

MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA NO CONTEXTO DA IMPRESSÃO 4D

Wanderson de Vasconcelos Rodrigues da Silva – wanderson.vasconcelos@ifpi.edu.br

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Propriedade Intelectual – PPGPI/UFS

Laboratório de Pesquisas e Estudos em Computação – LAPEC/IFPI

Renata Silva-Mann – renatamann@gmail.com

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Propriedade Intelectual – PPGPI/UFS

Departamento de Engenharia Agrônômica – DEA/UFS

Mayllon Veras da Silva – veras@ifpi.edu.br

Laboratório de Pesquisas e Estudos em Computação – LAPEC/IFPI

Matheus dos Santos Araújo Mendes – matheusshmendes@gmail.com

Laboratório de Pesquisas e Estudos em Computação – LAPEC/IFPI

Harlykson Soares Magalhães – harlykson.magalhaes@gmail.com

Laboratório de Pesquisas e Estudos em Computação – LAPEC/IFPI

Resumo – O processo de impressão 4D é uma tecnologia inovadora que consiste na fabricação de componentes em três dimensões, utilizando materiais especiais e designs sofisticados que são “programados” para reagir de acordo com determinado estímulo ou gatilho, alterando sua forma de impressão 3D original. Aplicações potenciais incluem comportamento semelhante à robótica sem a dependência de dispositivos eletromecânicos complexos, bem como produtos adaptáveis, roupas ou mecanismos que respondam às demandas dos usuários ou do ambiente. Em virtude do enorme potencial dessa tecnologia, com o presente trabalho teve-se por objetivo realizar um mapeamento sistemático da produção do conhecimento científico e tecnológico no que diz respeito à impressão em quatro dimensões. O mapeamento realizado permitiu uma visão geral do atual estado de desenvolvimento da tecnologia abordada neste estudo. Constatou-se que a impressão 4D é uma tecnologia de ponta que ainda se encontra em fase de pesquisa e desenvolvimento. Sendo assim, os pesquisadores têm um longo caminho a percorrer para tornar essa tecnologia comercialmente viável para as empresas.

Palavras-chave – projeto 4d; manufatura aditiva; mapeamento sistemático; prospecção.

Abstract – The 4D printing process is an innovative technology that consists of manufacturing three-dimensional components using special materials and sophisticated designs that are “programmed” to react according to a given stimulus or trigger by changing their original 3D printing form. Potential applications include robotic-like behavior without reliance on complex electromechanical devices, as well as adaptive products, clothing or mechanisms that respond to user or environmental demands. Due to the enormous potential of this technology, the present work aimed to carry out a systematic mapping of the production of scientific and technological knowledge with respect to printing in four dimensions. The mapping carried out allowed an overview of the current state of development of the technology addressed in this study. It was found that 4D printing is a cutting-edge technology that is still in the research and development phase. Thus, researchers have a long way to go to make this technology commercially viable for companies.

Keywords – 4d design; additive manufacturing; systematic mapping; prospecting.

1 INTRODUÇÃO

O processo de impressão em três dimensões (3D), desde que foi criado, nos anos 80, tem possibilitado a criação de diversos dispositivos extremamente úteis a diversos setores como a indústria da construção civil, engenharia espacial e até o setor médico, com a fabricação de próteses ortopédicas. A impressão 4D (em quatro dimensões) é uma tecnologia revolucionária e inovadora recém criada com base nas tecnologias da impressão 3D, que apresenta um grande potencial tecnológico e diversas aplicações relevantes. Um grupo de pesquisa do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) foi responsável pela criação e denominação desta tecnologia (TIBBITS, 2013).

O processo de impressão 4D consiste basicamente na confecção de objetos em 3 dimensões, utilizando-se de materiais ativos que reagem a algum estímulo, a exemplo a umidade ou variações de temperatura, transformando assim suas estruturas e modificando seu formato. Neste caso, entende-se a quarta dimensão como o tempo necessário para que o objeto modifique sua estrutura e atinja a forma desejada (GE et al., 2016; PEI, 2014; KHOO et al., 2015).

