

SIIMI/2020

VII simposio internacional de
innovacion en medios interactivos
VII simpósio internacional de
inovação em mídias interativas
VII international symposium on
innovation in interactive media



Matéria programável e arte

Programmable matter and art

Daniel Seda¹

Resumo

O artigo apresenta o conceito de programação da matéria e discute a aplicação deste conceito dentro do campo da arte partindo da pesquisa de criação artística desenvolvida pelo autor. Esta pesquisa estabelece uma comparação entre algumas técnicas de criação de origamis cinéticos e certas características de estruturas mecânicas como autômatos. O foco do artigo é sistematizar alguns pensamentos e idéias e recolher subsídios para alimentar a criação, em andamento, de um sistema de matéria programável fazendo uso de tecnologias de baixo custo.

Palavras-chave: origami, robótica, autômatos, programação, reciclagem

Abstract

This article brings the concept of programmable matter and the application of this concept within the field of art based on the artistic creation research developed by the author. This research establishes a comparison between some techniques for creating kinetic origami and certain characteristics of mechanical structures such as automata. The focus of the article is to systematize some thoughts and ideas and collect subsidies to feed the creation, in progress, of a programmable material system using low cost technologies.

Keywords/Palabras clave/Mots clefs: origami, robotics, automata, programming, recycling.

Introdução

Este artigo é um ensaio sobre o conceito de matéria programável aplicado ao meu processo de criação artística. Aqui são apresentadas algumas pesquisas e conceitos que vêm informando a minha própria pesquisa prática em criação de estruturas físicas passíveis de programação ou matérias programáveis.

Durante a minha pesquisa de mestrado enquanto experimentava com algumas técnicas de criação de origamis percebi semelhanças entre características de modelos de origamis cinéticos e as estruturas dos autômatos. Inspirado por estas semelhanças

¹ Daniel Seda é doutorando pelo Programa de Pós Graduação em Artes da UNESP, ingressante em 2019. Mestre em Artes Visuais pelo mesmo PPGA-UNESP com a dissertação Origami e Robótica - Do Plano ao Tridimensional, 2018. Bacharel em Educação Artística pela Unicamp, 1998. É artista multimídia, educador e escritor.

formais um tanto vagas estabeleci um princípio de hipótese partindo da suspeita de que ambos os modelos cinéticos, origamis e autômatos, poderiam ser descritos por uma teoria única. Venho chamando este esboço de teoria de programação da matéria ou de matéria programável.

Matéria programável é um conceito que ainda não possui uma definição precisa mas genericamente pode-se afirmar que a matéria programável consiste em uma estrutura física com a capacidade de mudar de forma para cumprir funções específicas. Esta definição é ampla o suficiente para descrever inúmeras estruturas tanto oriundas do mundo natural quanto criações humanas, artificiais, sejam elas físicas, teóricas ou ficcionais. Este artigo irá passear de modo descompromissado entre elas mantendo um foco na possibilidade de que possam informar o meu próprio processo de desenvolvimento de alguma variação autoral deste conceito. Alguns exemplos da aplicação deste conceito na arte também serão apresentados e esta mudança de função decorrente da alteração na forma poderá ser predominantemente estética ou conceitual. Além de informar o meu próprio processo de criação este texto também pode ser útil a outros interessados em arte eletrônica, programação ou simplesmente ser um meio de divulgação científica destas teorias e práticas para o público em geral.

Dos Autômatos Celulares à Matéria Programável

A origem do conceito se confunde com o início da ciência da computação. A idéia de que a matéria pode ser programada para realizar uma função surge dentro do panorama científico do Século XX quando John Von Neumann teoriza em 1948 sobre uma máquina autoreplicante. Esta máquina seria capaz de construir uma réplica também autoreplicante. Von Neumann cria ainda na década de 40, portanto, o modelo de uma matéria programada com potencial de replicação. Devido à impossibilidade tecnológica do momento em que foi proposta tal idéia só começa a ser retomada no fim do século. A partir desta impossibilidade Von Neumann se dedica a criar um modelo teórico de tal máquina partindo de uma sugestão de Stanislaw Ulam.

