século 3D (SAMPAIO et al., 2022).

Outra informação importante é que a impressão 3D não é somente uma tecnologia, mas um conjunto de tecnologias determinadas pelo processo como são realizadas, pelos métodos de materialização e pelas matérias primas utilizadas (VOLPATO, 2007). Sobre este assunto podemos considerar a afirmação de Sampaio et al (2022, p. 754):

A Impressão 3D abrange variadas técnicas, com utilização de diferentes processos e materiais. O que hoje convencionamos como uma tecnologia, na realidade consiste no conjunto de variadas tecnologias de produção de objetos tridimensionais (MARQUES, 2014) categorizadas na maioria dos casos pela condição do estado físico da matéria utilizada como insumo (PHAM & GAULT, 1998) mesmo com as variantes

apresentadas pelas novas descobertas, invenções e inovações ao longo do tempo.

As tecnologias da impressão 3D possuem uma ampla gama de possibilidades e aplicações, cada uma delas é indicada para um uso específico e podem ser aplicadas em diversas áreas do setor produtivo.

METODOLOGIA

A metodologia para obter informações de publicações científicas e tecnológicas (artigos e patentes) sobre a evolução da Impressão 3D consiste na descrição dos processos de organização e estruturação dos conteúdos e das etapas a serem cumpridas para elaborar e efetuar um estudo. De acordo com Fonseca (2002) e Gil (2008) a pesquisa é um mecanismo racional e sistemático que busca propiciar respostas para problemas.

Para a sistematização do estudo, foi utilizada as técnicas de revisão de literatura por meio da bibliometria, que é a medição de textos e informações (DAIM, et al, 2006), além de alguns outros tipos de estudos métricos derivados como a cientometria e patentometria que associados permitem à análise da contribuição do conhecimento científico em determinadas áreas, bem como observação de características como indicadores de produção científica de um periódico, autor, instituição ou localidade e até mesmo a respeito dos cientistas e suas comunidades. (MEDEIROS, 2015).

A coleta de dados das principais publicações científicas teve o objetivo de analisar o cenário das produções acadêmicas e suas inovações relacionadas a produtos, processos e serviços (OECD-MANUAL DE OSLO, 2005), que correlacionam a utilização da tecnologia de Impressão 3D para observação de tendências e da evolução ao longo dos anos.

É neste cenário que a publicação de artigos científicos e o depósito de patentes desempenham um papel essencial na promoção do avanço científico e tecnológico, pois é através dessas ações que pesquisadores compartilham seus estudos e descobertas, contribuindo para a disseminação do conhecimento e permitindo que outros pesquisadores construam sobre suas descobertas. Isso estimula a colaboração e a troca de ideias, impulsionando a inovação em diferentes partes do mundo (ANTUNES, 2018).

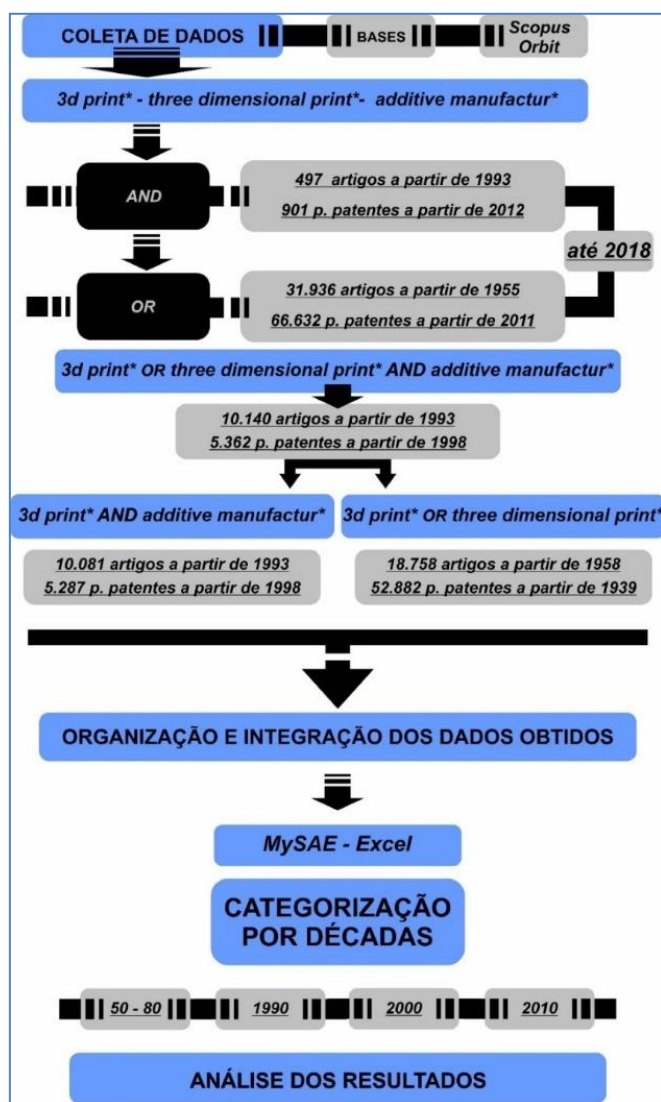
Com o objetivo de contextualizar e compreender o processo histórico de publicações científicas até o ano de 2018 a respeito da tecnologia de impressão 3D. Os

termos utilizados para título, resumo e palavras-chaves foram: *3d print*, *three dimensional print* e *additive manufacture* ligados entre si pelos conectivos AND e pelo OR como será evidenciado no decorrer deste artigo.

A bases utilizadas para busca de documentos foi plataforma internacional de banco de dados Scopus, que abrange publicações em revistas científicas nas áreas de ciências, tecnologia, artes e humanidades (<https://www.scopus.com>). Bem como algumas bases internacionais de patentes (*Patentscope WIPO*, *Orbit Intelligence*, *Google Patents*) que auxiliaram a pesquisa prospectiva e exploratória com base nos resultados da produção do conhecimento acadêmico, científica e tecnológica. Para realização da análise dos dados obtidos através desta verificação foi utilizado os softwares *Semantic Analysis Expert* (*My-SAE*, 2020), que possibilita a extração e filtragem de dados das diversas publicações.