Dessa forma, compreende-se a impressão 4D como uma clara evolução da estrutura de impressão 3D, no que se refere a propriedades, formato e funcionalidades, o que torna possível a construção de produtos automontantes, multifuncionais e com autorreparo. O processo de impressão 4D depende do tempo de impressão, da velocidade de reação dos materiais utilizados e do design escolhido. Por outro lado, o produto final, após a reação do material e modificação da estrutura, é previsível (MOMENI et al., 2017; CHOI et al., 2015).

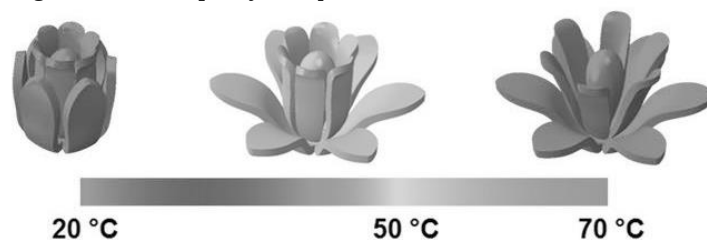
Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa foi realizar um mapeamento sistemático da produção do conhecimento científico e tecnológico no contexto da impressão 4D, com base nos documentos de patentes depositados e nos artigos completos publicados nos periódicos, apresentando uma visão geral do atual estado de desenvolvimento científico e tecnológico na área.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com a tecnologia de impressão 4D, sem dúvida, se cria novos campos de aplicação, onde uma estrutura pode ser projetada para que, automaticamente, se monte, se reconfigure estruturalmente e até crie uma nova aplicação, tudo isso utilizando-se de energias livres do ambiente e evitando desperdício de energia elétrica e danos ecológicos. Outras vantagens que também podem ser citadas são a redução do volume de armazenamento, uma vez que o produto poderá assumir uma forma reduzida de início, e posteriormente, assumir seu formato desejado (TIBBITS, 2014).

Na Figura 1 se representa uma simulação de florescimento apresentada por GE et al. (2016) na qual a flor multimaterial foi primeiro programada no estado de botão temporário a 20 °C. As pétalas externas abriram depois de aquecer a 50 °C e, posteriormente, a flor desabrochou a 70 °C.

Figura 1 – A recuperação sequencial de uma flor multimaterial.



Fonte: Adaptado de GE et al. (2016)

Para Jacobsen (2016), ao se comparar impressão 3D à impressão 4D, enxergam-se inúmeras vantagens que ampliam ainda mais os setores de aplicação desta tecnologia. De acordo com Gladman (2016), os sistemas 4D, também chamados de sistemas de metamorfose, podem receber aplicações em diversas áreas, tais como engenharia de tecidos, robótica autônoma e dispositivos biomédicos. No

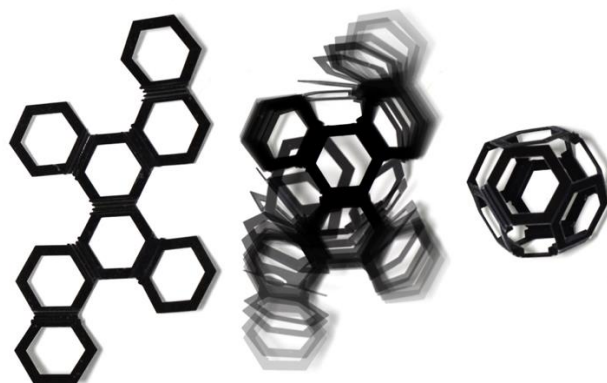
geral, a aplicação da tecnologia de impressão 4D divide-se em três principais propriedades: automontagem, multifuncionalidade e autorreparo (MOMENI et al., 2017).

O processo de automontagem pode envolver desde a escala nanoscópica a grandes escalas. O interesse dos pesquisadores se concentra, atualmente, em aplicações de microescala. Tem-se como exemplo a transferência de partes de um equipamento para o interior do organismo humano através de um pequeno orifício. Assim, as partes podem se automontar no local proposto pelos médicos, evitando uma grande cirurgia (WHITESIDES; GRZYBOWSKI, 2002).

Mais uma aplicação futuramente possível com esta tecnologia deverá ocorrer em grande escala e em um ambiente hostil, como o espaço sideral. Dessa maneira, partes pequenas da estrutura podem ser impressas individualmente com impressoras pequenas e depois montadas em estruturas maiores, como antenas espaciais e satélites (TIBBITS et al., 2014).