According to received wisdom, it was the Polish-American mathematician Stanislaw Ulam who suggested to von Neumann that he should try constructing his self-replicating automaton using the conceptual framework of what are now known as cellular automata.

(SCHIFF, 2006)

Com esta proposta teórica Von Neumann se torna o primeiro cientista da computação a propôr algum modelo computacional com regras que permitiriam uma transformação autônoma, generativa dos elementos dentro deste modelo. A aplicação real desta idéia só vai acontecer e se desenvolver em meados dos anos 60 quando o desenvolvimento dos computadores permite o surgimento das CAM, Cellular Automate Machines. Máquinas de autômatos celulares são mecanismos de simulação computacional onde cada ponto de uma rede pode assumir certas propriedades variáveis. Cada ponto varia ou não sempre em relação aos pontos imediatamente vizinhos a si mesmo. A idéia foi popularizada durante os anos 70 através de um destes modelos criado por John Conway, o Jogo da Vida. É um jogo onde o único movimento do jogador é lançar as primeiras peças dentro de uma simulação computacional composta por um tabuleiro bidimensional que pode se estender ao infinito com casas de mesmo tamanho. O jogo pode ser feito de forma simulada em um computador ou de forma real usando um papel quadriculado e um lápis e borracha. Foi criado inicialmente em um tabuleiro de Go. Suas regras são simples e dão uma boa idéia

de como funcionam os autômatos celulares. No Jogo da Vida há o tempo e o estado das células, que varia com o tempo. A simulação começa com um dado estado de células cheias e de células vazias. Quem escolhe qual está de que maneira é o jogador. Conforme o tempo passa a simulação muda de estado e a cada instante cada célula permanece viva (cheia), morre (fica vazia) ou dá origem a outras células que se tornam cheias. Uma célula vazia se torna cheia caso esteja cercada por exatamente 3 de suas 8 vizinhas. Cada célula permanece viva pra próxima geração se 2 ou 3 de suas vizinhas estiverem vivas, qualquer outro estado ela morre. É como se uma célula sozinha morresse de solidão e mais de três células morressem de superpopulação. Depois que o estado inicial é escolhido pelo operador essas mesmas regras são aplicadas de novo e de novo a cada geração. Autômatos celulares podem ser especificamente programados para testar hipóteses em pesquisas, simular o comportamento de partículas, de cardumes, de insetos, etc. A criação destes modelos e sua pesquisa mostra que complexos ecossistemas podem surgir a partir de regras simples e isto também ajuda a entender tamanha diversidade na biologia e na natureza em geral sem fazer uso de nenhum conceito metafísico, partindo apenas de uma dada estrutura inicial arbitrária e de regras para as relações entre elas. No Jogo da Vida surgem, neste tabuleiro infinito e a partir de estados randômicos, estruturas que se deslocam, estruturas que disparam outras, que dão origem a outras formas de maneira periódica mas também acontecem estruturas que se conformam e permanecem estáveis, mortas.

Além de Conway outros cientistas propuseram modelos de autômatos celulares entre eles a dupla Margolus e Toffoli que em 1990 publica um artigo trazendo pela primeira vez a expressão Matéria Programável. Neste artigo eles expandem o conceito e imaginam como seria criar algo similar porém com muito mais resolução do que os modelos até então criados. O artigo *Programmable Matter: Concepts and Realization* tem por abstract simplesmente a seguinte frase: "*This paper is a manifesto, a brief tutorial, and a call for experiments on programmable matter machines.*" Apesar do nome promissor a estrutura que o artigo descreve como matéria programável ainda é apenas uma estrutura computacional capaz de simular o comportamento de partículas reais muito melhor do que qualquer outra Máquina de Autômatos Celulares até então. A matéria programável no sentido que me interessa para minha pesquisa surge apenas em 1994 com S. C. Goldstein.

