

# ROBÓTICA E NANOTECNOLOGIAS: IMPACTOS TECNOLÓGICOS E SUAS RUPTURAS SOCIAIS

*Daniel Albiero*

## INTRODUÇÃO

Neste capítulo pretendemos dar uma ideia sobre robótica e nanotecnologias, tanto do ponto de vista técnico-científico como social-filosófico. Faremos uma tentativa para diminuir a ‘aridez’ desses assuntos em termos de palavreado científico e conceitos técnicos, no entanto não os eliminaremos totalmente, pois senão correremos o risco de limitar o assunto no que ele tem de mais interessante: o estado da arte da atual conjuntura do desenvolvimento técnico-social da humanidade. O objetivo do texto é apresentar os conceitos, desafios e perigos de forma clara e simples, sem rodeios ou passeios por emaranhados de teorias, cálculos, projetos, sistemas e processos.

Quando conceitos mais ‘espinhosos’ se apresentarem, usaremos a abordagem didático-construtivista. Nesse ponto, precisamos fazer uma ressalva: em robótica e nanotecnologia, a maioria do conhecimento é produzido em língua inglesa. Por exemplo, em uma rápida pesquisa no Google em 16 de abril de 2018 usando-se a palavra-chave ‘robótica’ foram encontradas  $5,94 \cdot 10^6$  páginas (desconsiderando a qualidade desse material). Já para a palavra ‘robotics’ foram encontradas  $64,90 \cdot 10^6$  páginas, ou seja, no Google há 10 vezes mais informação em inglês sobre robótica do que em português e espanhol.

Se usarmos um *finder* científico, como o **ScienceDirect** (2018), que é disponibilizado pela Capes para as universidades, percebemos que a língua inglesa é mais utilizada ainda. Usando essa plataforma

encontramos, para a palavra-chave ‘robótica’, 2.684 artigos científicos, e para ‘robotics’, 180.255 artigos, sem juízo de valor quanto ao valor intrínseco do conhecimento que é apresentado neles. Ou seja, em termos científico-tecnológicos existe 67 vezes mais conhecimento em inglês do que em português e espanhol juntos. Em relação à nanotecnologia o panorama é o mesmo.

Essa discussão é pertinente por dois motivos: primeiro, porque se a língua hegemônica para se escrever sobre robótica e nanotecnologia é o inglês, devemos conhecer os termos em inglês sobre esses temas. Vou dar um exemplo: em robótica existe um conceito chamado ‘robôs *swarm*’, termo que traduzido para o português quer dizer ‘robôs enxame’. O fato é que na área de robótica os especialistas e simpatizantes não escrevem ‘robôs enxame’, mas algo como ‘estes robôs *swarm* são muito bons’. Esse fato se repete em qualquer língua. Um especialista em robótica paraguaio escreveria, por exemplo: ‘*estos robots swarm son muy Buenos*’.

Em um contexto educacional, esse fato pode ser uma ótima oportunidade para um ensino transdisciplinar entre Física, Química, Matemática, Biologia, Literatura, Filosofia, Sociologia e Língua Inglesa, pois como os termos em inglês são amplamente utilizados nessas áreas, facilmente é possível realizar atividades e processos educacionais transversais pelos(as) professores(as) de Ciências e as(os) de Inglês e Literatura com foco em robótica e nanotecnologia.

Segundo motivo, é preciso diferenciar em robótica e nanotecnologia o que é ‘conhecimento’ do que é ‘informação’. Isso é essencial, pois muita gente confunde esses conceitos e por isso verdadeiros descabros são escritos e divulgados. Principalmente no Google, nas 70 milhões de páginas sobre *robotics*/robótica você vai encontrar desde teorias conspiratórias até conceitos completamente errados – tudo divulgado como se fosse a última palavra sobre o assunto.

Para esclarecer um conceito não técnico, sempre procuro a origem da palavra (etimologia) que o define. Como as línguas são muito antigas, ricas e profundas, para realmente conhecermos seus fundamentos devemos partir da origem de seus termos conceituais. A origem da palavra ‘conhecimento’, por exemplo, está no latim. Ela é a junção de três partes: *com* (junto) + *gnoscere* (conhecer ou saber algo) + *mento* (ação ou ato). Portanto, trata-se da ação de saber ou conhecer algo.

Segundo a filosofia, o conhecimento é sempre subjetivo, pois depende do sujeito, do objeto e principalmente das experiências subjetivas de cada sujeito ao codificar e interpretar a informação. Conhecimento é uma palavra intrínseca ao contexto, que significa o resultado de uma atitude livre e consciente de alguém em saber ou conhecer alguma coisa baseada em dados subjetivos ou não.

A palavra ‘informação’ também vem do latim e é a junção de *in* (dentro) + *formatio* (forma) + *onis* (genitivo do singular), portanto significa ‘dentro da forma de alguma coisa’ e, em geral, é uma ideia. Segundo a ciência da informação, ela pode ser objetiva ou não e é um conjunto organizado de dados ou ideias relativos a um fenômeno.

Dessa contextualização epistemológica podemos concluir que a informação faz parte do conhecimento e que este é muito mais amplo, poderoso e significativo do que aquela. Na relação entre informação e conhecimento não existe a eterna dúvida representada pela alegoria redundante ‘Quem vem primeiro: o ovo ou a galinha?’. Nessa relação a informação sempre vem primeiro e o conhecimento

vem depois, eis então porque aquela é sempre limitada (aos dados e ideias), enquanto este não, pois por meio de informações comuns a vários sujeitos cada um pode gerar saberes inovadores, diferentes entre si, das mais variadas formas. O conhecimento pode até ser tratado como informação, mas em sua origem houve alguém com consciência e liberdade que ‘pensou’ os dados e ideias.

Essa discussão é muito importante, pois em robótica e nanotecnologia ela encerra a principal fonte de confusão filosófica/ideológica da atualidade, fomentada por muitos autores famosos de *best-sellers* que chegam ao cúmulo de afirmar que os dados são tudo, que a era da informação gerará algoritmos e sistemas que facilmente suplantarão a humanidade. Nada mais falacioso, pois todos eles se esquecem de que para ser formado o conhecimento (que realmente importa) precisa essencialmente de um sujeito conscientemente livre, que interprete os dados (informação) subjetivamente para que estes se tornem saberes úteis, o que, repito, é realmente o que interessa.

Esses sistemas artificialmente inteligentes jamais substituirão a humanidade, pois para isso teriam de ser conscientes, livres e subjetivos, o que vai contra o estamento lógico deles. Eles podem ser ou serão muito melhores tomadores de decisões do que nós, mas jamais vão gerar conhecimento, pelo simples motivo de que gerar, processar e usar informação não é e nunca será gerar conhecimento. Esses sistemas, por definição, apenas lidam ou lidarão com informação.

Nesse contexto, este capítulo foi planejado para fornecer os fundamentos e tentar apresentar o estado da arte em robótica e nanotecnologia neste início do século XXI. Navegaremos pelo tormentoso oceano das polêmicas sociais/filosóficas a respeito desses temas e por fim adentraremos com esperança na única estrada segura para o futuro, cada dia mais robótico e nanométrico: a educação. Como últimas palavras desta introdução, é preciso ressaltar ser completamente impossível abordar robótica e nanotecnologia sem fazer interfaces com a biotecnologia e as ciências da informação. Dessa forma, *insights* e conceitos dessas áreas serão abordados na discussão, principalmente quando nos direcionarmos para o futuro.

Alguns dirão que essas quatro áreas do conhecimento são os anjos que levarão a humanidade ao paraíso, outros, que são os quatro cavaleiros do apocalipse. Em uma visão de mundo mais equilibrada, podemos pensar que são na verdade quatro potenciais, que podem ser usados para o bem ou para o mal, tudo muda de repente. Isso não é o importante. Fundamental é ter esperança em fazer um bom ‘negócio’ com o ‘diabo’, como Guimarães Rosa escreveu em sua obra prima, **Grande Sertão: Veredas**: “Tem cisma não. Pense para diante. Comprar ou vender, às vezes, são as ações que são as quase iguais...” (ROSA, 2001, p. 623).

## ROBÓTICA

Houve um tempo em que o homem enfrentou o universo sozinho e sem amigos. Agora ele tem criaturas para ajudá-lo; criaturas mais fortes que ele próprio, mais fiéis, mais úteis e totalmente devotadas a ele. A humanidade não está mais sozinha. (ASIMOV, 1950).

## Fundamentos

A palavra ‘robô’ teve origem na década de 20 do século XX, quando um escritor tcheco de ficção científica (Karel Capek) escreveu uma peça para teatro intitulada R.U.R. (Rosumovi Univerzalni Roboti)<sup>1</sup>. A palavra ‘*roboti*’ é o plural de *robota*, que em línguas eslavas significa ‘trabalho exercido de forma compulsória’ (escravo).