Estruturas com capacidade de adaptação são outra aplicação importante da impressão 4D. Esse sistema é capaz de integrar a detecção e a atuação diretamente no material utilizado, tornando desnecessária a utilização de sistemas eletromecânicos. Dessa forma, a quantidade de peças em uma estrutura seria reduzida drasticamente, bem como o tempo de montagem, energia gasta, o custo e também a quantidade de dispositivos sujeitos a falhas, comparando-se aos números atuais. Na Figura 2 apresenta uma série de fotografias mostrando a transformação de uma estrutura impressa 4D plana para um octaedro preciso (CAMPBELL; TIBBITS; GARRETT, 2014; TIBBITS et al., 2014).

Figura 2 – Transformação de uma estrutura impressa 4D



Fonte: Tibbits et al. (2014)

O conceito de automontagem pode também ser utilizado para a autodesmontagem. A capacidade de correção e autocorreção de possíveis falhas dos produtos impressos em 4D expõe vantagens grandiosas em relação à reutilização e reciclagem. Possíveis aplicações que podem ser citadas são tubos e hidrogéis de autocura (TAYLOR; PANHUIS, 2016; TIBBITS, 2014).

Tecidos com tecnologia 4D de multifuncionalidade e autoadaptação e dispositivos médicos personalizados impressos em 4D, como *stents* traqueais e próteses ortopédicas são mais algumas aplicações extraordinárias da impressão 4D (KHADEMHOSEINI; LANGER, 2016; JUNG; BHUIYAN; OGLE, 2016; ZAREK et al., 2017).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia utilizada no desenvolvimento da pesquisa envolveu aspectos descritivos e exploratórios. Inicialmente realizou-se uma busca na literatura através de capítulos de livros e artigos publicados em periódicos para contextualização do tema, evidenciando sua relevância e justificativa para o desenvolvimento deste estudo. Realizou-se um mapeamento sistemático da produção científica e tecnológica, uma vez que esse é um método para construir esquemas de classificação e estruturar uma determinada área de interesse, neste caso a impressão 4D.

O mapeamento científico se deu com base nos artigos completos disponíveis na *Web of Science*, sendo utilizada uma estratégia de busca avançada que combinou por meio de operadores lógicos o termo “4D Printing” no título, resumo ou palavras-chave. O mapeamento tecnológico se deu a partir do levantamento de dados dos pedidos de patentes disponíveis no *Patentscope*, serviço de busca de patentes da Organização Mundial da Propriedade Intelectual (*World Intellectual Property Organization - WIPO*) e nesse caso utilizou-se o mesmo termo de busca no título ou resumo da patente. As buscas pelas informações foram executadas em julho de 2019.

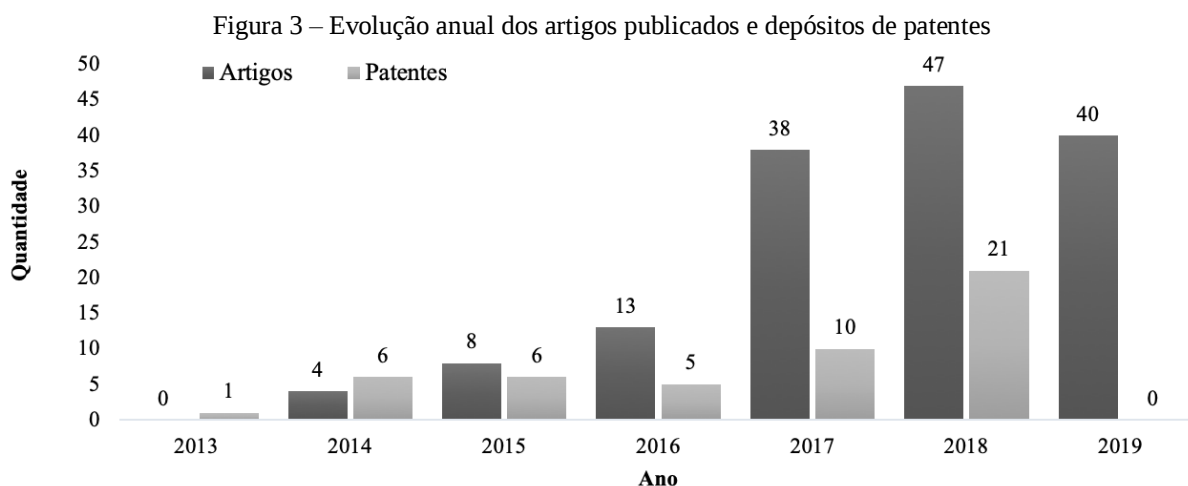
Os dados coletados foram submetidos a exames a fim de detectar erros. Em seguida, foram tabulados em planilhas eletrônicas do *Microsoft Excel®* para poderem ser processados e demonstrados em tabelas e gráficos. A seção seguinte apresenta o mapeamento da área de interesse por meio da análise quantitativa dos artigos e patentes encontrados, atribuindo aos mesmos, significados mais amplos, vinculando-os a outros conhecimentos teóricos já existentes na literatura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No mapeamento se identificou um total de 150 artigos completos publicados e 49 processos de depósitos de Patentes de Invenção (PI) ou Modelos de Utilidade (MU). Os artigos foram analisados em relação ao ano de publicação, país, área da pesquisa, instituições e autores. Os documentos de patentes foram analisados em relação ao ano de depósito, país de origem, Classificação Internacional de Patentes (CIP), depositantes e inventores.