Dessa maneira, a figura 3 de representa de maneira ilustrada o fluxo metodológico percorrido na investigação, construção e estruturação deste estudo será detalhada na próxima seção. O procedimento metodológico abrange desde a etapa de coleta de dados das principais publicações científicas e tecnológicas (artigos e patentes) a fim de cumprir o objetivo de analisar o panorama das produções e suas respectivas inovações relacionadas a produtos, processos e serviços no campo da impressão 3D.

Figura 3 - Síntese do percurso metodológico



Fonte: Elaborado pelos autores

Observa-se que durante todo o processo de investigação, que findou no percurso metodológico supracitado, foram consideradas informações provenientes de artigos e patentes, uma vez que a expressão do conhecimento científico, se concretiza em registros escritos na forma de documentos (SANTOS, 2003) que podem ter sido produzidos pelos mesmos autores e/ou instituições.

Outro ponto é que tanto os artigos científicos quanto as patentes possuem elementos semelhantes em suas estruturas documentais que podem ser correlacionados para uma análise mais precisa do desenvolvimento científico e tecnológico da inovação. A exemplo temos os elementos: autor e instituição de pesquisa para artigos, inventor e titular para patentes.

APRESENTAÇÃO DE DADOS OBTIDOS

No início coleta de artigos e patentes foi utilizado operador booleano "AND" com o objetivo de direcionar os resultados para documentos estritamente relacionados ao tema em estudo. No total 497 artigos com aparições a partir do ano de 1993 e 901 depósitos de patentes publicadas a partir de 2003, ou seja, uma década após o início de publicações de artigos.

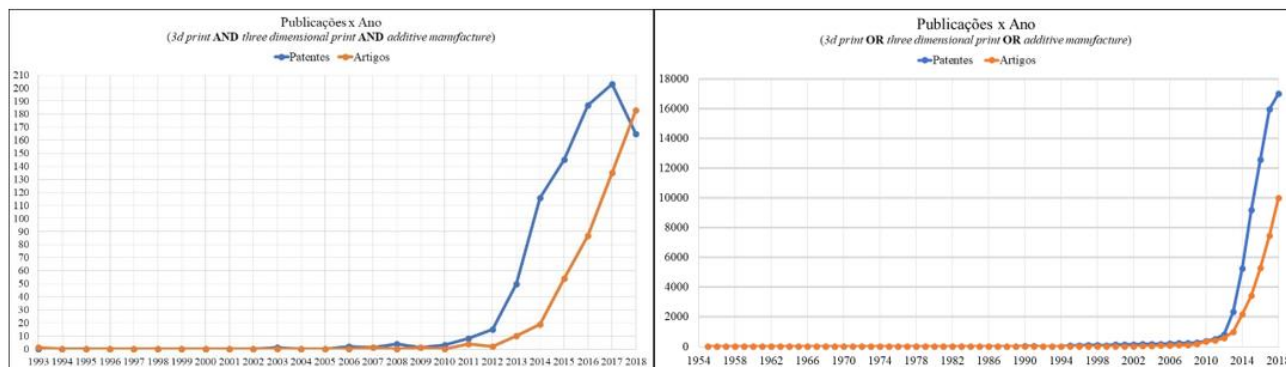
Entretanto os resultados desta busca apresentaram sua primeira ocorrência datada a partir de 1993, o que nos traz um questionamento, já que etimologicamente a impressão 3D tem a descrição de sua origem na década de 80. Os resultados da busca não utilizando "AND" também não revelou publicações científicas anteriores (como artigos e patentes) sobre produtos e métodos relacionados à utilização da impressão 3D.

Tendo em vista os resultados da busca, decidiu-se ampliar o escopo utilizando o operador booleano "OR", com o intuito de encontrar dados e informações que pelo menos estivessem relacionados ao senso comum do processo histórico de criação e desenvolvimento da tecnologia de impressão 3D. Nesta busca, mais abrangente, foi possível encontrar documentos de patentes datados da década de 30 e de artigos da de 50. Já a quantidade de registros totalizou 31.936 artigos e 66.632 depósitos de patentes.

Estas constatações podem ser verificadas na figura 4 que apresenta as publicações distribuídas cronologicamente por anos desde sua primeira ocorrência até o ano de 2018.

Ainda em relação aos gráficos da figura 4, observa-se que as produções localizadas a partir das buscas com os booleanos "AND" refletiu em crescimento a partir do ano 2012 e "OR" com um crescimento a partir dos anos de 2010. Ambos os operadores tiveram uma escalada nas publicações quase que exponenciais, demonstrando o crescente trabalho e interesse da comunidade científica e de inovação em relação ao tema Impressão 3D.

Figura 4 - Apresentação dos gráficos gerados a partir das buscas com os booleanos "AND" e "OR"



Fonte: Elaborado pelos autores, adaptada do estudo sobre impressão 3D (SAMPAIO, 2022)

Além destes usos, os operadores lógicos "AND" e "OR" foram combinados de outras maneiras para que pudesse ser realizada uma confirmação precisa sobre os resultados da busca. Essas combinações podem ser verificadas na figura 5.

Diante desse cenário, a estratégia adotada para análise dos resultados foi a que utilizou o operador "OR", pois permitiu o esclarecimento sobre o surgimento, o desenvolvimento e a evolução da impressão 3D de forma mais completa.

Figure 5 - Escopo da pesquisa para busca de artigos publicados e documentos de patentes

COMBINAÇÃO CONECTORES LÓGICOS		<i>Three dimensional print*</i>	<i>Additive Manufactur*</i>	ARTIGOS PUBLICADOS	PRIMEIRA OCORRÊNCIA DE PUBLICAÇÃO	DEPÓSITOS DE PATENTES	PRIMEIRA OCORRÊNCIA DE PUBLICAÇÃO
(a)	3d print*	AND	AND	497	1993	901	2003
(b)		OR	OR	31.936	1955	66.632	1931
(c)		OR	AND	10.140	1993	4.012	1998
(d)		-	AND	10.081	1993	5.287	1998
(e)		OR	-	27.893	1958	40.308	1939

Fonte: Elaborado pelos autores, adaptada do estudo sobre impressão 3D (SAMPAIO, 2022)

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para análise dos resultados a partir do escopo escolhido foi necessário adotar uma estratégia de categorização por décadas para possibilitar um exame mais coerente frente à realidade e o volume de documentos científicos publicados ao longo dos anos. Além disto, a seção cronológica por décadas também permitiu a visualização de um cenário geográfico mundial sobre o desenvolvimento científico, tecnológico e econômico sobre a impressão 3D ao longo do tempo.