Apesar de a origem da palavra remeter ao século XX, o conceito de um ser autômato construído pelo homem para servi-lo é muito antigo. Na mitologia grega (2.500 a.C) já havia deuses fazendo escravos de bronze para servi-los. Há 2.500 anos os chineses já pensavam nas vantagens de soldados ‘desenvolvidos e construídos’ em massa para formar os exércitos do Rei Amarelo durante sua estadia entediante no túmulo. No ano 1.500 de nossa era Leonardo da Vinci projetou inúmeros engenhos fantásticos, como um leão autômato e um cavaleiro robótico. Enfim, o conceito de robô é muito antigo; nova é a concretização dessa ideia de forma prática, baseada no método científico e lastreada pelos avanços tecnológicos que tornaram viável sua utilização pela humanidade com bom custo/benéfico. Isso já vem ocorrendo há pelo menos 40 anos.

Nesse ponto, é preciso definir o conceito de robô de forma precisa. Trata-se de todo sistema automático que tem capacidade de decisão. Existem outras definições, mas essa me parece a mais abrangente e principalmente, a que se direciona para o real futuro.

Um sistema automático puro não toma decisões. Pensemos, por exemplo, na linha de produção de cerveja em uma grande indústria de bebidas. De um lado entram os insumos, de outro saem as cervejas engarrafadas e prontas para serem comercializadas. Se o sistema estiver adequadamente dimensionado, projetado, regulado, calibrado, fiscalizado e gerenciado, o ser humano não toca em um único botão durante o processo de produção da cerveja, pois o sistema faz tudo sozinho. No entanto, se um único elemento externo gerar uma modificação representativa não prevista pela programação do sistema, este funcionará errado e poderá parar de funcionar.

O gerenciador automático digital do sistema de esterilização das garrafas da linha de produção pode, por exemplo, apresentar um comportamento estranho e imprevisível devido a uma tempestade solar. Esta pode ter enviado para a Terra uma subpartícula atômica que gerou um erro na linha de código do programa, graças a um decaimento em escala de uma partícula *múon* em *pósitrons*. Assim, um semicondutor de germânio, presente em um microchip de memória do gerenciador, em vez de guardar um valor ‘zero’ guardou um valor ‘um’, e isso fez o sistema aumentar a temperatura de esterilização em alguns graus.

Os sistemas de alerta podem não detectar essa falha e, se a detectarem, nenhuma ação humana pode ser tomada. Pode acontecer então de essa pequena variação na temperatura gerar microfissuras nas garrafas que vão gerar concentração de tensões no vidro. No momento em que a garrafa for preenchida, isso poderá ocasionar a ruptura das garrafas. Se tudo isso acontecer em um sistema automático puro, este jamais vai avaliar que as garrafas estão quebrando e muito menos diagnosticar que isso foi ocasionado porque a temperatura de esterilização está alta demais e, principalmente, jamais vai tomar a decisão de diminuir um pouco a temperatura do sistema de esterilização.

Assim, existem três opções para esse sistema puro nesse experimento mental: 1) as garrafas quebrarão uma atrás da outra, sem parar; 2) alguém vai ver o que está acontecendo e vai parar o sistema; 3) o sistema automático identificará que algo muito errado está acontecendo e vai parar a linha de produção (sem saber da quebra das garrafas). Esta última opção não será uma decisão no sentido estrito, mas um sinal de comando de que a programação não está sendo concluída corretamente. Então alguma linha de código que já tinha sido escrita por alguém há muito tempo manda pará-la.

Uma palavra-chave essencial nesse sentido é ‘robótica’, que segundo Siciliano e Khatib (2008) é definida como a ciência que estuda a conexão inteligente entre percepção e ação. De acordo com o livro **Springer Handbook of Robotics**, organizado por esses autores, a ação de um sistema robótico é confiada a um complexo de locomoção para se movimentar no ambiente e/ou um aparato de manipulação para operar objetos onde atuadores animam os componentes mecânicos de um robô. A percepção é extraída de sensores que provêm informações sobre o estado do robô (posição e velocidade) e do ambiente (força, alcance, visão). A conexão inteligente é fornecida por um sistema de processamento digital em que uma programação computacional baseada em uma arquitetura de controle explora a aprendizagem e as habilidades de aquisição de informação por meio de uma lógica definida.

Dessa definição podemos entender que um sistema robótico é algo muito mais avançado e poderoso do que um sistema automático, e podem acreditar: sistemas robóticos já dominam há vários anos muitas áreas da indústria e agora estão adentrando com tudo na agricultura e estão chegando ‘com vontade’ ao setor de serviços. Os ‘cérebros’ desses robôs atuam com uma programação computacional digital avançada e junto a microprocessadores de alto nível são alimentados por *feedbacks* (retroalimentados) provenientes de sensores que ‘sentem’ o ambiente, possibilitando aos robôs ‘pensarem’ com lógicas estocásticas, redundantes ou *Fuzzy*, que os direcionam diretamente para as tecnologias de *Artificial Intelligence* (AI), que em pouco tempo terão potencial quase infinito, os deixando a muitos anos-luz de nossa reles capacidade de processar informação e tomar decisões.

Para muitas pessoas, tal potencial é deveras assustador, pois há uma questão arquetípica de perigo em relação ao alcance de decisões tomadas por uma AI. Muitos livros e filmes de ficção científica se referem exatamente a esta questão: a criatura que supera ou mata o criador. (ASIMOV, 2010). Esse medo é saudável quando nos ‘avisa’ que temos de criar barreiras quanto a esse perigo potencial, mas também pode ser doentio quando gera a ‘tecnofobia’, levando a posições extremistas e teorias conspiratórias. Nesse capítulo o foco é a tecnologia, o desenvolvimento e o potencial da robótica para melhorar a vida da humanidade. Nesse contexto, posso garantir que o medo da robótica é semelhante àquele sentido quando encontramos algo desconhecido; depois que entendemos o que a coisa é e faz, o medo acaba.

Quando pensamos nos fundamentos da robótica temos de considerar um conteúdo multidisciplinar muito intrincado e interativo. Os sistemas robóticos envolvem muitos conhecimentos, que por sua vez tentam resolver muitos desafios práticos referentes à operacionalização de um robô. Segundo Orin, Hager, Chung, Fu e Hsu (*apud* SICILIANO; KHATIB, 2016), os princípios e métodos para o desenvolvimento de sistemas robóticos estão envoltos em cinemática, dinâmica, projeto de mecanismos, sensoriameto, planejamento de movimentos, teoria de controle, programação, arquitetura de sistemas e métodos em raciocínio AI.

É obvio que neste pequeno capítulo me é impossível abordar minimamente esses tópicos. No entanto, tentarei fornecer o início do básico.<sup>2</sup>

Quando consideramos a cinemática, pensamos no movimento dos corpos, cujos principais parâmetros são a distância e o tempo. A cinemática se ocupa, portanto, de corpos em movimento que viajam a velocidade constante ou não (acelerados). Segundo Waldron e Schmiedeler (*apud* SICILIANO; KHATIB, 2016), o movimento das partes do robô deve ser projetado, analisado, controlado e simulado de tal forma que as diferentes posições e orientações de seus meios sejam alcançadas de forma eficiente, e o ambiente para esses estudos é o *workspace* (espaço de trabalho) do robô.

A cinemática robótica se converte em algoritmos aplicados aos mecanismos, e esses sistemas basicamente se referem a conexões e uniões entre corpos rígidos. A combinação entre a orientação e a posição desses corpos rígidos é chamada de ‘pose’. Assim, a cinemática robótica descreve as poses, velocidades e acelerações desses corpos, que compreendem os mecanismos do robô. (WALDRON; SCHMIEDELER *apud* SICILIANO; KHATIB, 2016). A cinemática robótica estuda, dimensiona e projeta isso.

O formalismo da cinemática robótica assenta-se nos cálculos vetorial e matricial. Basicamente, trata-se do estudo da combinação dos corpos rígidos pertencentes a um robô em relação a translações e rotações em bases vetoriais dentro de um *workspace*. Nessa parte do capítulo vou apresentar uma daquelas expressões matemáticas complicadas e enigmáticas; ei-la:

$${}^j\mathbf{p}_i = \begin{pmatrix} {}^j_x\mathbf{p}_i \\ {}^j_y\mathbf{p}_i \\ {}^j_z\mathbf{p}_i \end{pmatrix}$$

Galileu uma vez escreveu que qualquer um consegue falar obscuramente, o difícil é se expressar claramente. Neste texto vou tentar mostrar que a matemática da cinemática robótica é muito simples, no fundo é apenas uma questão de conhecer sua linguagem.