(...) programmable matter is defined as a cyber-physical conjugation: "[...]programmable matter will allow us to take a (big) step beyond virtual reality, to synthetic reality, an environment in which all the objects in a users environment (including the ones inserted by the computer) are physically realized." (BOURGEOIS et al., 2019)

E em 2006 um outro artigo de Goldstein descreve essa matéria como sendo um material físico composto de um grande número de dispositivos submilimétricos com capacidade de processamento e sensores. A matéria programável ideal portanto seria uma matéria reconfigurável, composta de unidades programáveis e reprogramáveis com o potencial de assumir qualquer forma no mundo real. Um sistema destes com a resolução ideal seria algo como o T-1000, o robô fluido da sequência de O Exterminador do Futuro. Curiosamente este filme foi lançado em 1991², um ano depois da escrita do artigo de Toffoli e Margolus embora antes de sua publicação em 1993. Esta coincidência de datas me leva ao questionamento se o roteirista do filme teve acesso ao artigo ainda inédito ou se de algum modo entrou em contato com a idéia. Nada impede porém que

² <<https://www.imdb.com/title/tt0103064/>> Consultado em 30/10/2020

ambos apenas tenham apenas captado o espírito da época dentro da efervescência gerada pela rápida expansão dos computadores pessoais nas décadas de 80 e 90.

O mesmo C. S. Goldstein alguns anos depois dá início ao projeto Claytronics em uma tentativa de realizar esta ambição. O projeto Claytronics passa a ser desenvolvido em uma parceria entre Harvard e a Intel mas apesar de ambicioso não apresenta resultados públicos há alguns anos.

As pesquisas que mais de aproximam de uma matéria programável surgem dentro do laboratório de inteligência artificial do MIT, o CSAIL. Existem pelo menos dois projetos liderados por Daniela Rus e que dialogam com a proposta de matéria programável. Um deles desenvolve uma abordagem inspirada nos origamis rígidos, herdeira da tradição iniciada pela dobra Miura, para criar superfícies que podem ser mapeadas e ativadas magneticamente para gerar topologias específicas.

A técnica de aplicar métodos de origami em superfícies e materiais não-dobráveis foi proposta em um artigo de Koryo Miura em 1985. A missão de Miura era desenvolver uma forma de levar para o espaço grandes estruturas de painéis solares articuladas e dobráveis. Miura cria esta dobra específica que aplicada em uma superfície torna ela capaz de ser aberta e fechada com o mínimo de energia e apenas dois pontos de apoio. Os painéis retráteis assim desenvolvidos serviram para equipar a sonda Space Flyer lançada ao espaço 10 anos depois em uma missão de um ano. A dobra miura também popularizou a idéia de origami rígido: aplicar a técnica do origami a materiais laminares não flexíveis. O origami rígido vai inspirar algumas pesquisas do CSAIL-MIT e parece ser a técnica mais bem sucedida até agora de criar alguma matéria programável.

O outro projeto do mesmo laboratório desenvolve uma abordagem modular. Composta por pequenos blocos magnéticos que estão mais próximos da proposta original de matéria programável lançada por C. S. Goldstein, embora esta pesquisa não tenha nenhuma relação com este autor. A pesquisa do MIT gera, em 2014, os M-Blocks um dos projetos mais bem sucedidos até agora dentro desta tentativa de criar uma matéria programável modular no mundo real. Composta de cubos com arestas parcialmente magnéticas, sem nenhuma parte móvel externa e com motores internos capazes de gerar momentum, estes cubos giram para produzir deslocamento e se conectam a outros construindo formas no mundo real como se fossem minúsculas peças de lego robóticas.

Matéria Programável na Criação Artística

Um outro artigo seria necessário apenas para analisar a linha evolutiva que surge a partir da publicação da Pneumática de Heron de Alexandria. Este livro sintetiza o conhecimento grego sobre autômatos e permanece como influência perene durante o desenvolvimento da cultura árabe a partir de sua tradução pela Casa do Saber. Engenheiros árabes como os irmãos Banu Musa, no século 9 e Al Jazari nos séculos 12 e 13 se inspiram no livro para criar os seus próprios autômatos em geral funcionais como relógios de água mas ainda assim peças de incrível beleza. Outro artigo poderia ser dedicado ao desenvolvimento praticamente autônomo dos karakuri, ou o autômato japonês. Aqui deixo apenas registrado que sua origem no século 17 se deve à engenharia reversa realizada por Takeda Omi, dono de um teatro de bonecos, em um relógio holandês ao qual teve acesso.