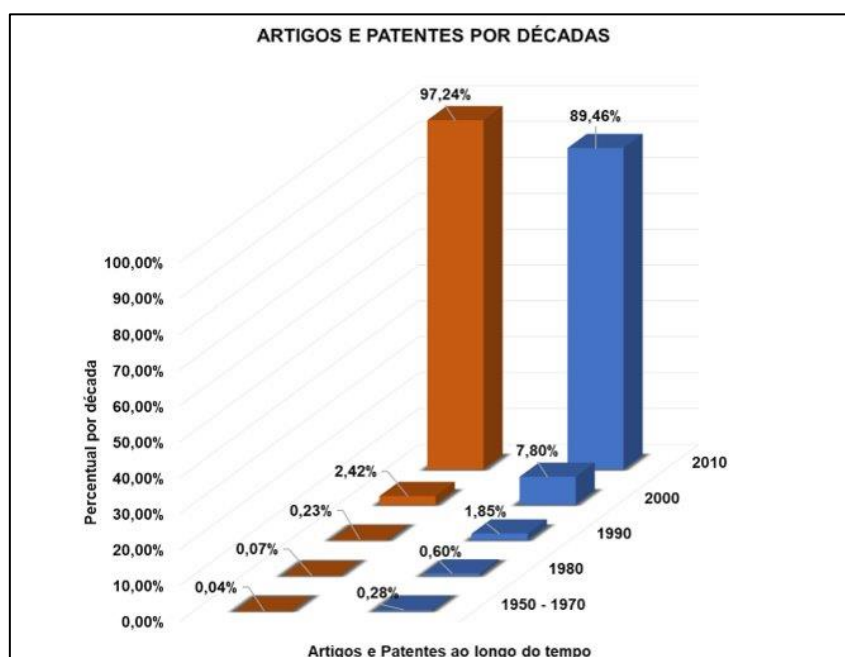
A análise do panorama das produções científicas e suas respectivas inovações relacionadas a produtos, processos e serviços no campo da impressão 3D com base na integração de informações entre artigos também foi fundamental para o entendimento dos cenários ao longo do tempo. Uma vez que o mapeamento tecnológico é importante para uma compreensão mais aprofundada da evolução de uma tecnologia ao longo dos anos, além da identificação de tendências futuras (ANTUNES, 2018).

De acordo com o gráfico ilustrado na figura 6 é possível observar que em média cerca de 90% do montante total de documentos científicos encontrados foram publicados

a partir de 2010. Os outros percentuais restantes, que não chegam a 10%, dizem respeito às décadas anteriores a este período.

Ao analisar estas publicações entre as décadas de 50 e 80, a maioria abordava procedimentos nas áreas de química, engenharia e eletrônica, com foco principal na criação de processos modulares e personalizados de manufatura, aditivos químicos, óleos lubrificantes, construção de circuitos impressos e métodos de impressão de fotografias com visualização em terceira dimensão. Esses temas eram relevantes e correlacionados com a temática da impressão 3D.

Figure 6 - Seção cronológica das publicações sobre Impressão 3D por décadas



Fonte: Elaborado pelos autores, adaptada do estudo sobre impressão 3D (SAMPAIO, 2022)

Somente no final da década de 60 a impressão 3D como conhecemos hoje começa a se estruturar no sentido de definição de área do conhecimento, pois identifica-se a descrição de criação de novas técnicas e dispositivos para a construção de circuitos, a reprodução fotográfica e a materialização de objetos.

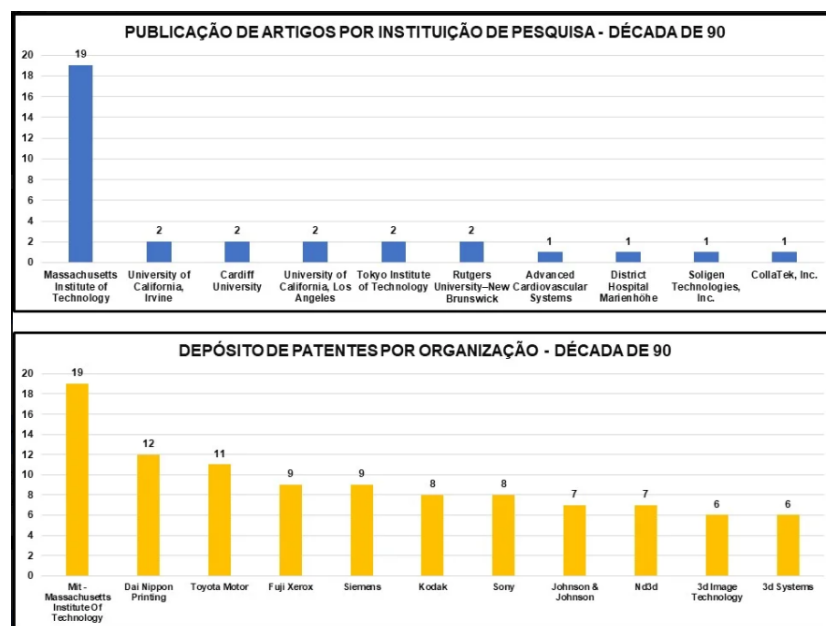
Documentos científicos encontrados na busca (entre as décadas de 60 e 80) foram fundamentais para entendimento da origem e evolução científica e tecnológica da impressão 3D. São eles: Patente: *A method and material for producing a three-dimensional* - GB1243043A - depositada em 1968, do inventor Wyn Kelly Swainson; Patente: *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*

(US4575330) de Charles Hull, 1984; Artigo: *Stereolithography* de Raymond S. Freed - em 1989 e Patente: EP0362982 *Stereolithographic curl reduction*” no mesmo ano. Em suma, o teor desses documentos descrevia processos de impressão tridimensional de objetos sólidos a partir da utilização de luz como processo básico permitindo a materialização de objetos, camada por camada, a partir de um molde digital. Era o início da criação das tecnologias com base na foto polimerização, principalmente a partir dos avanços da fotoescultura e da topografia (RELVAS, 2018).