Em primeiro lugar, temos de definir ‘base vetorial’ sem entrar muito na álgebra linear. Para fins didáticos, descreverei esse conceito como o canto de um quarto vazio. Então imagine o chão e as paredes de um quarto. Se alguém (ou, se preferir, um robô) estiver em qualquer lugar do quarto e olhar para esse canto, vai ver que na intersecção dos planos das duas paredes que formam o canto existe uma linha (a linha vertical do canto) a que vamos chamar de  $\hat{z}_i$ . No chão há mais duas linhas, que são os vértices formados pela intersecção do chão com as duas paredes do canto. Vamos chamar uma delas de  $\hat{x}_i$  e a outra de  $\hat{y}_i$ . Uma característica muito interessante entre essas três linhas é que o ângulo entre qualquer par delas é sempre de 90°. Quando temos essa característica exotérica dizemos que essas linhas são ortogonais.

Avançando mais um pouco, ao observarmos a linha  $\hat{z}_i$ , podemos perceber que ela tem uma direção, no caso vertical. Desse modo, uma formiguinha bem no canto tem a opção de subir ou descer,

ou seja, ela pode escolher um sentido (para cima, para baixo). O ente matemático que tem direção e sentido é chamado vetor.

No caso estudado, o acento circunflexo sobre a letra  $z$  indica que se trata de um vetor, e na matemática e robótica o linguajar técnico é ‘vetor  $z$ ’. O índice ‘ $i$ ’ é simples: na intersecção entre os três planos (as duas paredes e o chão) existe um ponto conhecido como origem: ‘ $O_i$ ’. A junção desses três entes matemáticos ( $\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i$ ) define uma base vetorial ortogonal, e essa tríade, junto à origem  $O_i$ , define um *frame* (quadro) das coordenadas de referência ‘ $i$ ’. Então, na linguagem matemática, diz-se que ‘o vetor  $z$  na base  $i$  é um vetor diretor de base global’ porque todos os outros vetores possíveis nessa base podem ser decompostos em uma composição formada pelos vetores diretores  $\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i$ .

Ao ver uma barata se deslocando, por exemplo, matematicamente podemos descrever seu movimento em função das posições, distâncias e tempos entre ela e cada uma das coordenadas  $x, y$  e  $z$  baseados no *frame* ‘ $i$ ’ que define a base vetorial ortogonal global<sup>3</sup>.

Suponha que em algum lugar deste quarto exista um robô *human-centered* (HC) – também conhecido como robô humanoide – e ele resolva levantar um braço. Nesse caso ainda temos de levar em consideração a base global, mas somente com ela fica difícil modelar matematicamente esse movimento. Então, para facilitar a matemática, imagina-se outra base vetorial ortogonal ‘ $j$ ’, cuja origem está no centro do ombro do braço do HR que se levanta. A origem da base ‘ $j$ ’ não é ‘ $O_i$ ’, mas ‘ $O_j$ ’, que é o centro do ombro do HR, e não o canto do quarto. A representação da base vetorial ortogonal será então  $\hat{x}_j, \hat{y}_j, \hat{z}_j$ , e será denominada base local.

Do relacionamento (às vezes conflituoso) entre os *frames* ‘ $i$ ’ e ‘ $j$ ’ temos a posição da origem do *frame* ‘ $j$ ’ (ombro do robô) em relação ao *frame* global ‘ $i$ ’ (canto da parede),  $^j_x p_i, ^j_y p_i, ^j_z p_i$ . Ou seja, temos, na linguagem matemática, a ‘base local jota p ( $x, y, z$ ) base global  $i$ ’. Portanto, essa equação nada mais é que a representação das coordenadas de posição  $^j p_i$  de alguma parte do braço do robô. Tais coordenadas são redigidas em uma coluna vertical porque representam um vetor codificado em uma matriz coluna  $3 \times 1$  (3 de três dimensões, 1 porque é um vetor). Essa forma matricial de escrever os vetores facilita muito os cálculos computacionais baseados no processamento digital, e assim o cálculo matricial assume o comando.

Matematicamente, para qualquer parâmetro de movimento essa forma de escrever é a mesma, tanto para posição quanto para deslocamento, orientação, rotação, velocidade e aceleração, afinal todos seguem a mesma lógica. É claro que na prática complica um pouquinho, pois envolve ainda conceitos de trigonometria e um pouco mais de cálculo e manipulação algébrica, sem falar nas regras de multiplicação de matrizes, transposta de uma matriz, determinantes etc. Cada um desses parâmetros terá matrizes específicas que modelam o movimento em função do cálculo vetorial e matricial, e tudo isso é aplicado para todos os componentes móveis do robô, desde uma roda até uma mão, sempre considerando as bases locais e a global.

A respeito da cinemática, trata-se da ciência que estuda os movimentos dos corpos. Mas o que faz os corpos se movimentarem? As forças, e quando elas entram no jogo a cinemática é pouco, então temos de estudar a dinâmica com o *background* (fundo/base/fundamento) da cinemática, e assim chegamos às

complicadas equações dinâmicas do movimento. Featherstone e Orin (*apud* SICILIANO; KHATIB, 2016) afirmam que essas equações relacionam a atuação dos corpos rígidos às forças de atuação nos mecanismos dos robôs. Tais forças geram acelerações que resultam no movimento e definem a trajetória dos elementos atuantes.

A matemática utilizada é a mesma da cinemática, cálculo vetorial e matricial, com o adendo do uso disseminado de equações diferenciais<sup>4</sup>. Em robótica, a equação espacial de movimento é o modelo matemático mais extensivamente usado para os algoritmos computacionais cuja função é controlar e avaliar o movimento dos elementos de um robô. Basicamente, ela é uma equação da seguinte forma:

$$F = \frac{d(I \cdot v)}{dt}$$

Essa equação diferencial estabelece que a força (F) de um elemento mecânico é a taxa de variação no tempo (d()/dt) do *momentum* desse elemento (I.v). O *momentum* (também conhecido como quantidade de movimento) relaciona a massa de um corpo à velocidade desse corpo. Vem daí o conceito de impulso, ou seja, uma força aplicada durante certo tempo que é igual à variação de *momentum* nesse mesmo tempo.

Até aqui parece muito simples, mas as coisas começam a ficar mais interessantes quando enriquecemos o conceito: como essa massa é distribuída no corpo? Considere para tanto um cilindro. Se toda a massa é distribuída no cilindro homogeneamente, considerando um eixo transversal ao cilindro você consegue colocar ele para girar com algum esforço, em um movimento parecido com o de uma hélice de avião. Mas se a maior parte da massa é distribuída nas pontas do cilindro, então o esforço é muito maior para brincar de aviãozinho. Então, empiricamente podemos comprovar que esse cilindro homogêneo gira de forma mais fácil do que aquele que tem massa nas pontas, pois a distribuição de massa no corpo é considerada com base no momento de inércia de massa desse corpo (I), que é a resistência imposta por um corpo à modificação de sua velocidade angular.

Pois bem, um corpo dividido por uma linha em duas partes iguais (simétricas) também representa a divisão de massas, ou seja, metade de um lado e metade do outro, e terá um momento de inércia X. No entanto, se seu corpo ficar torto como o meu, com uma barriga protuberante e pesada deslocada da linha de simetria, o momento de inércia será 3 · X, e quanto maior o momento de inércia de massa mais difícil será realizar um rodopio.

O tipo de movimento desse corpo também deixa o conceito mais rico, se pensarmos que o corpo apenas translada ou se somente gira, ou se translada e gira ao mesmo tempo. Como existem velocidades diferentes para cada tipo de movimento, quando o corpo apenas translada temos a velocidade translacional; se ele gira, temos a velocidade angular. Todas essas questões são levadas em conta na equação dinâmica do movimento, e assim ela evolui:

$$F = \frac{d(I \cdot v)}{dt} = \frac{d(I)}{dt} \cdot v + I \cdot \frac{d(v)}{dt} = \dot{I} \cdot v + I \cdot a$$

A força aplicada em um elemento qualquer de um robô é igual à taxa de variação da dificuldade de se mudar a velocidade desse elemento no tempo multiplicada pela velocidade mais a dificuldade em se mudar a velocidade desse corpo multiplicada pela aceleração desse elemento. Interpretar fisicamente essa equação não é simples. Para nossos propósitos, basta saber que no fundo esse *momentum* ( $I \cdot v$ ) variável no tempo se relaciona com a energia desse elemento robótico. O importante mesmo é saber que por meio dessas equações os engenheiros mecatrônicos conseguem elaborar algoritmos computacionais eficientes para controlar o movimento do robô com base em equações compactas de fácil desenvolvimento e implementação. (FEATHERSTONE; ORIN *apud* SICILIANO; KHATIB, 2016).