De volta à criação artística no século 20, a arte é pioneira no desenvolvimento de sistemas de programação da matéria. Primeiro com os origamis inspirando a criação da dobra Miura em 1985. E depois com as obras de Theo Jansen a partir de 1990. As esculturas de Theo Jansen são uma realização que se aproxima dos autômatos gregos e árabes. Sua série de esculturas cinéticas produz deslocamento espacial a partir da

captação da energia eólica disponível no ambiente em que são deixadas. A energia eólica é captada e conduzida a um eixo que ao girar produz a mudança de forma em pernas articuladas sendo finalmente convertida no deslocamento físico de toda a estrutura. A função de cada parte da estrutura está intimamente ligada à articulação entre estas partes. A introdução de energia no sistema provoca o movimento. Os Strandbeests, como são chamados, começam a serem desenvolvidos a partir de 1990 e desde então seguem sendo desenvolvidos e incrementados pelo artista que planeja dar-lhes cada vez mais autonomia de comportamento. Theo Jansen pretende que seus Strandbeests sejam formas de vida artificiais.

No final da década, em 1999³ o artista Daniel Rozin começa a desenvolver uma série de obras eletrônicas interativas que oferecem uma versão artística aproximada do conceito de matéria programável. Na primeira obra da série de espelhos interativos uma matriz de "pixels" formada por blocos de madeira reproduz ao vivo uma versão em baixa resolução da imagem do visitante que se coloca diante da obra. A imagem captada por uma câmera instalada no meio da obra é traduzida em blocos de madeira que giram no eixo horizontal. A luz instalada sobre a obra amplia o efeito transformando os blocos de madeira em uma tela de pixels físicos. A mudança de posição de cada bloco individualmente gera uma mudança na imagem que é vista pelo visitante e interator. Esta obra é apenas o início de uma longa série de espelhos interativos feitos com os mais diferentes materiais. A série já seria impressionante por si mesma mas o fato de ter sido iniciada antes do advento do Arduino, hardware aberto que facilitou a criação de obras interativas a partir de 2005, a torna ainda mais digna de admiração.

No campo da escultura cinética analógica, não eletrônica, está o trabalho do artista sueco Erik Aberg. Suas esculturas são compostas de módulos que se articulam e mudam de posição relativa gerando um todo que funciona como um origami se dobrando e desdobrando. Segundo o próprio:

A GHOSTKUBE is a sculpture inspired by moving origami. It consists of cubes connected in a three-dimensional structure. You can manipulate it to change shapes in different ways. It is made from a system of pieces that lock together. When you want to try another design, you simply take it apart and build a different one using the exact same pieces.⁴

O projeto de Aberg começa a ser desenvolvido em 2010 e precisou de anos de pesquisa para atingir a forma em que foi lançado numa plataforma de crowdfunding em 2018.

Curiosamente o brasileiro Jo Nakashima criou no ano seguinte uma série de obras de origamis modulares que se assemelham ao movimento das esculturas de Aberg. Com a diferença que, seguindo a tradição do origami, o projeto de Nakashima é de código-aberto e alguns tutoriais de como construir seus cubinhos articulados de papel estão publicados em seu canal no Youtube⁵ permitindo a qualquer pessoa refazê-los de maneira simples e barata. Nakashima publica regularmente em seu canal no Youtube diversos tutoriais de seus origamis autorais, alguns deles de peças modulares que podem ser associadas à noção de matéria programável. E ainda dentro da técnica e arte do origami, a pesquisadora brasileira Thais Ueno Yamada usa a própria dobra Miura

³ <<https://www.smoothware.com/danny/woodenmirror.html>> Consultado em 30/10/2020

⁴ <<https://www.kickstarter.com/projects/ghostkube/ghostkube>> Consultado em 30/10/2020

⁵ <<https://jonakashima.com.br/>> Consultado em 30/10/2020

para criar painéis dobráveis feitos de lâminas de bambu. Os resultados de sua pesquisa foram publicadas em sua tese de doutorado em 2016.

Imaginando Modelos de Matérias

Dentro da minha investigação teórica e prática sobre o tema comecei a pensar em como seria possível criar algum tipo de matéria programável mas partindo de um sistema relativamente simples e de baixo orçamento. Dentre os inúmeros exercícios de criação de modelos mentais que tenho pensado creio ter ao alcance um modelo que me parece promissor.