A partir da década de 90 (ver figura 7), é possível identificar uma maior ocorrência de publicações que se referiam à forma como ocorria os processos de feitura dos objetos em terceira dimensão (SAMPAIO, 2022).

É nesta década que verificamos o surgimento de novas oportunidades em termos de métodos, equipamentos, suprimentos e insumos nas áreas de engenharia e ciência de materiais resultou na incorporação da impressão 3D como uma ferramenta essencial de prototipagem rápida. Além disso, esse avanço também levou ao surgimento de empresas, marcas, sistemas e produtos relacionados a essa tecnologia (KRUTH, 1998).

Figura 3 - Quantidade de publicações de artigos por ICT e patente por titulares na década de 90.



Fonte: Elaborado pelos autores, adaptada do estudo sobre impressão 3D (SAMPAIO, 2022)

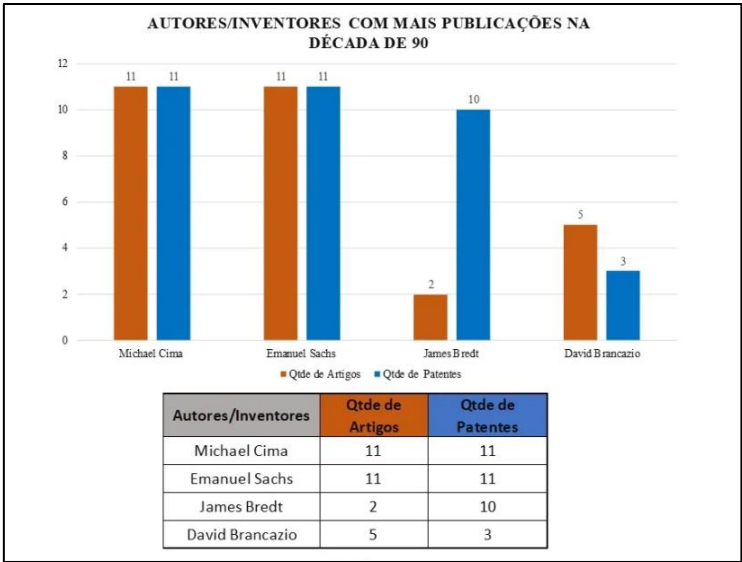
No cruzamento dos dados em que relacionamos Instituições de Ciência e Tecnologia (ICTs) que mais publicaram artigos e depositaram patentes nesta década, estão localizadas no continente norte americano em ambos os casos, mais precisamente

nos Estados Unidos. E mesmo algumas instituições de países europeus e asiáticos figurando nesse cenário (SAMPAIO, 2022).

Isto significa que o conhecimento científico e tecnológico na década de 90 estava concentrado nas organizações do continente norte americano, principalmente no Massachusetts Institute of Technology – MIT. O mesmo cenário ocorre para o cruzamento de dados sobre de autores de artigos e inventores de patentes com mais publicações (SAMPAIO, 2022).

Emanuel Sachs, Michel Cima, David Brancazio e James Bredt compõe o grupo de pesquisadores que mais publicaram sobre o tema são do MIT e são os inventores com maior número de depósitos de patentes da década. É o que podemos observar no gráfico da figura 8.

Figure 4 – Autores e Inventores com maior produção na década de 90.



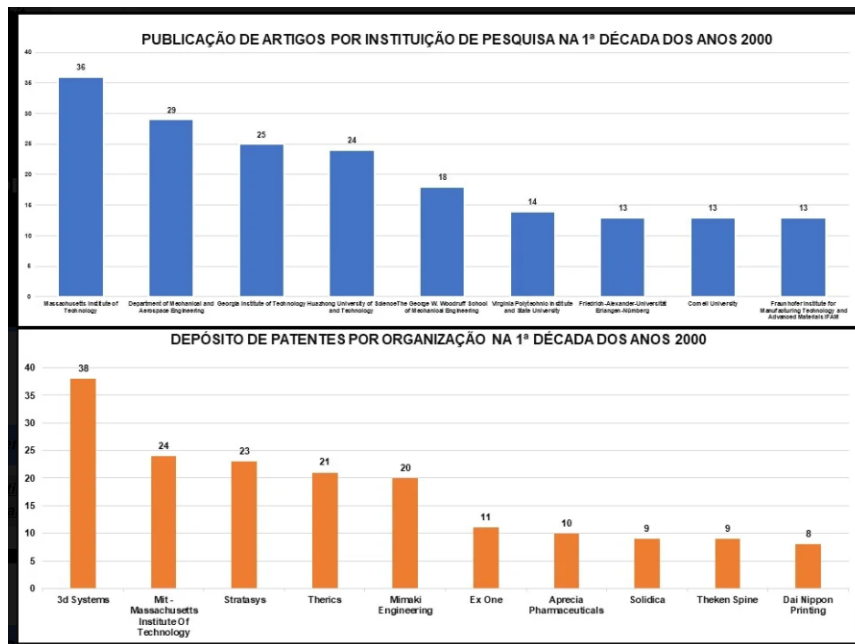
Fonte: Elaborado pelos autores, adaptada do estudo sobre impressão 3D (SAMPAIO, 2022)

Em suma, a década de 90 tem seu lastro de publicações de documentos científicos (artigos e patentes) concentrada no Massachusetts Institute of Technology – MIT, cujo grupo de pesquisadores de vínculo (autores e inventores) possui maior quantidade de títulos publicados mundialmente. Por este motivo é uma década tida marco inicial científico, tecnológico e econômico da impressão 3D, pois é a partir desse arcabouço que se estrutura o seu processo de desenvolvimento alinhado às demandas do setor produtivo.

Isto é o que evidenciamos na primeira década dos anos 2000, quando ao analisar os resultados do cruzamento dos dados de organizações que mais publicaram artigos e

depositaram patentes, percebe-se que o cenário das patentes começa a tomar outra direção. Um caminho mais orientado ao mercado. Este período da história é o que marca o início da transferência do conhecimento acadêmico para o setor empresarial na perspectiva da Impressão 3D por meio de tecnologias licenciadas ou da criação de empresas.