Os mecanismos de um robô são associados a um nível de precisão dos movimentos que determinam características detalhadas, tais como estrutura mecânica, transmissão de forças e seleção do atuador. Essas características são definidas por elementos mecânicos, tais como vigas, elos, uniões, eixos, rolamentos, engrenagens, que formam um esqueleto móvel e configuram uma estrutura mecânica e seus mecanismos. (SCHEINMAN; MCCARTHY *apud* SICILIANO; KHATIB, 2016).

Nesse contexto existem diversas topologias de robôs. Em termos de esqueletos há os robôs série, que correspondem a uma cadeia de elementos e se ligam em série consecutivamente. Por outro lado existem os robôs paralelos, que formam um conjunto de elementos em série que se ligam em paralelo. Existem ainda robôs móveis e fixos. Em cada uma dessas topologias existem ainda diversas configurações. Na topologia em série existem desde braços robóticos, como os encontrados em robôs soldadores nas indústrias, até o sistema robótico dos ônibus espaciais da NASA, especializados em manipular satélites. Na topologia em paralelo existem desde sistemas de quatro barras, especializados em manter um nível constante no chassi de um carro, até veículos que caminham sobre seis apoios.

Existem robôs de todos os tipos: manipuladores, com mãos, com pernas, com mãos e pernas, aquáticos, aéreos, terrestres, insetos, *swarm*, com rodas, teleguiados, industriais, domésticos, cirurgiões, humanoides (HR), modulares, celulares, submarinos, espaciais, agrícolas, para mineração, para construção, para aplicações perigosas, de combate, de busca e salvamento, médicos, educacionais, *biologically inspired* (BI), evolutivos e até nanorrobôs. (SICILIANO; KHATIB, 2016).

O equacionamento desses mecanismos segue os ditames da cinemática e da dinâmica já descritos com a adição de estudos de otimização estrutural e operacional dos elementos e atuadores – estes podem ser resumidos em hidráulicos, pneumáticos e eletromagnéticos. As transmissões podem ocorrer diretamente dos atuadores, mas geralmente existem elementos de máquinas específicos tais como correias, engrenagens, cremalheiras, roscas sem-fim, parafusos, braços, pinhões e cabos de aço. (SCHEINMAN; MCCARTHY *apud* SICILIANO; KHATIB, 2016).

Por meio do desenvolvimento dos mecanismos robóticos, o desempenho dos robôs pode ser medido em relação a sua velocidade, aceleração, repetibilidade, resolução, acurácia e vida útil. E isso é muito importante quando queremos estimar suas ações e estados.

Segundo Christensen e Hager (*apud* SICILIANO; KHATIB, 2016), o sensoriamento e a estimação são essenciais em qualquer sistema robótico. Em nível básico, um robô deve estimar que o controle

retroalimentado (*feedback*) será utilizado para definir seu estado e em alto nível perceber o ambiente por meio dos dados dos sensores, permitindo a integração entre a informação do sensor inserido no *workspace* em função do tempo e espaço. Tudo isso para facilitar o planejamento das ações.

E o que são sensores e estimativa de estado? Fazendo uma analogia com os seres vivos, sensores seriam os órgãos dos sentidos (visão, tato, paladar, olfato e audição), todos ligados pelos nervos ao cérebro, que instintivamente ou não estima que ações devem ser tomadas tanto para a manutenção da vida como para a realização de tarefas.

Christensen e Hager fazem uma observação muito interessante sobre esse tópico:

O controle de sistemas robóticos seria relativamente simples se um modelo completo do ambiente fosse disponível, e se os atuadores dos robôs pudessem executar movimentos comandados perfeitamente em relação a este modelo. Infelizmente em muitos casos de interesse um modelo completo do mundo não é disponível, e um controle perfeito de estruturas mecânicas nunca é uma suposição realística. O sensoramento e a estimativa são meios para compensar esta falta de informações completas. (*apud* SICILIANO; KHATIB, 2016).

É preciso nesse ponto diferenciar dois tipos de sensoramento e estimativa. Existem sensores e processamento específicos para cobrir o estado do robô em si mesmo, chamados de *proprioception*, e outros para cobrir o estado do mundo externo, *exteroception*. Os sensores de *proprioception* são usados para medir condições internas do robô: posição de elementos em diferentes graus de liberdade; temperatura; voltagem nos componentes; corrente nos motores; forças aplicadas etc. Já os de *exteroception* são usados para medir e obter informações externas ao robô: temperatura; umidade; velocidade do vento; pressão atmosférica; distância entre objetos; forças de interação, densidades de tecidos etc.

O leitor percebe, pelo texto anterior, que existem centenas, talvez milhares de sensores disponíveis para a robótica. Eles podem ser classificados em oito grupos: sensores de toque; táteis; de eixo; de orientação; de guiamento; de alcance; de velocidade/movimento; de identificação. Quanto aos tipos disponíveis, segundo Christensen e Hager (*apud* SICILIANO; KHATIB, 2016) são 40, e para cada qual talvez haja centenas de modelos e sistemas.

Segundo Christensen e Hager (*apud* SICILIANO; KHATIB, 2016), os processos de estimação baseados nas informações provenientes dos sensores devem ser combinados para definirem as ações do robô por meio das estimativas das condições ambientais e internas do sistema. As metodologias mais comuns incluem métodos baseados em votação, técnicas estatísticas de estimação paramétricas ou não, lógica *Fuzzy* e teoria Dempster-Shafer (que raciocina com a incerteza e as conexões entre várias estruturas lógicas e probabilísticas; é muito utilizada na AI).

Com base na definição das ações que o robô deve realizar, é necessário realizar então o planejamento do movimento. Kavraki e LaValle (*apud* SICILIANO; KHATIB, 2016) descrevem que uma tarefa fundamental da robótica é planejar movimentos livres de colisões para corpos complexos do início ao final, passando entre uma coleção de obstáculos estáticos. Embora essa tarefa seja relativamente

simples, ela é computacionalmente difícil. Os algoritmos modernos têm tido sucesso em atingir esse objetivo em problemas geométricos básicos, e muito esforço tem sido dispendido para estender as capacidades dos robôs para situações desafiadoras.

A primeira questão a ser resolvida no planejamento de movimento é a configuração do espaço, que deve conter uma completa descrição geométrica do robô, e do *workspace*, onde as ações se desenrolarão. Feita essa descrição, deve-se planejar o caminho geométrico do movimento em linguagem algorítmica: o *workspace* – em  $R^2$  (bidimensional) ou  $R^3$  (tridimensional); os obstáculos, suas posições e geometrias; a definição e a descrição físico-mecânica dos elementos do robô; os diagramas de corpo-livre; a configuração do espaço; as condições iniciais; a condição final desejada. Por último, deve-se redigir tudo isso em uma linguagem lógica compatível com os sistemas de processamento.

Concluído o planejamento de movimento, é preciso executá-lo, e para isso o controle do movimento é a próxima etapa. O principal desafio para a robótica sobre esse tema é a complexidade da dinâmica e as incertezas que abarcam os elementos em ação de um robô. Como em geral os movimentos são não lineares e as redes de controle podem ser desestruturadas, os parâmetros dinâmicos têm soluções não triviais para os diversos componentes (uniões, vigas, elos, atuadores) que sofrem influência direta do atrito e de outros parâmetros desconhecidos do ambiente. (CHUNG; FU; HSU *apud* SICILIANO; KHATIB, 2016).

O controle do movimento é realizado por integradores eletrônicos, em geral sistemas microprocessados com placas de controle especializadas (um tipo de computador). Esses sistemas podem fazer parte do sistema central de processamento ou serem separados dele. Os elementos do robô atuam por meio das ‘ordens’ dadas por esse cérebro.

Em primeiro lugar, o controle de movimento deve ter um modelo dinâmico avançado o bastante para prever as forças e acelerações do movimento dos elementos. Depois, as tarefas de controle devem ser elencadas em um *workspace* de controle operacional, que deve ser configurado em função dos elementos do robô. Por último, deve-se elaborar a estratégia de controle, que em geral segue um projeto de controle por meio de um controlador *Proportional-Integral-Derivative* (PID). Um projeto PID fundamentalmente controla a velocidade e a posição do elemento em um processamento em *loop* fechado com *feedback* (retroalimentado). O que isso quer dizer? Segundo Chung, Fu e Hsu (*apud* SICILIANO; KHATIB, 2016) em um controle PID o ‘P’ controla o esforço de tornar o presente estado no estado desejado; o ‘I’ acumula o esforço usando informação experimentada do estado anterior e o ‘D’ prediz o esforço, refletindo a informação sobre a tendência dos futuros estados do robô.

Depois que controlamos o movimento, temos de controlar a força. De que adianta um robô conseguir pegar uma fruta no galho mais escondido e retorcido de um pé de acerola se ao pegá-lo, ele o esmaga de tal forma que nem o caroço sobra?