Imaginemos que seja possível uma matéria física potencialmente generativa. Por generativa aqui entenda-se um sistema de unidades capazes de se recombinarem e permanecerem em movimento alterando assim a sua própria forma. Digamos que estas unidades consigam permanecer fazendo isso enquanto houver energia disponível no sistema. Neste exercício por enquanto apenas conceitual existem dois tipos de módulos: baterias e motores. Em ambos os módulos os elementos estão encaixados no centro de uma estrutura em formato de um X. Não necessariamente é uma estrutura rígida, ela pode ser maleável. Cada módulo destes, com 4 braços, pode ser conectar com até dois outros módulos uma vez que cada conexão será feita com 2 fios que irão colocar a energia em movimento entre ambos. Os módulos bateria encaixam apenas nos módulos motor mas o módulo motor pode se conectar com outros motores. O movimento só acontece caso algum destes motores esteja conectado a um módulo bateria. O sistema seria projetado para permitir que os módulos motores possam transmitir a energia da bateria para outros módulos motores conectados. A cada conexão os motores ficariam mais fracos ao usar a mesma bateria mas o sistema seria projetado para o contrário, quanto mais módulos conectados, mais fortes os movimentos dos motores mesmo que com isso a energia disponível acabe mais rápido. Todos esse módulos ficam soltos em uma caixa transparente. A energia inicial é posta no sistema por um agente humano sacudindo a caixa ou por algum motor conectado à caixa que promova movimentos abruptos. Para que a conexão aconteça de modo aleatório nos pontos de encaixe serão posicionados ímãs. Os ímãs aliados à forma do encaixe mantêm a conexão porém quando o movimento torna-se muito forte os ímãs se soltam desagregando a estrutura e permitindo um novo começo. Minha intuição é que se houver módulos suficientes o sistema pode permanecer em movimento enquanto houver energia nas baterias, após um único movimento inicial.

Este experimento encontra-se em fase de modelagem teórica e possivelmente alguma experiência neste sentido deverá ser colocada à prova antes do final nesta pesquisa. Até sua realização outros formatos e modos de encaixes poderão ser pensados.

Conclusão

Todas estas pesquisas artísticas e científicas vêm me inspirando e me informando quanto a possibilidade de algum modelo de matéria programável, ou algo semelhante, ser criado a partir de materiais baratos e publicado num formato de código aberto. Antes da proposta de uma matéria programável autoral no entanto é preciso evocar a estrutura computacional fundadora de nossa época, a Máquina de Turing, modelo computacional universal que pode ser atualizado de inúmeras formas. A Máquina de Turing consiste em um método de leitura e de escrita de informações, uma máquina de computação universal teórica construída com algumas regras: há uma fita infinita que pode deslizar para os dois lados, há uma cabeça com capacidade de gravar 0 ou 1 na fita e essa cabeça também pode armazenar alguns modos diferentes de agir. De modo que

cada vez que a cabeça age a informação na fita pode ser lida, escrita ou reescrita. A combinação de vários módulos com esse funcionamento básico gera qualquer informação digital caso haja módulos em número o suficiente.

Agora proponho um exercício de imaginação. Vamos imaginar que o mundo inteiro possa ser encarado como uma Máquina de Turing potencial. Dentro dela podemos criar regras arbitrárias onde ao invés de uma fita infinita há o espaço com seus objetos, ao invés de casas com potencial de serem 0 ou 1 temos objetos que podem mudar de estado e no lugar de uma cabeça que atualiza a informação temos qualquer operador capaz de fazer um objeto mudar de estado seja este operador humano, animal ou máquina. Esse sistema pode ir ligando e desligando objetos no mundo real e se estes objetos forem capaz de estabelecer relações entre si, você pode ter no mundo uma espécie de grande computador analógico.

A idéia do mundo inteiro como um computador é apresentada de maneira satírica na série Guia do Mochileiro das Galáxias onde a Terra inteira seria um computador projetado por uma espécie multidimensional que nos estuda sob a forma de ratos de laboratório. Este modelo também ecoa a percepção de que uma matéria programável ideal seria indistinguível de uma forma viva.