Figure 5 - Quantidade de publicações de artigos por ICT e patente por titulares na 1ª década de 2000.



Fonte: Elaborado pelos autores, adaptada do estudo sobre impressão 3D (SAMPAIO, 2022)

O *Massachusetts Institute of Technology* – MIT continua ICT líder de publicações de artigos da primeira década do ano dois mil, entretanto percebe-se uma difusão e dispersão da produção científica para outras ICTs. No que se refere às patentes, no entanto, o MIT registrou queda em seu posicionamento no ranking. O que é possível constatar na representação gráfica da figura 9.

O *ranking* apresenta a liderança dos artigos científicos em universidades, porém a grande maioria dos principais depositantes de patentes no período de 2000 a 2009 são organizações do setor privado. Neste cenário a 3D Systems ocupa uma colocação de destaque seguido pela *Stratasys*, *Therics*, *ExOne*, *Aprecia*, *Solidica* e *Theken Spine*. Todas as empresas atuantes na área da impressão 3D e fabricação aditiva, conforme apresentação feita por Sampaio et Al, (2022, p.771) a seguir:

A 3D Systems é considerada a primeira empresa de Impressão 3D do mundo, utilizando a estereolitografia é oriunda da pesquisa científica

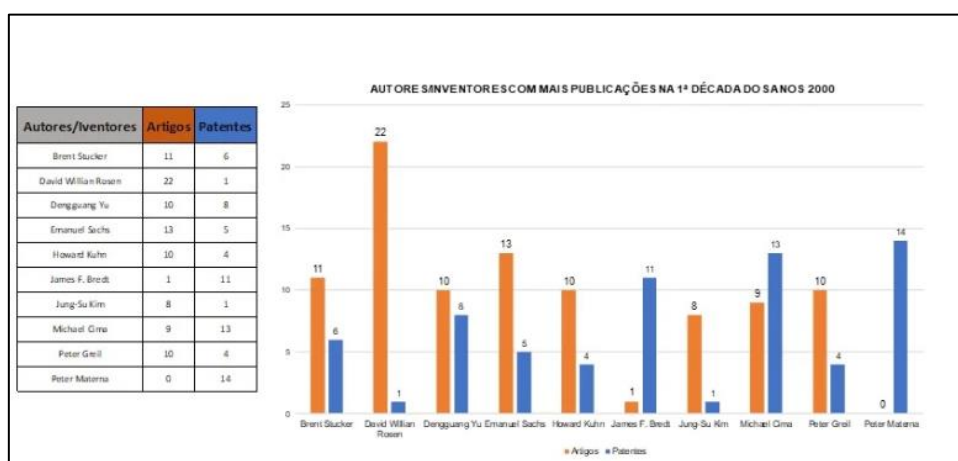
do *Massachusetts Institute of Technology*. A *Stratasys* foi a precursora da utilização da modelagem por fusão e deposição. A *Therics* com Impressão 3D por meio de partículas de polímero aquecidas sobre fluido e com tecnologia básica para a Impressão 3D de líquidos, licenciada do *MIT*, para produção de produtos principalmente de aplicações médicas. A *ExOne* com desenvolvimento de tecnologia de impressão de metais. *Aprecia Pharmaceuticals* com desenvolvimento de manufatura farmacêutica. A *Solidica* com princípio de prototipagem rápida com deposição sequencial de material para construção de objeto consolidado sem derretimento do material a granel. A *Theken Spine* que foi um desdobramento da *Therics*.

Na primeira década dos anos 2000, que marca o início do século XXI, houve um notável avanço no campo mercadológico relacionado à da impressão 3D. Empresas, em sua maioria, fundadas nos primeiros anos da década que desempenharam papéis significativos na promoção e no avanço da impressão 3D nesse período, cada uma com suas contribuições específicas para diversas áreas do conhecimento e da sociedade.

No cruzamento de dados entre autores e inventores, houve uma mudança significativa entre as décadas de 90 e os primeiros dez anos dos anos 2000. Nesse período, ocorreu uma expansão e diversificação de pesquisadores envolvidos no campo da impressão 3D.

A representação gráfica da figura 10 revelam que David Rosen possui uma extensa produção acadêmica, porém com um desenvolvimento tecnológico incipiente, enquanto Peter Materna demonstra habilidades produtivas em engenharia, mercado e propriedade intelectual, mas não apresenta produção acadêmica. Esta análise é feita a partir da constatação de que Rosen possui a maioria de artigos publicados, porém um único depósito de patente. E, Materna tem a maior incidência de patentes, mas nenhuma publicação de artigo.

Figura 6 - Autores e Inventores com maior produção na 1ª década de 2000.



Fonte: Elaborado pelos autores, adaptada do estudo sobre impressão 3D (SAMPAIO, 2022)

A primeira década dos anos 2000, o contexto das publicações e cenários da impressão 3D foi marcado pelo fim da patente de 1984, o que impulsionou a popularização dessa tecnologia. Projetos *Open Source* surgiram, possibilitando a replicação de impressoras domésticas e ampliando o acesso à impressão 3D. Houve uma maior interação entre usuários e a tecnologia, tanto em termos de produtos quanto de métodos, permitindo que os usuários tivessem mais controle e criatividade na criação de objetos. O surgimento do movimento Maker incentivou a cultura "faça você mesmo" e valorizou a impressão 3D como uma ferramenta essencial para a materialização de ideias (ANDERSON, 2012).