Um requerimento fundamental para o sucesso da manipulação de objetos por um robô é a capacidade de controlar a força de contato entre os elementos do robô e os objetos do ambiente, principalmente quando se leva em consideração o comportamento instável durante essa interação. Assim, o controle

da força é essencial para se alcançar sucesso em operações com segurança, principalmente em situações de interação com humanos. (VILLANI; DE SCHUTTER, 2008).

Durante o contato entre os elementos do robô e os objetos do ambiente pode haver restrições geométricas relativas aos caminhos seguidos por esses elementos. Elas são chamadas de restrições cinemáticas, e esse movimento é chamado restringido. Por outro lado, as tarefas de contato são caracterizadas por interações dinâmicas entre o robô e o ambiente e podem ser inerciais (empurrar um bloco); dissipativas (deslizar sobre uma superfície) ou elásticas (empurrar uma parede). O sucesso dessas interações somente é atingido se a estratégia de controle e o planejamento de movimento se adequarem a um modelo manipulador que respeite as restrições e atenda às exigências dinâmicas. (VILLANI; DE SCHUTTER, 2008). Eis então a importância do controle de força, pois nessas interações sempre haverá processos recursivos entre o controle de movimento e o controle de força.

Kortenkamp e Simmons (*apud* SICILIANO; KHATIB, 2016) afirmam que os *softwares* de sistemas robóticos tendem a ser complexos devido à necessidade de controlar diversos sensores. Atuadores em tempo real em face de significativo ruído e incerteza, os robôs devem realizar tarefas enquanto monitoram reações, situações inesperadas e o ambiente, tudo ao mesmo tempo e assincronizadamente, o que adiciona imensa complexidade ao sistema.

Nesse contexto é importante o uso de arquiteturas computacionais bem concebidas e conjugadas com ferramentas de programação que suportem essa arquitetura. Atualmente não existe uma arquitetura boa o bastante para todas as aplicações, assim é importante entender as fraquezas e vantagens de cada uma para escolher a que melhor se adequa a dada aplicação. Segundo Kortenkamp e Simmons (*apud* SICILIANO; KHATIB, 2016), a arquitetura de um robô tem dois conceitos distintos: 1) a arquitetura da estrutura, que se refere a como os sistemas são divididos em subsistemas e em como estes interagem entre si; 2) o estilo da arquitetura, que se refere ao conceito computacional em que os sistemas se subjazem. A arquitetura de robôs é em geral modular e hierárquica, ou seja, é formada por módulos simples e independentes que seguem uma hierarquia no sentido de que são construídos e montados seguindo uma ordem pré-estabelecida de elementos e/ou processos. Essa configuração diminui a complexidade e aumenta a confiabilidade.

Finalmente, chegamos ao último desses fundamentos em robótica, a área mais avançada, a ponta-de-lança de tudo o que discutimos até aqui: a *Artificial Intelligence* (AI) de um robô. Não por acaso, esse é o tópico que suscita maior curiosidade, maior fascínio e maior confusão, o que por sua vez gera o medo.

Segundo Beetz *et al.* (*apud* SICILIANO; KHATIB, 2016), a tecnologia de raciocínio da AI envolve inferência, planejamento e aprendizagem que são fundamentados no raciocínio simbólico usando a lógica predicativa de primeira ordem (*First order predicate logic* – FOPL) ou a Teoria de Probabilidade Bayesiana.

A lógica bayesiana, que em robótica gostamos de chamar FOPL, trata exatamente dessa situação, pois representa incertezas sobre proposições, principalmente quando não temos a informação completa sobre a plausibilidade da proposição<sup>5</sup>.

Para Beetz *et al.* (*apud* SICILIANO; KHATIB, 2016), em AI é sempre preciso pensar em duas palavras-chave: ‘representação do conhecimento’ (*KR-Knowledge Representation*) e ‘inferência’. Esses conceitos, por sua vez, levantam duas questões: 1) Quais são os formatos adequados para a KR?; 2) De onde vem a KR? A resposta para a primeira pergunta é fácil: FOPL. Para a segunda é mais difícil, pois se refere à geração e manutenção, em tempo real, de uma descrição simbólica do ambiente do robô baseada em uma condição situacional recente da informação ambiental obtida por sensores e comunicação com outros agentes envolvidos.

Segundo Beetz *et al.* (*apud* SICILIANO; KHATIB, 2016), a FOPL é o arquétipo do formalismo KR para AI. Em algumas variantes, esse tipo de lógica facilita as inferências do conhecimento e por dedução automática é um campo dos estudos em AI que tem sistemas de dedução implementados muito poderosos, inclusive prontos para uso.

Em robótica, a inferência ou a lógica inferencial possibilita deduzir grande número de fatos que de outra forma seria muito difícil, por exemplo: um robô percebe pela aquisição e interpretação de dados de um sensor que a porta de uma sala em que ele deve entrar está fechada (primeira opção). Se o fato ‘porta fechada’ for representado por um código expresso em uma linguagem FOPL, então o robô, que, pode estar em um corredor (fato também codificado na lógica), pode inferir várias coisas:

- a) Assumindo ‘saber’ que a porta está fechada, o robô pode inferir que será melhor tomar outra rota para tentar entrar por outra porta (segunda opção). Mas ele não sabe se esta está fechada, ou seja, o *status* desse conhecimento é desconhecido, e por isso não pode ser provado nem desaprovado;
- b) Esse *status* deixa aberta a opção de planejar outra rota (terceira opção) para outra porta, diferente da segunda. Devido a outros dados, também incompletos, ele calcula por inferência que a probabilidade de essa porta estar aberta é maior do que a segunda opção;
- c) então ele decide pela terceira opção.

Esse é um exemplo da forma de ‘pensar’ FOPL. (BEETZ *et al.* *apud* SICILIANO; KHATIB, 2016). Existem muitas outras lógicas utilizadas para AI: descritiva (*Description Logics – DL*), que são consideradas um subconjunto de lógicas FOPL; *Fuzzy*; indutiva (*Inductive logic programming – ILP*); redundantes etc. Essa área de pesquisa é interessantíssima e emocionante; trata-se do estado da arte da AI, que é a vanguarda da robótica.

## Estado da arte

Obviamente, é impossível abarcar tudo o que está sendo gerado e construído no mundo sobre robótica nos dias de hoje. Somente considerando os artigos *review* (revisões bibliográficas) no estado da arte (discussão baseada no conhecimento dos últimos cinco anos) foram publicados no **ScienceDirect** (2018), em um período de 16 meses (2017 até abril de 2018), um total de 1.210 artigos.

Por meio de uma filtragem avançada foram selecionados para o presente trabalho 288 desses artigos, cujos *abstracts* foram lidos. Destes, foram escolhidos 86 para uma leitura rápida, sendo que somente 44 foram eleitos para uma leitura profunda, que levou a uma seleção de apenas 22. Ou seja, do total de artigos que foram encontrados serão discutidos apenas 1,8%. Não é preciso escrever que certamente muita coisa vai ficar de fora, porém essa seleção de artigos seguiu os critérios, interesses e objetivos por mim escolhidos.

Segundo Ingrand e Ghallab (2017), um assunto central nos desenvolvimentos de robótica é a deliberação desses sistemas visando cumprir alguma tarefa. Considerando que um ato deliberado é uma ação motivada e justificada em função de um objetivo intencionado, em robótica ele se relaciona a uma função computacional requerida por um ato deliberado.

Atualmente, muito esforço tem sido dispendido na otimização e operacionalização dessas funções. Nesse contexto, uma área de vanguarda é a interseção entre a Neurociência e a AI. Segundo Hassabis *et al.* (2017), a generalização de ideias da neurociência acelerará o desenvolvimento da AI, pois estimula questões relativas aos algoritmos, focando a aprendizagem e a inteligência de organismos.

Esta é outra área de destaque na robótica: os algoritmos de aprendizado de máquina (*Machine Learning* – ML). Esses algoritmos emergem como um dos campos mais promissores da AI. Segundo Portugal, Alencar e Cowan (2018), existem abundantes algoritmos ML, redes bayesianas, análises de *clusters*, classificadores KNN (*k-Nearest Neighbor*). Dentre muitos outros, esses algoritmos podem aprender com seus erros e conseguem fazer previsões e melhorar seu desempenho proporcionalmente à quantidade de informação e conhecimento a que têm acesso. Portanto, com as atuais tecnologias Big Data é possível um desenvolvimento de aprendizagem inigualável.

Wolfert *et al.* (2017) definem Big Data como conjuntos tão grandes e complexos de dados que as ferramentas tradicionais de processamento são inadequadas para eles. Por isso, eles demandam novas técnicas e tecnologias que consigam integrá-los e assim transformá-los em informações úteis.