O primeiro artigo envolvendo o termo “4D Printing” foi publicado por Skylar Tibbits em janeiro de 2014 na revista “*Architectural Design*” e teve como título “4D Printing: Multi-Material Shape Change”. Skylar Tibbits é diretor e fundador do laboratório de automontagem do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) e no artigo, o qual foi utilizado para fundamentação teórica desta pesquisa, o mesmo descreve a parceria com a Stratasys Ltd, líder do setor de impressão 4D, para desenvolvimento da automontagem de materiais programáveis e tecnologias adaptáveis para aplicação industrial (TIBBITS, 2014).

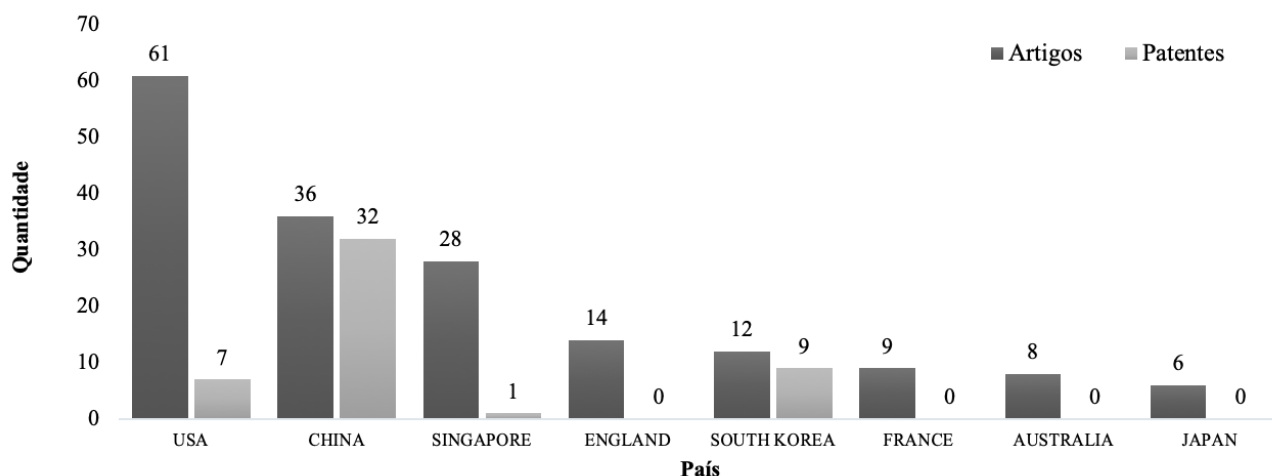
Coincidentemente, o primeiro depósito de patente foi realizado no ano anterior pelo MIT em parceria com a Stratasys Ltd, tendo como título “*Object of additive manufacture with encoded predicted shape change*” e inventores Skylar Tibbits, Daniel Dikovsky e Shai Hirsch. Com esse fato demonstra dois aspectos essenciais para o desenvolvimento científico e tecnológico: a preocupação em proteger a invenção por meio do depósito da patente antes da publicação dos resultados das pesquisas e a parceria entre academia e empresa. Existe uma tendência de crescimento no número de artigos e patentes, impulsionado pelo avanço das pesquisas em impressão 4D e suas aplicações promissoras (Figura 3).



Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Com relação ao país de publicação, observa-se que os Estados Unidos obtiveram o maior número de artigos científicos, tendo totalizado 61 publicações (40,7%), seguidos da China com 36 (24%) e Singapura com 28 (18,7%). Porém, a China lidera na quantidade de depósitos de patentes (65,3%), seguida da Coreia do Sul (18,4%), Estados Unidos (14,3%) e Singapura com apenas uma patente (2%). Com esse comparativo, observa-se que outros países realizam pesquisas na área, mas não desenvolvem a tecnologia ou não a protegem (Figura 4).

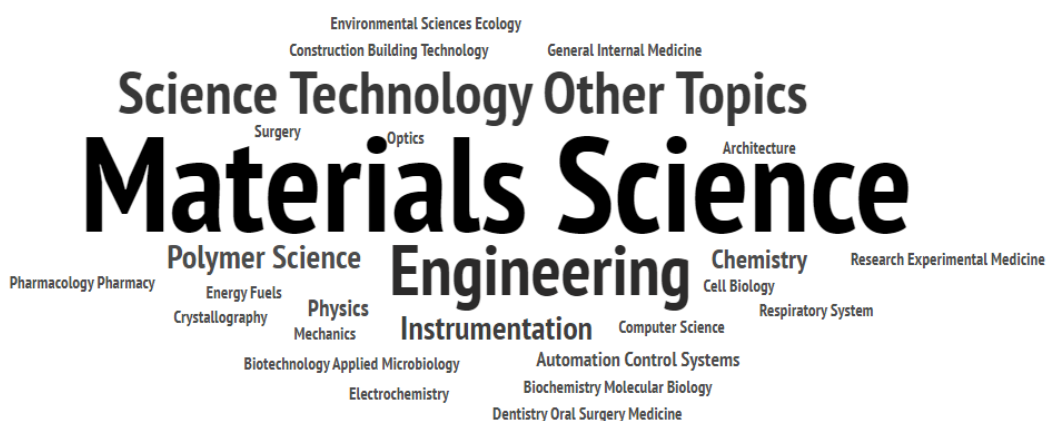
Figura 4 – Distribuição dos artigos publicados e depósitos de patentes por país sobre impressão 4D



Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Quanto às áreas dos artigos publicados, verificou-se que os estudos se concentram principalmente em Ciência de Materiais (63,3%), Engenharia (29,3%), Tecnologia da Ciência e Outros Tópicos (24,7%), Instrumentação (10,7%), Ciência de Polímeros (10%), Química (7,3%), Física (6%) e outras áreas com menor participação (Figura 5). Vale destacar que os artigos não se limitam a pertencer a uma única área de pesquisa, podendo atuar em duas ou mais áreas.

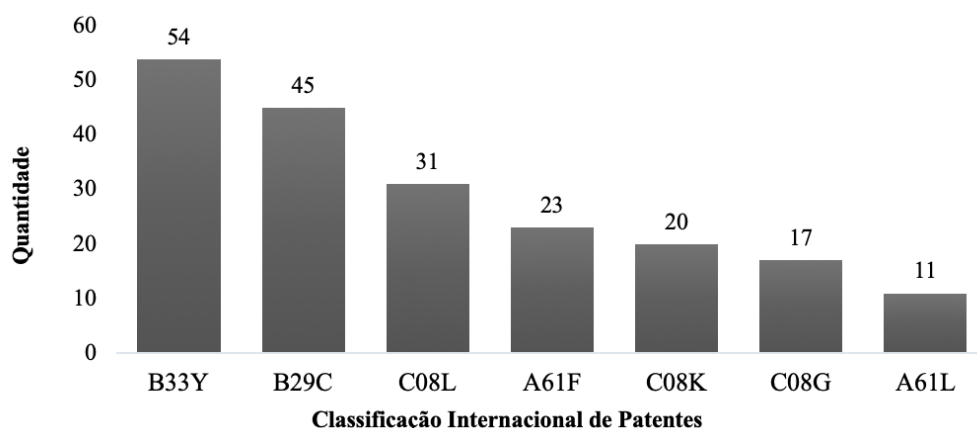
Figura 5 – Nuvem de frequência das áreas de pesquisa sobre impressão 4D



Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Essas áreas estão associadas diretamente às classificações mais frequentes nas patentes encontradas, uma vez que a maioria dos depósitos se concentra na subseção B33Y que envolve a fabricação de objetos tridimensionais por fabricação aditiva, deposição, aglomeração aditiva ou camadas aditivas, seguida das subseções B29C e C08L que representam a moldagem ou união de matérias plásticas e compostos macromoleculares, respectivamente (Figura 6).