De maneira geral matéria programável seriam estes objetos com potencial de mudança de forma de acordo com a função desejada. Quando aplicamos esse conceito ao longo da história começamos a encontrar matérias programáveis analógicas ao longo de toda a história da engenharia, da arte e do design. Uma simples cadeira de praia se encaixa dentro deste conceito bem como qualquer guarda-chuva comum. Ambos objetos possuem dois estados que poderíamos chamar de ligado/desligado ou operacional/arquivado, etc. De acordo com a função desejada para o momento o objeto tem a sua forma alterada para interagir com um operador humano. Novamente me vem a questão incômoda de que um conceito tão amplo pode acabar não sendo útil para nada. Então qual seria a vantagem de aplicar um conceito oriundo da ciência da computação a objetos analógicos? Uma primeira vantagem seria poder estender o pensamento computacional para o mundo físico trazendo junto com ele todas as possibilidades das linguagens de programação. Esse conceito pode ser útil neste momento pós-digital onde depois de o mundo inteiro ser digitalizado o computador começa a ser incorporado por objetos do mundo real a partir da inserção de placas de uso genérico como Arduino, ESP8266 ou outras placas específicas conectadas com dispositivos de entrada (sensores de todos os tipos) e de saída (motores, luzes, câmeras, dispositivos de som, etc). Ao mesmo tempo em que o computador na forma de circuitos eletrônicos é incorporado nos diversos objetos reais a maneira de pensar digital passa a ser aplicada na realidade. Deste modo expande-se o conceito de robótica, em geral aplicado a objetos únicos, e obtém-se uma robótica incorporada potencialmente a qualquer espaço podendo incluir todos os objetos dentro deste espaço. Este tipo de expansão também pode ser chamada de *cybermatics*.

O potencial de programação da matéria do mundo real de um ponto de vista *cybermático* vem sendo explorado por toda parte há décadas e isto abrange desde as portas que abrem sozinhas, luzes que acendem a um bater de palmas até potenciais revestimentos acústicos modulares em salas de espetáculo que poderiam ser usados para um controle mais preciso e adequado para cada atividade ali realizada.

É essa possibilidade de escrever regras de transformação da matéria sob vontade que estou chamando de programação da matéria. Esta transformação pode ter um caráter de mudança de forma, cor ou função. Pode ser aplicada em diversos tipos de matéria, viva ou inanimada, e pode ou não ter o auxílio de eletricidade mas certamente faz uso de alguma energia para criar movimento. É uma matéria modelável pelas mãos e a vontade humanas ou manipulável por motores ou reações químicas. Uma robótica expandida, incorporada nas coisas e controlável. Robótica das coisas mas sem

necessariamente ser eletro-eletrônica expandindo metaforicamente o conceito de robótica para sistemas mecânicos que possam ter sua forma alterada de acordo com a função a ser realizada em um dado momento. O horizonte último da matéria programável pode ter pelo menos dois modos. Um é o robô: sistema cibernético pluripotente e servil, submisso à vontade humana. O outro é a própria matéria viva enfim programável. Ao invés de máquinas, sistemas biológicos. A consequência da edição de genes a partir da aplicação da técnica CRISPR mas em níveis exponenciais.

Um exemplo deste último modelo se encontra no livro de Harry Harrison, *A Oeste de Éden*. Na saga de ficção científica os dinossauros ao invés de se extinguirem evoluem inteligência e desenvolvem uma tecnologia biológica avançada que permite a esta espécie de largetos viajar em navios submarinos que na verdade são imensos seres marinhos transformados via tecnologia biológica.

Termino com duas citações que dialogam entre si e com tudo o que foi apresentado neste artigo. A primeira delas é um pensamento de Alan Kay, um dos principais cientistas da computação:

1. Matter can be made to remember, discriminate, decide and do
2. Matter can remember descriptions and interpret and act on them
3. Matter can hold and interpret and act on descriptions that describe anything that matter can do.⁶

E a outra de pesquisadores brasileiros ligados ao CESAR, centro de pesquisa brasileiro:

At a time when some of the world's top scientific minds believe that the universe including all things, inanimate or alive, are not only based on code but are indeed code, running on apparently different platforms but, all in all, most probably based upon the same basic set of universal constructs, we can't avoid starting to think things of all sorts as information systems. (MEIRA; BURÉGIO; BORBA, 2016)

Referências

ALEJANDRIA, Herón De. Neumática. [s.l: s.n.].