A interface entre esses dados e a ML têm um potencial muito real para mudar o mundo atual. Como os atuais sistemas não têm capacidade para quantidades tão grandes de dados, Faust *et al.* (2018) afirmam que o foco está no desenvolvimento de algoritmos focados na aprendizagem profunda (*Deep learning* – DL), método que promete estabelecer conhecimento implícito por meio de uma rede de aprendizado interligada baseada em algoritmos modernos de redes neurais (*Artificial Neural Network* – ANN).

Exemplos muito interessantes da aplicação da ML são apresentados por Yassin *et al.* (2018), que realizaram uma revisão bibliográfica sobre o uso dessas técnicas para o diagnóstico de câncer de mama usando diferentes modalidades de imagens.

Tudo isso é potencializado com a computação em nuvem (*Cloud computing*), que é a utilização de computadores e suas memórias baseada na internet. Segundo Souri, Navimipour e Rahmani (2018), a computação em nuvem é o atual paradigma, pois provê uma gama de recursos escaláveis e virtualizados, tais como *Software as a Service* (SaaS – *software* como serviço); *Plataform as a Service* (PaaS – plataforma como serviço) e *Infrastructure as a Service* (IaaS – infraestrutura como serviço).

Esse novo paradigma junto ao Big Data nos apresenta uma nova forma de viver, pensar e conhecer o mundo. Segundo Souri, Navimipour e Rahmani (2018), esse paradigma apresenta as seguintes tendências: *Internet of Things* (IOT – internet das coisas); interoperacionalidade entre troca de dados e recursos; consumo energético; robótica em nuvem (a mais nova tendência nos ambientes em nuvem, para ajudar em ambientes de ameaça à vida, por exemplo, em terremotos).

Nesse contexto, Kim *et al.* (2017) apresentam um interessante estudo no qual um robô é obrigado a aprender a reconhecer várias tarefas e ser hábil em derivar uma sequência delas para atingir o objetivo em função de obstáculos, o que gera um comportamento adaptativo. Para isso, foi desenvolvida uma técnica para modificar trajetórias baseada em processamento inteligente.

Nesse contexto, Gruyer *et al.* (2017) apresentam o estado da arte em termos de percepção e processamento de sensores para os *Advanced Driver Assistance Systems* (ADAS – sistemas avançados de assistência à direção), que possibilitam a existência dos carros autônomos, tais como o desenvolvido pela Waymo/Google. (WAYMO, 2019).

Todos esses recursos estão gerando a Quarta Revolução Industrial, conhecida como Indústria 4.0, que é completamente relacionada a *IOT*, *Cyber Physical Systems* (CPS – sistemas físicos cibernéticos), *Information and Communications Technology* (ICT – tecnologias de informação e comunicação), *Enterprise Architecture* (EA – arquitetura empreendedora) e *Enterprise Integration* (EI – integração empreendedora). (LU, 2017).

A Indústria 4.0 não está mudando só a manufatura, mas também a indústria de construção, como apresentam Dallasega, Rauch e Linder (2018), principalmente no ‘calcanhar de aquiles’ desse setor, que é a cadeia de suprimentos. Assim, as novas tecnologias robóticas, de informação e comunicação estão revolucionando as organizações construtoras, que por sua vez estão sincronizando todos os processos.

A agricultura não está de fora dessa tendência avassaladora. Wolfert *et al.* (2017) também descrevem esses avanços na Agricultura 4.0, que na área agrícola chama-se *Smart Farming* (fazenda inteligente). Eles explicam que as máquinas inteligentes e sensores de culturas nas fazendas têm obtido grandes quantidades de dados agrícolas e que a quantidade, a qualidade e o escopo têm crescido enormemente, o que possibilita uma disponibilidade de dados para melhorar processos.

Nesse contexto, as inovações no campo estão se desenvolvendo de forma acelerada. (BECHAR; VIGNEAULT, 2016). Existem robôs de aplicação de produtos fitossanitários; para semeadura; para diagnóstico de solo, de plantas, da água; com sistemas de visão computacional; para colheita; com sistemas remotos de controle de direção; com sistemas de transplante; para controle de plantas daninhas; para monitoramento de doenças e pragas; para podas. (BECHAR; VIGNEAULT, 2017).

Uma interessante inovação no conceito de *Smart Farms* foi um robô para irrigação de vasos em estufas agrícolas. Ele usa sensores de umidade, posição e visão computacional para avaliar quanto cada planta, individualmente, precisa de água e então realiza a aplicação da lâmina d’água necessária para cada planta. Esse sistema possibilita economizar água e melhora substancialmente a eficiência da irrigação. (BATISTA *et al.*, 2017).

Podemos afirmar que o descrito até aqui é sem dúvida a última palavra sobre o assunto (ao menos na data de publicação deste artigo, na segunda década do século XXI). Mas não foge muito de nossas expectativas quando pensamos no desenvolvimento avançado em robótica. A partir daqui serão apresentados alguns desenvolvimentos que são realmente impressionantes, beirando as raia da ficção científica.

Iniciaremos pelos metamateriais, que segundo Yu *et al.* (2018) não são materiais no senso comum, mas produtos da engenhosidade humana, não observáveis na natureza. Eles nos permitem projetar nossas unidades semelhantes a átomos (o que está mais para nanotecnologia) e assim criar materiais com propriedades sem precedentes na natureza.

Esses materiais têm módulos físico-mecânicos de rigidez e compressibilidade completamente diferentes e antiparadigmáticos na ciência dos materiais. Consequentemente, eles podem ser superfortes como o aço e ultraleves como o plástico; tomar formas impossíveis topologicamente em comparação com qualquer material sólido/líquido; têm propriedades mecânicas de ultraleveza, ultrarrigidez, controle de esforços, módulo de cisalhamento nulo e compressibilidade negativa (se forem apertados, em vez de encolher eles se expandem). (YU *et al.*, 2018).

Outra fronteira do conhecimento em robótica é a interação humano-robô. Segundo Musić e Hirche (2017), os humanos são excelentes para raciocinar e planejar em ambientes não estruturados; por outro lado, robôs são muito bons em fazer tarefas precisas e repetitivas.

Atualmente, avanços na interação entre robôs e humanos tem possibilitado a execução de trabalhos nos quais as habilidades desses dois agentes se complementam. A base disso é o compartilhamento do controle. Nesse contexto, Shishehgar, Kerr e Blake (2018) apresentam um interessante estudo sobre o uso da robótica para ajudar pessoas idosas, principalmente a viverem de forma independente. As tecnologias estudadas tratam de auxílio robótico para mitigar o isolamento social, a dependência, mobilidade, monitoramento da saúde, recreação, problemas com lembranças, prejuízo cognitivo/físico e problemas com quedas.

Finalmente, temos a robótica médica, que envolve de tudo: sistemas robóticos para biópsia de mamas (MAHMOUD *et al.*, 2018); sistemas robóticos para ensino em Medicina (SARDI; IDRI; FERNÁNDEZ-ALEMÁN, 2017); bioimpressoras 3D para tecidos biológicos (DERAKHSHANFAR *et al.*, 2018); robôs cientistas pesquisadores em biomateriais (VASILEVICH; DE BOER, 2018) etc.

Para tocar nesse universo da robótica médica escolhi um artigo de Nehme, Neville e Bahsoun (2017) que trata do uso de robótica para cirurgia plástica. Os autores desse artigo apresentam a viabilidade, os procedimentos, as aproximações, os desafios e as complicações da assistência robótica nos procedimentos cirúrgicos plásticos e de reconstrução em pacientes humanos ou modelos. A maioria dos procedimentos que realizaram foi para cirurgia transoral (retirada de tumores). Para isso existem sistemas que auxiliam os procedimentos na cabeça e no pescoço e que fazem reconstruções usando enxertos. Eles ainda não são capazes de fazer cirurgias estéticas como de um nariz arrebitado, mas em função das tendências tecnológicas para o futuro, em breve, a cirurgia plástica robótica poderá reconstruir esteticamente o corpo humano todo.

# NANOTECNOLOGIA

Eu quero falar sobre o problema da manipulação e controle de coisas em escala pequena...  
Por que não podemos escrever todos os 24 volumes da Enciclopédia Britânica na cabeça  
de um alfinete?. (FEYNMAN, 1960).

## Fundamentos

Bhushan (2010) define nanotecnologia como qualquer tecnologia em nanoescala que tem aplicações no mundo real, direciona-se à produção e aplicação em sistemas físicos, químicos e biológicos em escalas que variam de átomos a moléculas submicrométricas e também se refere à integração de nanoestruturas em sistemas grandes. O físico Richard P. Feynman, em sua ontológica palestra **Existe muito espaço lá embaixo**, de 1959 (FEYNMAN, 1960), profetizou praticamente todas as aplicações da nanotecnologia. Muitos métodos que ele imaginou naquele tempo hoje são lugar comum nessa área do conhecimento.