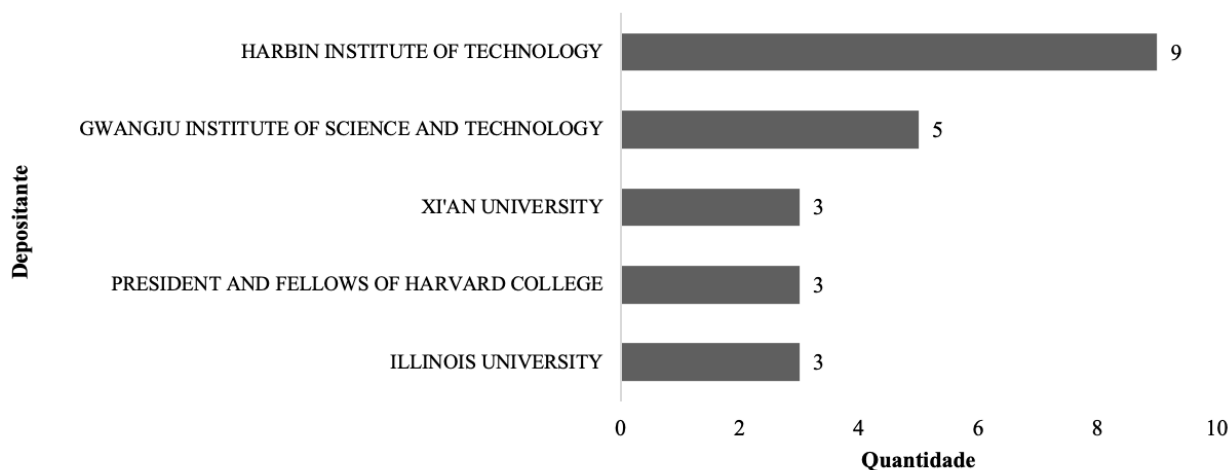
Figura 6 – Distribuição das patentes por CIP para impressão 4D



Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Com relação as instituições que atuam na área, constatou-se que, apesar do MIT ser um dos pioneiros, o mesmo apresenta pouca participação nos depósitos de patentes (4,1%) e nos artigos publicados (2,7%). Entre as cinco instituições que mais publicam trabalhos na área estão o Instituto de Tecnologia da Geórgia (EUA), com participação em 12% dos artigos, seguido da Universidade de Tecnologia e Design de Singapura (9,3%), Universidade de Tecnologia de Nanyang (China) (8,7%), Universidade Jiaotong de Xi'an (China) (6,7%) e Instituto de Tecnologia de Harbin (China) (5,3%). Em relação aos depósitos, o Instituto de Tecnologia de Harbin é o maior titular das patentes (18,4%), demonstrando a participação ativa da China nessa tecnologia. Em seguida, o Instituto Gwangju de Ciência e Tecnologia da Coreia do Sul, com 10,2% das patentes, Universidade de Xi'an, Universidade de Harvard e Universidade de Illinois, com 3 patentes cada (6,1%) (Figura 7). Outras universidades, institutos de tecnologia e empresas aparecem entre os depositantes, porém com menor participação.