BERTALANFFY, Ludwig Von. Teoria Geral dos Sistemas. Petrópolis.

GOLDSTEIN, SETH COPEN; LEE, PETER; SMITH, JONATHAN; WAGNER, Tom. Realizing Programmable Matter (DARPA). DARPA ISAT Study, [S. l.], 2006.

GOLDSTEIN, S. C.; MOWRY, Todd. Claytronics: An instance of programmable matter. Wild and Crazy Ideas Session of ASPLOS, Boston, MA, October, [S. l.], v. 17, p. 2003–2003, 2004. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.61.1786&rep=rep1&type=pdf>.

⁶ Alan Kay, It is all about the triple whammy of computing. *apud* Mark Guzdial in

<https://computinged.wordpress.com/2010/05/24/the-core-of-computer-science-alan-kays-triple-whammy/>

HIMANEN, PEKKA;CASTELLS, MANUEL;TORVALDS, Linus. The hacker ethic, and the spirit of the information age. New York: Random House Trade Paperbacks, 2001.

MEIRA, Silvio; BURÉGIO, Vanilson; BORBA, Paulo. Programming the Universe : The First Commandment of. Proceedings of the 30th Brazilian Symposium on Software Engineering (SBES '16), [S. l.], p. 153–156, 2016. DOI: 10.1145/2973839.2982567. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1609.07818>.

NADARAJAN, Gunalan. Islamic Automation: A Reading of al-Jazari's The Book of Knowledge of Ingenious Mechanical Devices (1206). Foundation for Science Technology and Civilisation, [S. l.], n. August, p. 1–16, 2007.

ROMANISHIN, John W.; GILPIN, Kyle; RUS, Daniela. M-blocks: Momentum-driven, magnetic modular robots. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, [S. l.], p. 4288–4295, 2013. DOI: 10.1109/IROS.2013.6696971.

S., Kuhn. Thomas. Comentários sobre a relação entre ciência e arte. *In: A Tensão Essencial*. [s.l: s.n.]. p. 361–373.

SCHIFF, J. L. Introduction to Cellular Automata. **Seminar "Organic Computing"**, [S. l.], p. 226, 2006. DOI: 10.1007/978-1-84996-217-9_1.

HAWKES, E.; AN, B.; BENBERNOU, N. M.; TANAKA, H.; KIM, S.; DEMAINE, E. D.; RUS, D.; WOOD, R. J. Programmable matter by folding. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, [S. l.], v. 107, n. 28, p. 12441–12445, 2010. DOI: 10.1073/pnas.0914069107.

NISHIYAMA, Yutaka. Miura folding: Applying origami to space exploration. International Journal of Pure and Applied Mathematics, [S. l.], v. 79, n. 2, p. 269–279, 2012.

MIURA, K. Method of packaging and deployment of large membranes in space. The Institute of Space and Astronautical Science report, 1985. Disponível em: <http://ci.nii.ac.jp/naid/110000029131/>.

ROMANISHIN, John W.; GILPIN, Kyle; RUS, Daniela. M-blocks: Momentum-driven, magnetic modular robots. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, [S. l.], p. 4288–4295, 2013. DOI: 10.1109/IROS.2013.6696971.

ROTHERMUND, Paul W. K. Folding DNA to create nanoscale shapes and patterns. Nature, [S. l.], v. 440, n. 7082, p. 297–302, 2006. DOI: 10.1038/nature04586.

TOLLEY, Michael T.; FELTON, Samuel M.; MIYASHITA, Shuhei; AUKES, Daniel; RUS, Daniela; WOOD, Robert J. Self-folding origami: Shape memory composites activated by uniform heating. Smart Materials and Structures, [S. l.], v. 23, n. 9, 2014. DOI: 10.1088/0964-1726/23/9/094006.