Neste século XXI a nanotecnologia define ‘as regras’ do que é estado da arte tecnológico da mesma forma que os semicondutores, as tecnologias da informação e a biologia molecular o fizeram no século passado, e por isso é largamente aceita como centro da próxima revolução industrial. (BHUSHAN, 2010).

A nanotecnologia trabalha em escalas variando de 10 átomos: um nanosensor químico de 2 nm até 1 mm. Trata-se dos *Microeletromechanical Systems* (MEMS – sistemas microeletromecânicos).

As tecnologias nanométricas estão revolucionando o mundo. Descobertas de novos materiais, processos e fenômenos em nanoescala têm levado ao desenvolvimento de nanossistemas e nanoestruturas inovadoras que estão conduzindo as tecnologias para a miniaturização dos sistemas, comprimindo sensores, processadores e atuadores, combinando componentes mecânicos e elétricos que formam sistemas inteligentes em escala micro e nanométrica. (BHUSHAN, 2010). Qualquer semelhança com nanorrobôs não é mero acaso.

Segundo Von Gleich *et al.* (2010), a natureza usa a nanotecnologia desde sempre, por exemplo, nas teias de aranha. Biomineralização, superfícies funcionais, cristalização controlada, neurobiônica, todas essas estruturas biológicas são ‘copiadas’ pelos especialistas em nanotecnologia, e esse ‘plágio’ tecnobiológico é chamado de nanobiomimética. Ela basicamente foca nos processos de crescimento, ontogenética, desenvolvimento molecular, células e tecidos, incluindo a reconfiguração desses sistemas e também os processos de autocura.

Tudo isso leva diretamente ao desenvolvimento de materiais inteligentes capazes de reagir a diferentes cargas e solicitações, reparando a si mesmos. Lembra-se dos metamateriais citados anteriormente nesse

capítulo no estado da arte em robótica? Sim... esse é o futuro pessoal. Uma interface interessantíssima entre nanotecnologia e robótica.

De acordo com Raymo (*apud* BHUSHAN, 2010), a natureza constrói nanoestruturas biomoleculares que dependem de uma abordagem altamente modular. Pequenos blocos são conectados por robustas ligações químicas, gerando longas cadeias de unidades repetidas. Nesse sentido, os ácidos nucleicos e as proteínas são exemplos de montagens subnanométricas de alta precisão.

O poder da síntese química atual fornece a oportunidade de imitarmos em aproximação a construção modular de nanomateriais, assim moléculas artificiais podem ser montadas peça por peça, formando topologias espirais, tubulares, intertravadas e altamente interligadas. Essas construções oferecem oportunidades para a engenharia desenvolver materiais com novas propriedades, tais como os materiais eletroativos e fotoativos, que abrem caminho para o desenvolvimento da eletrônica e fotônica em nível nanométrico, chegando aos processadores digitais nanométricos. (RAYMO *apud* BHUSHAN, 2010).

Monthioux *et al.* (*apud* BHUSHAN, 2010) afirmam que os nanotubos de carbono revolucionarão a paisagem tecnológica no futuro próximo. Eles serão, para a sociedade de amanhã, o que as tecnologias baseadas no silício produzem hoje: elevadores espaciais com os mais fortes cabos, veículos potenciados por hidrogênio e músculos artificiais. Segundo esses autores, os nanotubos de carbono são sintetizados pela ação de uma catálise em espécies gasosas originárias da decomposição termal de hidrocarbonetos.

Monthioux *et al.* (*apud* BHUSHAN, 2010) descrevem que as principais estruturas de nanotubos são o *Single-Wall Carbon Nanotube* (SWNT – nanotubo de carbono de parede simples) e o *Multiwall Carbon Nanotube* (MWNT – nanotubo de carbono multiparede). Basicamente, um SWNT é uma folha de grafeno (uma das formas cristalinas do carbono, ‘primo’ do diamante e do grafite) que se enrola em forma de um tubo, sendo as pontas deste tampadas por duas capas de fullereno (carbonos em forma de uma gaiola). Para construir um MWNT são usados vários SWNT com diâmetros apropriados arranjados um dentro do outro, formando um nanotubo multiparede.

A síntese de nanotubos enquadra-se naquela categoria de conhecimentos que está além do estado da arte. É a fronteira da ciência e abre o caminho para o futuro, por isso muitos bilhões de dólares são investidos nesse assunto anualmente.

Segundo Monthioux *et al.* (*apud* BHUSHAN, 2010), as técnicas para produção de nanotubos podem ser baseadas principalmente em síntese por fonte sólida de carbono; por fonte gasosa de carbono; por modelagem e por síntese de orientação controlada.

Descrever as técnicas usadas em cada fonte foge ao escopo deste artigo, mas apenas como exemplo, escolhendo as técnicas de fonte sólida, temos ablação a *laser*; método de arco elétrico; arco de plasma de corrente alternada trifásico e forno solar. Em todos esses exemplos a formação dos nanotubos depende de uma catálise das partículas em altíssimas temperaturas (variando de 1000 K até 8000 K, mas o bom mesmo é 1200 °C), sendo que o segredo é a taxa de resfriamento e o tempo de residência das partículas.

Parentes próximos dos nanotubos são os nanofios, sistemas que têm duas direções ‘*quantum-confined*’ e uma direção não confinada. Isso permite que os nanofios sejam usados em aplicações nas quais a condução elétrica é requerida. (DRESSSELHAUS *et al.* *apud* BHUSHAN, 2010). Nesse

contexto existe grande variedade de nanoelementos: nano-hastes, nanorredes, nanocantilever, nanorredes-cantilever, nanocorais, *nanodots*, *nanoprobes* e nanofilmes. (BHUSHAN, 2010).

Nessa verdadeira ‘selva nanométrica’ uma das classes mais interessantes são os *Microeletromechanical Systems* (MEMS – sistemas microeletromecânicos) e os *Nanoelectromechanical Systems* (NEMS – sistemas nanoeletromecânicos).

Segundo Young, Zorman e Mehregany (*apud* BHUSHAN, 2010), os MEMS transportam, comunicam, automatizam, manufaturam, monitoram o ambiente, cuidam da saúde, são sistemas de defesa, enfim, fazem parte de uma imensa gama de produtos. Eles são sistemas inerentemente pequenos, portanto são muito atrativos, pois reduzem o tamanho, o peso e dissipação de potência, além de melhorarem a velocidade e a precisão.

A moderna indústria de fabricação de circuitos integrados é essencialmente baseada em MEMS, sendo os mais emblemáticos representantes do clássico micromotor de Mehregany *et al.* (1998), com 150  $\mu\text{m}$  de diâmetro e 1  $\mu\text{m}$  de altura, e a microengrenagem de Sniegowski e Garcia (1996), de 50  $\mu\text{m}$ .

Talvez você nem imagine como é complicado fazer uma engrenagem em tamanho normal. Para isso são necessárias máquinas específicas para gerar os dentes de forma adequada em função da geometria de uma curva envolvente para cada dente. Imagine então uma engrenagem que tem  $\frac{3}{4}$  do tamanho um fio de cabelo...

O desenvolvimento de MEMS exige métodos apropriados de fabricação para a definição de geometrias muito pequenas, com controle dimensional, flexibilidade de projeto, interface com a microeletrônica, repetibilidade, confiabilidade, alta produtividade e baixo custo. (YOUNG; ZORMAN; MEHREGANY *apud* BHUSHAN, 2010).

Korvink e Paul (2006) descrevem vários tipos de MEMS: microtransdutores, microsensores químicos, microsensores térmicos, microacelerômetros, detectores de fótons, sistemas micro-ópticos, microsensores magnéticos, microsensores mecânicos, microbombas fluídicas, microrredes, microrreatores, microinstrumentos cirúrgicos, microimplantes, microatuadores, micromáquinas. Young, Zorman e Mehregany (*apud* BHUSHAN, 2010) descrevem microrrádios (receptores e transmissores de radiofrequência), microsensores de pressão, microsensores de inércia, microgiroscópios, microespelhos e microcapacitores variáveis.

Para quase todos esses MEMS existem suas contrapartes NEMS. Para um sistema ser classificado como um NEMS ele precisa ter dimensões menores do que 100 nm (0,1  $\mu\text{m}$ ). (YOUNG; ZORMAN; MEHREGANY *apud* BHUSHAN, 2010).

O estado da arte tem muitos ramos, por exemplo, novos dispositivos que se automontam para nanofabricação e são muito utilizados para testes de DNA. (HELLER *et al.* *apud* BHUSHAN, 2010). Há ainda nanodispositivos para terapias biológicas moleculares (LEE; BHUSHAN, 2010), microscopia eletrônica, por tunelamento e força atômica (BHUSHAN; MARTI, 2005) e nanomecânica celular. (KAMM; LAMMERDING; MOFRAD *apud* BHUSHAN, 2010).