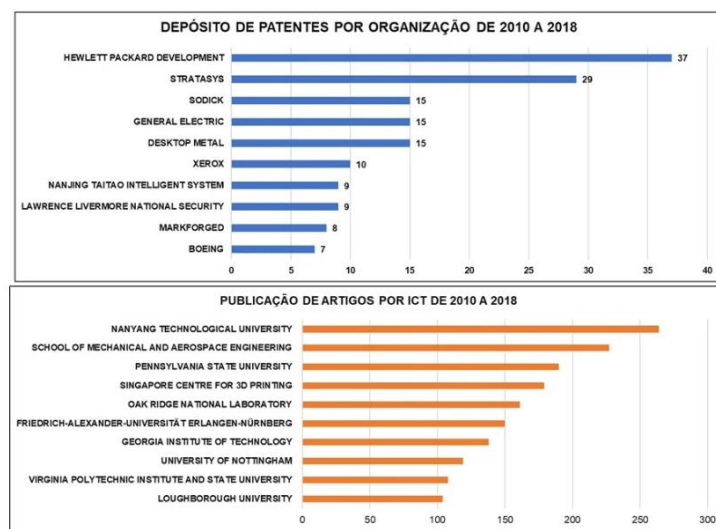
Esse período também foi marcado pela 4ª revolução industrial, com a integração de tecnologias digitais e automação nos processos produtivos, onde a impressão 3D se destacou pela sua versatilidade e eficiência na otimização de processos. Além disso, o conceito de prototipagem rápida ganhou destaque, permitindo o desenvolvimento ágil e preciso de protótipos funcionais. Esses elementos impulsionaram o avanço da impressão 3D e sua aplicação em diversos campos durante a primeira década dos anos 2000 (LOBATO, 2019).

Outro ponto importante da década foi que à medida que as pesquisas e o desenvolvimento da tecnologia avançavam e a indústria adotava seu uso, o termo "Impressão 3D" se estabeleceu como sinônimo de manufatura aditiva, abrangendo as diversas tecnologias relacionadas. Mas somente no final da década, em 2010, a Sociedade Americana para Ensaios e Materiais (ASTM) oficialmente redefiniu o termo para refletir

sua natureza abrangente e aplicável a uma variedade de processos e materiais que enquadrava as mais diversas tecnologias que se dedicavam a produzir objetos e tridimensionais (MARQUES, 2014).

Esta oficialização pode ser considerada como um marco, pois permitiu que a partir da segunda década dos anos 2000 (ver figura11) as tecnologias tivessem uma identidade coesa e reconhecida. Essa definição consolidada trouxe clareza e consenso em relação ao campo da impressão 3D, contribuindo para seu desenvolvimento e reconhecimento (ASTM INTERNATIONAL, 2017).

Figura 7 - Quantidade de publicações de artigos por ICT e patente por titulares na 2ª década de 2000.



Fonte: Elaborado pelos autores, adaptada do estudo sobre impressão 3D (SAMPAIO, 2022)

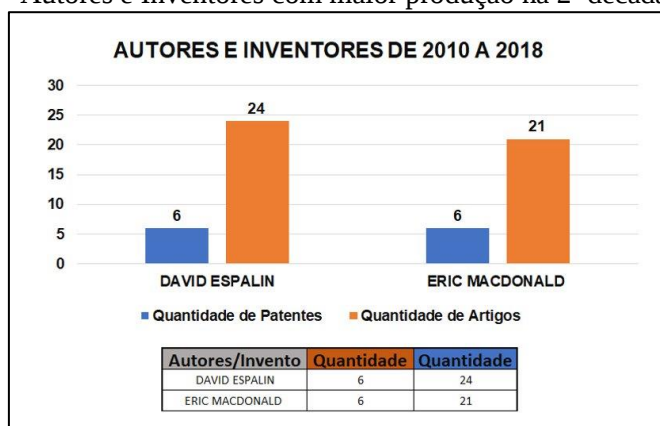
Além disso, a partir da análise dos documentos da década, revelados pela investigação objeto deste trabalho, é notável um crescimento significativo nas publicações reflete não apenas avanços tecnológicos, como o desenvolvimento de novos materiais e eletrônicos, mas também evidenciam um processo contínuo de evolução e aprimoramento. Desde as primeiras descrições sobre prototipagem até a melhoria da qualidade dos produtos tridimensionais, há um progresso contínuo registrado nas publicações entre 2010 e 2018 (ver figura 11).

A partir de 2010, houve um notável crescimento exponencial nas publicações relacionadas à impressão 3D. Ao contrário das duas décadas anteriores, o MIT não ocupa mais a posição de liderança no ranking de artigos. Nesse novo cenário, observa-se a ascensão das instituições de ciência e tecnologia (ICTs) asiáticas no desenvolvimento científico e pesquisa e desenvolvimento (P&D), juntamente com outras instituições

científicas dos Estados Unidos, Reino Unido e Alemanha. A Nanyang Technological University, em Singapura, destaca-se como protagonista nas publicações de artigos científicos.

Quando analisamos os depósitos de patentes, podemos perceber uma tendência semelhante de crescimento exponencial. Os principais detentores dessas patentes são as empresas líderes no setor de impressão 3D que já se destacavam como autores proeminentes na década de 90. Durante essa década, houve um notável aprimoramento e refinamento das tecnologias de impressão 3D, especialmente com a diversificação no uso de materiais metálicos e outros insumos. Esses avanços contribuíram para impulsionar ainda mais o desenvolvimento e a sofisticação da impressão 3D. O gráfico mostra os principais líderes do mercado de manufatura aditiva nos últimos anos. Empresas conhecidas por fabricar e comercializar sistemas de impressão 3D de metal e fibra de carbono, fabricação de maquinário para impressão de metais, tecnologia avançada em metais líquidos, manufatura aditiva para projetos aeroespaciais, equipamentos e softwares de inteligência artificial para impressão 3D e projetos de impressão 3D para a aviação.

Figura 8 - Autores e Inventores com maior produção na 2ª década de 2000.



Fonte: Elaborado pelos autores, adaptada do estudo sobre impressão 3D (SAMPAIO, 2022)

Conforme os dados obtidos nas bases de pesquisa, os autores com maior número de publicações de artigos e os inventores com mais depósitos de patentes estão associados a organizações distintas que se destacaram na respectiva década com pode ser observado na figura 12. Na sincronização realizada entre autores e inventores só foi possível identificar dois pesquisadores que estavam presentes simultaneamente nos dois grupos.