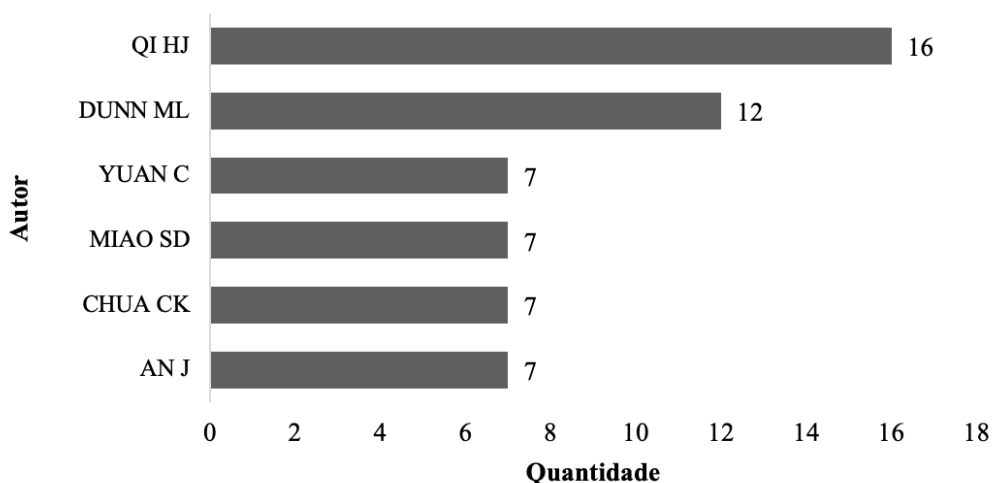
Figura 7 – Distribuição das patentes por depositante sobre impressão 4D



Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Os inventores que mais participaram no desenvolvimento da tecnologia foram Yanju Liu, Jingsong Leng e Fenghua Zhang, os quais pertencem ao Instituto de Tecnologia de Harbin. Quanto à autoria/coautoria dos artigos publicados, observou-se que vários pesquisadores, ainda que pertencessem a instituições distintas, realizaram trabalhos em conjunto. Na Figura 8 se apresenta os seis principais pesquisadores que realizam estudos sobre impressão 4D.

Figura 8 – Distribuição dos artigos publicados por autor sobre impressão 4D



Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

H. Jerry Qi, do Instituto de Tecnologia da Geórgia, é o autor/coautor que mais publica na área (10,7% do total de artigos), corroborando com a liderança da participação do instituto nos estudos sobre impressão 4D. Em seguida, Martin L. Dunn, da Universidade de Tecnologia e Design de Singapura, com 12 artigos (8%). O artigo “*Multimaterial 4D Printing with Tailorable Shape Memory Polymers*” de sua coautoria foi utilizado como uma das referências para fundamentação teórica desta pesquisa. Os demais autores apresentaram menores participações. Ao todo, nesta pesquisa identificou 83 autores/coautores com publicações na área, segundo a metodologia utilizada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista que o mapeamento da produção do conhecimento científico e tecnológico constitui uma ferramenta essencial para os estudos prospectivos, principalmente no que diz respeito às tecnologias revolucionárias, as informações apresentadas nesta pesquisa permitiram identificar o atual nível de desenvolvimento da tecnologia abordada. Na pesquisa a impressão 4D é uma evolução da impressão 3D, na qual materiais especiais são utilizados para imprimir objetos que mudam sua forma após a produção, a partir de um gatilho que pode ser temperatura, umidade, radiação, correntes de ar e outras formas de energia.

A diferença entre a quantidade de depósitos de patentes e a quantidade de artigos (3 vezes maior) demonstra que a tecnologia de impressão 4D ainda está praticamente em pesquisa e desenvolvimento por universidades e empresas do setor como a Stratasys, fabricante de sistemas de produção 3D. Os produtos e as contribuições da empresa para o setor incluem uma enorme variedade de soluções, muitas das quais são conceitos inovadores de última geração dentro da indústria. No entanto, somente em 2013 iniciaram os primeiros depósitos de patentes e os primeiros trabalhos publicados na área. A partir de 2017, houve um grande crescimento no número de pesquisas e as universidades e institutos de pesquisa têm sido aliados importantes para o desenvolvimento dos estudos sobre a tecnologia de impressão 4D, principalmente na China e Estados Unidos.

A área da Ciência de Materiais tem recebido as maiores contribuições desta tecnologia, uma vez que a mesma visa a construção de modelos a partir do conceito de adição de matéria ou manufatura aditiva, podendo esta ser aplicada futuramente a várias outras áreas, em especial, as ciências médicas e arquitetura. Para tanto, é importante a difusão desse conhecimento para as diversas áreas, as quais a tecnologia tem potencial para ser utilizada. Diversos países foram identificados neste mapeamento no que se refere a publicação de artigos, porém a maioria das pesquisas encontram-se incipientes.