Eric MacDonald é um professor e pesquisador associado da Universidade do Texas, conhecido por suas contribuições significativas no campo da impressão 3D e

fabricação aditiva. Seu trabalho abrange a aplicação da impressão 3D em setores como medicina, aeroespacial e energia, bem como o desenvolvimento de novos materiais avançados para a impressão 3D, incluindo metais e materiais com propriedades especiais. Ele também é reconhecido por sua expertise na criação de modelos matemáticos para aprimorar a precisão e eficiência dos processos de impressão 3D. Já David Espalin é um pesquisador e professor associado de Engenharia Mecânica e Aeroespacial com foco em tecnologias de impressão 3D, materiais avançados, design de produtos e processos de fabricação. Sua atuação se estende a diversos setores, incluindo aeroespacial, defesa, médico e automotivo, onde suas pesquisas têm contribuído para o avanço e inovação dessas indústrias.

Durante a segunda década dos anos 2000, entre 2010 e 2018, o contexto das publicações e cenários revelou algumas diferenças significativas. Foi observado que os titulares de patentes diferem dos titulares pelas Instituições de Ciência e Tecnologia (ICT) mencionados nos artigos. Além disso, foram identificadas publicações abordando inovações decorrentes de pesquisas realizadas em décadas anteriores. Também foi constatada a presença de empresas consolidadas no mercado da impressão 3D, que já haviam sido mencionadas em documentos científicos de décadas anteriores. Além disso a expansão asiática desempenhou um papel significativo na produção de artigos científicos e depósitos de patentes relacionados à impressão 3D, demonstrando o crescimento e a influência da região nesse campo.

Neste período, foram observados diversos avanços e tendências na área da impressão 3D. Houve um foco significativo em pesquisas e processos que buscavam aprimorar a tecnologia de micro e nano impressão 3D, bem como sua integração com outras tecnologias da indústria 4.0. O uso da impressão 3D tornou-se cada vez mais comum na sociedade em geral, com a evolução da tecnologia permitindo sua presença em residências, ambientes escolares e acadêmicos. A disseminação dos movimentos Maker desempenhou um papel importante como uma ferramenta para experimentação e compreensão das lógicas de inovação, tornando-se um componente fundamental em ambientes de inovação.

Nos documentos pesquisados foi possível perceber a ocorrência de estudos e movimentos relacionados à Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS), evidenciando a influência da impressão 3D nesse campo e explorando as interações entre esses aspectos. Também se observou publicações associada ao modelo STEAM, uma abordagem

educacional que integra ciência, tecnologia, engenharia, artes e matemática, estimulando a criatividade e habilidades interdisciplinares.

Novas possibilidades também foram retratadas considerando a impressão 3D como uma tecnologia essencial no contexto do conceito de inovação inclusiva, buscando promover a acessibilidade e a participação de diferentes grupos na criação e desenvolvimento de soluções.

Durante a segunda década dos anos 2000, foi evidente a disseminação abrangente da impressão 3D, tanto por meio de publicações científicas que representam mais de 95% do total de artigos e patentes ao longo do período, quanto por indicadores de maturidade tecnológica e presença no mercado. (GARTNER, 2015).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapeamento da Impressão 3D proporcionou um profundo entendimento da sua evolução histórica e aplicações. A análise preliminar dos dados conduziu à categorização por décadas, permitindo uma análise abrangente de todas as etapas do surgimento e desenvolvimento dessa tecnologia. Com base nesses resultados, foi possível identificar a trajetória da inovação em diversos processos relacionados à Impressão 3D, assim como os principais clusters de Ciência, Tecnologia e Inovação. Com essas premissas, realizou-se um mapeamento das publicações científicas e tecnológicas (artigos e patentes), a fim de obter informações históricas desde a sua origem até a atual realidade do mercado.

O artigo abordou o panorama das publicações ao longo dos períodos de 1990 a 1999, de 2000 a 2009 e de 2010 a 2018. Através do mapeamento da evolução histórica, foi possível compreender a relevância do trabalho de pesquisa científica consciente e orientado para a inovação, proporcionando o avanço e desenvolvimento nessa área.

A primeira década da análise foi caracterizada pela estruturação das tecnologias e o desenvolvimento de novos métodos. Esse cenário teve sua origem no ambiente acadêmico, que pode ser considerado como o berço metafórico dessa tecnologia, principalmente liderado pelos pesquisadores do Massachusetts Institute of Technology.

Na segunda década avaliada, observou-se uma expansão do cenário tecnológico. Embora o Massachusetts Institute of Technology lidere as pesquisas, a análise dos artigos revela uma dispersão da pesquisa em outros locais do mundo, especialmente na Europa e na Ásia. As primeiras grandes empresas surgidas dessas bases universitárias destacam-se

como importantes atores nos clusters de inovação global, conforme indicado pelos dados de patentes e pela competição no mercado.

O terceiro período confirmou que as tecnologias de Impressão 3D estão se tornando cada vez mais refinadas e estão sendo associadas a outras tecnologias para aprimorar a gestão de fábricas inteligentes, estabelecer procedimentos mais rigorosos e utilizar máquinas altamente aperfeiçoadas. Além do setor industrial, a popularização da Impressão 3D em pequenas, médias e microempresas, assim como em ambientes domésticos e educacionais, é respaldada pelo movimento maker. Enquanto as universidades continuam a produzir pesquisas, as grandes empresas globais de Impressão 3D desempenham um papel importante na inovação e desenvolvimento por meio de seus centros de desenvolvimento e inovação.

Além dos resultados obtidos na identificação de autores, inventores, instituições e atores globais, constatou-se que a impressão 3D possui múltiplas potencialidades que contribuem para os novos modelos de inovação inclusiva.

Foram apresentados, também neste contexto, o surgimento de novas teorias e movimentos sobre inovação que trazem perspectivas para o desenvolvimento tecnológico por meio da utilização de algumas tecnologias da quarta revolução industrial. Uma dessas práticas tecnológicas está relacionada ao uso da impressão 3D em ambientes de aprendizagem, pesquisa, experimentação e inovação, como os makerspaces e fablabs, visando incorporar o entendimento dos processos produtivos à realidade das pequenas e médias organizações.

REFERÊNCIAS

- All3DP. (2015, September 7). Retrieved abril 14, 2017. Disponível em: <https://all3dp.com/gartners-3d-printing-hype-curve-best-yet-come>. Acesso em: 8 ago. 2018.
- ANDERSON, Chris. **A nova revolução industrial: Makers**. Tradução: Afonso Celso da Cunha Serra. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- ANTUNES, Adelaide M. et al. **Métodos de Prospeção Tecnológica, Inteligência Competitiva e Foresight: principais conceitos e técnicas**. In: RIBEIRO, Núbia. *Prospecção tecnológica*. 1ª. ed. Salvador: IFBA, 2018. v. 1, p. 19-109. ISBN 978-85-67562-24-7. Disponível em: <http://www.profnit.org.br/wp-content/uploads/2018/08/PROFNIT-Serie-Prospeccao-Tecnologica-Volume-1-1.pdf>. Acesso em: 8 mar. 2019.
- ASTM INTERNATIONAL. **The Global Leader in Additive Manufacturing Standards**. ASTM International, West Conshohocken, Pa., agosto 2017. Disponível em: <https://www.astm.org/ABOUT/OverviewsforWeb2014/Additive-Manufacturing.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2018.
- BRANCO, Sérgio. Prefácio. In: MAGRANI, Eduardo. **Entre dados e robôs: ética e privacidade na era da hiperconectividade**. 2ª. edição. Porto Alegre: Arquipélago Editorial, 2019.
- COELHO, G. M. *Prospecção tecnológica: metodologias e experiências nacionais e internacionais*. Rio de Janeiro: INT, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Gilda-Coelho-2/publication/356002142_PROSPECCAO_TECNOLOGICA_METODOLOGIAS_E_EXPERIENCIAS_NACIONAIS_E_INTERNACIONAIS/links/6189718fd7d1af224bc6b595/PROSPECCAO-TECNOLOGICA-METODOLOGIAS-E-EXPERIENCIAS-NACIONAIS-E-INTERNACIONAIS.pdf. Acesso em: 8 mar. 2019.
- DA FONSECA, João José Saraiva. *Apostila de metodologia da pesquisa científica*. João José Saraiva da Fonseca, 2002.
- DAIM, T. U. et al. **Forecasting emerging technologies: use of bibliometrics and patent analysis**. *Technological Forecasting & Social Change*, v. 73, n. 8, p. 981-1012, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.04.004> Acesso em: 8 mar. 2020.
- DAY, P. BBC News. **Will 3D printing revolutionise manufacturing?**. 2011. Disponível em: <http://www.bbc.co.uk/news/business-14282091>. Acesso em: 10 de dezembro de 2019.
- DE OSLO, Manual. Manual de Oslo. Recuperado de <http://gestiona.com.br/wpcontent/uploads/2013/06/Manual-de-OSLO-2005.pdf>, 1997.
- DELOITTE. **Industry 4.0 Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies**. 24 de outubro de 2014. Disponível em: <http://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/manufacturing/ch-en-manufacturing-industry-4-0-24102014.pdf>. Acesso em: 10 de dezembro de 2019.
- EYCHENNE, F.; NEVES, H. *Fab Lab: A Vanguarda da Nova Revolução Industrial*. Editorial Associação Fab Lab Brasil, 2013.
- FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (FIRJAN). **Panorama da Inovação - Indústria 4.0**. Publicações FIRJAN: Cadernos SENAI de Inovação, 2016. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-inovacao/industria-4-0.htm>. Acesso em: 10 de dezembro de 2019.
- GIL, Antonio Carlos. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HERMANN, M; PENTEK, T; OTTO, B. *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*. 2015. Disponível em: <http://content.yudu.com/Library/A1woe3/RelatriodaComissosob/resources/11.htm> . Acesso em: 02 mai. 2019

KRUTH, et al. *Progress in additive manufacturing and rapid prototyping*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 47, n. 1, p. 525-540, 1998. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850607632405>. Acesso em: 10 de janeiro de 2020.

LÉVY, P. A Inteligência Coletiva: por uma antropologia do ciberespaço. São Paulo: Edições: Loyola, 1998.

LOBATO, P. A et al. Análise Da Relação Da Cultura Maker, Fablabs E Robótica Educacional Na Educação. Sodebrás, V. 157, P. 60-65, 2019.

MARQUES, K. **Manufatura aditiva: o futuro do mercado industrial de fabricação e inovação**. EESC- Escola de Engenharia de São Carlos, USP-Universidade de São Paulo, 2014.

MEDEIROS, Ivan L. de. et al. Revisão Sistemática e Bibliometria facilitadas por um Canvas para visualização de informação. InfoDesign, v. 12, n. 1, p. 93-110, 2015

MONTEIRO, M. T. F. (2015). **A impressão 3d no meio produtivo e o design: um estudo na fabricação de joias**. Dissertação (Mestrado em Design) – UEMG, Belo Horizonte. Disponível em: <http://anapaulanasta.com/wp-content/uploads/2015/09/Disserta%C3%A7%C3%A3o-Marc-o-T%C3%BAlcio-Ferreira-Monteiro.pdf>. Acesso em: 20 de dezembro de 2019.

PHAM, Duc Truong; GAULT, Rosemary S. A comparison of rapid prototyping technologies. International Journal of machine tools and manufacture, v. 38, n. 10-11, p. 1257-1287, 1998. Disponível em: [http://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](http://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5) Acesso em: 20 de dezembro de 2018.

RELVAS, Carlos. 2018. **O Mundo da Impressão 3D e o Fabrico Digital**. Engebook

SAMPAIO, Isabella et al. Impressão 3d: Da Pesquisa Ao Setor Produtivo Um Estudo Exploratório Sobre Sua Evolução Histórica, Origem, Tecnologias, Aplicações E Inovações. Revista Gestão e Planejamento, Salvador, v. 23, p. 751-777, 1 jan. 2022. DOI 10.53706/gep.v.23.7427. Disponível em: <https://revistas.unifacs.br/index.php/rgb/article/view/7427/4701>. Acesso em: 1 set. 2023.

SANTOS, R. N. M. D. Produção Científica: por que medir? O que medir? Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação, Campinas, 1, 2003. Disponível em: <https://brapci.inf.br/index.php/res/v/39961>.

SCHWAB, Klaus Schwab - A Quarta Revolução Industrial. São Paulo: Edipro. 2016. ISBN: 9788572839785, p.186.

VOLPATO, N. Ed. Prototipagem Rápida: tecnologias e aplicações. Edgard Blucher, 1 st. Ed. 2007.