Acredita-se que a cooperação de esforços entre as instituições que mais publicam artigos

científicos, como o Instituto de Tecnologia da Geórgia (Estados Unidos), as instituições que mais depositam patentes, como o Instituto de Tecnologia de Harbin (China) e as empresas que são líderes no setor de produção 3D, como Stratasys e Autodesk, seja um ponto de partida essencial para acelerar o processo de desenvolvimento da tecnologia.

Contudo, espera-se que a impressão 4D leve menos tempo para se tornar comum, tornando sua aplicação viável, diferentemente da impressão 3D, que apesar de ter se popularizado recentemente, surgiu há mais de 30 anos.

REFERÊNCIAS

CAMPBELL, T. A.; TIBBITS, S.; GARRETT, B. **The Next Wave: 4D Printing - Programming the Material World**. Washington: Atlantic Council, 2014.

CHOI, J. et al. 4D Printing Technology: A Review. **3D Printing and Additive Manufacturing**, v. 2, n. 4, p. 159-167, dez. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0039>>. Acesso em: 21 jul. 2019.

GE, Q. et al. Multimaterial 4D Printing with Tailorable Shape Memory Polymers. **Scientific Reports**, v. 6, ago. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/srep31110>>. Acesso em: 21 jul. 2019.

GLADMAN, A. S. et al. Biomimetic 4D printing. **Nature materials**, v. 15, p. 413-418, jan. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/nmat4544>>. Acesso em: 22 jul. 2019.

JACOBSEN, M. Clearing the Way for Pivotal 21st-Century Innovation. In: AMBROSE, D.; STERNBERG, R. J. (Org.). **Giftedness and Talent in the 21st Century**. Rotterdam: SensePublishers, 2016. cap.10, p. 163-179.

JUNG, J. P.; BHUIYAN, D. B.; OGLE, B. M. Solid organ fabrication: comparison of decellularization to 3D bioprinting. **Biomaterials Research**, v. 20, n. 27, ago. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40824-016-0074-2>>. Acesso em: 22 jul. 2019.

KHADEMHOSEINI, A.; LANGER, R. A decade of progress in tissue engineering. **Nature Protocols**, v. 11, n. 10, p. 1775-1781, set. 2016. Disponível em: <<http://doi.org/10.1038/nprot.2016.123>>. Acesso em: 23 jul. 2019.

KHOO, Z. X. et al. 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 10, n. 3, p. 103-122, out. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1097054>>. Acesso em: 22 jul. 2019.

MOMENI, F. et al. A review of 4D printing. **Materials and Design**, v. 122, p. 42-79, mai. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.068>>. Acesso em: 21 jul. 2019.

PEI, E. 4D Printing: dawn of an emerging technology cycle. **Assembly Automation**, v. 34, n. 4, p. 310-314, set. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1108/AA-07-2014-062>>. Acesso em: 21 jul. 2019.

TAYLOR, D. L.; PANHUIS, M. Self-Healing Hydrogels. **Advanced Materials**, v. 28, n. 41, p. 9060-9093, nov. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/adma.201601613>>. Acesso em: 25 jul. 2019.

TIBBITS, S. The emergence of "4D printing". **TED conference**, fev. 2013. Disponível em: <https://www.ted.com/talks/skyilar_tibbits_the_emergence_of_4d_printing>. Acesso em: 21 jul. 2019.

TIBBITS, S. 4D Printing: Multi-Material Shape Change. **Archit Design**, v. 84, n. 1, p. 116-121, jan. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/ad.1710>>. Acesso em: 23 jul. 2019.

TIBBITS, S. et al. 4D Printing and Universal Transformation. In: **Proceedings of the 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture**. Los Angeles: Acadia 2014 Design Agency, 2014. p. 539-548

WHITESIDES, G. M.; GRZYBOWSKI, B. Self-Assembly at All Scales. **Science**, v. 295, n. 5564, p. 2418-2421, mar. 2002. Disponível em: <<http://doi.org/10.1126/science.1070821>>. Acesso em: 21 jul. 2019.

ZAREK, M. et al. 4D Printing of Shape Memory-Based Personalized Endoluminal Medical Devices. **Macromolecular Rapid Communications**, v. 38, n. 2, jan. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/marc.201600628>>. Acesso em: 21 jul. 2019.