Um tema muito interessante nesse universo é a nanorrobótica, que segundo Nelson e Dong (*apud* BHUSHAN, 2010) é o estudo da robótica em nanoescala, o que inclui robôs em nanoescala e robôs

grandes, que podem manipular objetos em nanoescala. Eles são classificados como NEMS. Sua base de construção são os nanotubos, nanofios e nanobobinas, que permitem a construção de suas estruturas robóticas, além de nanoferramentas, nanossensores e nanoatuadores.

Os nanorobôs inauguram uma nova e inexplorada área para a ciência no sentido de que permitem medir, manipular e operar no biodomínio de objetos nanométricos. (NELSON; DONG *apud* BHUSHAN, 2010). Eles podem caracterizar e atuar diretamente nas membranas celulares, no DNA e em outras biomoléculas e bioestruturas. Seus nanossensores, nanoferramentas e nanoatuadores promovem movimentos e medidas na escala de nanômetros, gigahertz, piconewtons e femtogramas. Eles podem reproduzir a maquinaria molecular, eliminar antígenos, matar cânceres etc., enfim, são o futuro.

## Estado da arte

Seguindo o mesmo critério usado para buscar artigos *review* sobre o estado da arte em robótica, foram encontrados sobre nanotecnologia no **ScienceDirect** (2018), no período de 16 meses (a partir de janeiro de 2017), um total de 1.546 artigos. Destes, em uma filtragem avançada foram selecionados 354, cujos *abstracts* foram lidos. Destes outros foram escolhidos 76 para uma leitura rápida, sendo que somente 34 foram eleitos para uma leitura profunda, que determinou o uso de 28. A porcentagem do material de que vamos tratar aqui em relação ao total é também de 1,8%.

Dentre esses artigos, o de AlKahtani (2018) apresenta as nanoaplicações na área de odontologia, principalmente na diagnose dental, na prevenção e em novos materiais. Na área de diagnose ele descreve os biossensores para diagnóstico de problemas mecânicos e químicos nos dentes na área de prevenção. Já foram desenvolvidas nesse sentido nanoescovas de dente, que consistem em nanopartículas de ouro e prata que ficam nas cerdas e matam as bactérias. Em relação a materiais, já existem dentaduras com uma camada de nanopartículas de óxido de titânio, ótimas para exterminar qualquer bactéria, além de deixar a dentadura praticamente inquebrável e agastável.

Se existe uma nanotecnologia que é estado da arte atualmente esta é o grafeno. Trata-se de uma forma de o carbono se ligar formando camadas. Qualquer semelhança com a grafite de seu lápis não é coincidência, pois ela é a forma tridimensional do grafeno.

Segundo Bai *et al.* (2018) o grafeno é ideal para nanossistemas, principalmente os que se referem à teranóstica, novo campo da Medicina que inclui a medicina nuclear e a diagnose molecular. Essa área do conhecimento utiliza uma terapia específica contra uma doença com base em testes diagnósticos específicos. (NEOURO, 2018).

Bai *et al.* (2018) afirmam que o grafeno possibilita a criação de nanossistemas otimizados para a entrega de drogas, a terapia genética, o bioimageamento, a fototerapia e a teranóstica híbrida. Suas características eletroquímicas revelam seu potencial para serem usadas em engenharia de tecidos, especificamente na construção de músculos cardíacos, nervos, ossos, pele e células-tronco.

Ghany, Elsherif e Handal (2017) descrevem outras aplicações desse fantástico nanomaterial: novas baterias elétricas, sensores, engenharia de empacotamento, energia por osmose, separação química,

processamento de alimentos, tratamento de esgoto, ultrapurificação da água, dessalinização de água do mar, dessalinização de águas salinas, captura de CO<sub>2</sub>, separação de ar, separação de gás hidrogênio (H<sub>2</sub>) e separação de gás natural.

No campo técnico a nanotecnologia vem revolucionando todos os setores. Contreras, Rodriguez e Taha-Tijerina (2017) descrevem o uso de nanotecnologias em transformadores elétricos considerando os materiais de isolamento, os fluidos dielétricos, os isoladores externos e os sistemas de monitoramento.

Ferreira, Nóvoa e Marques (2016) descrevem o desenvolvimento de materiais multifuncionais baseados em nanopartículas. Esses novos materiais podem ter várias propriedades intrínsecas, representativas de vários tipos de materiais específicos. Por exemplo, um material que seja condutor elétrico pode eliminar a necessidade de fios; um material que modifica sua forma elimina a necessidade de atuadores; outro que seja retardante de chama elimina a proteção contra incêndio. Os materiais multifuncionais unem todas essas características em um só material e podem ser micromateriais, nanomateriais e picomateriais. Exemplos são a fibra de vidro (micromaterial); as nanopartículas (nanomaterial) e o grafeno (picomaterial).

Ullattil *et al.* (2018) reportam que nanomateriais de óxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) negro têm revolucionado a área de absorção de energia solar, pois possibilitam o máximo de eficiência em se tratando de frequências ultravioleta (UV) e infravermelho (IR) do espectro solar, o que aumenta muito a eficiência dos sistemas de energia renovável com fonte solar.

Nunn *et al.* (2017) apresentam os nanodiamantes. O diamante é uma estrutura cristalina de carbono configurada em um sistema cristalino cúbico com hábito octaédrico. Ao considerar essa mesma geometria individualmente em escala nanométrica você tem os nanodiamantes, que embora não sejam novos, mas conhecidos há 50 anos, sua aplicação em nanosistemas está no estado da arte, principalmente por suas características realmente impressionantes em termos de combinação entre resistência mecânica, resistência química, biocompatibilidade, características ópticas e propriedades eletrônicas. (NUNN *et al.*, 2017).

Teow e Mohammad (2017) descrevem a nova geração de nanomateriais utilizados por processos e sistemas de dessalinização da água: nanotubos de carbono, grafeno, zeolitos e *aquaporin* (AQP). Esses materiais têm revolucionado os atuais métodos ao usar membranas para osmose reversa, membranas de destilação, *forward osmose*, pervaporação e eletrodialise, permitindo a elaboração de novos métodos: novos adsorventes, supercapacitores, deionização capacitiva.

Wang *et al.* (2017) descrevem a técnica do DNA origami, que possibilita aos pesquisadores projetar arbitrariamente qualquer nanoestrutura complexa em 3D. Basicamente, eles imitam uma criança fazendo um origami, só que em vez de papel eles usam um longo filamento de DNA como modelo. Então eles ‘dobram’ centenas de outros filamentos curtos de DNA oligonucleicos e assim projetam as estruturas complementarmente ao DNA modelo. O DNA origami é largamente utilizado para nanofabricação, biosensores e entrega de drogas (carregadores).

Zhao e Fu (2017) descrevem os últimos avanços na criopreservação, técnica que usa muito baixas temperaturas para preservar estruturalmente intactas células e tecidos. Ela é uma ciência/tecnologia

que visa à estocagem de células, tecidos, órgãos em temperaturas criogênicas ( $-196^{\circ}\text{C}$ , temperatura do nitrogênio líquido) a longo prazo. Atualmente, ela é utilizada em medicina reprodutiva, tecnologia de células-tronco, terapias celulares, engenharia de tecidos, desenvolvimento *in vitro* de drogas anticâncer, farmacologia e pesquisa básica.

O segredo é realizar o congelamento e descongelamento de todo o tecido (em suas diversas camadas) na velocidade ótima, de forma nem muito lenta nem muito rápida. Em uma velocidade menor do que a ótima ocorre a formação de cristais de gelo d'água, que se expandem devido a sua configuração cristalina organizada, aumentando seu volume e destruindo as membranas e os elementos da célula. Já em velocidades mais altas do que a ótima ocorre vitrificação, que também mata a célula.

A nanotecnologia está revolucionando essa área do conhecimento porque está possibilitando a construção de plataformas microfluídicas para operar e manipular as células em escala micro e nanométrica, permitindo que os procedimentos de criopreservação sejam muito mais precisos e com alta acurácia no controle de seus parâmetros.

Essas plataformas microfluídicas são sistemas nanométricos que controlam o 'carregamento e descarregamento' da carga de tensão que as células sofrem durante o congelamento e descongelamento, além de caracterizarem a resposta osmótica da célula. (ZHAO; FU, 2017).

A agricultura não podia ficar de fora dessa onda revolucionária. Parisi, Vigani e Rodríguez-Cerezo (2015) descrevem várias aplicações da nanotecnologia voltadas para a agricultura: produtos para proteção de plantas em nanocápsulas e nanopartículas; fertilizantes em nanocápsulas e nanopartículas; retenção de água por meio de nanomateriais tais como zeolitas; purificação de água também por nanomateriais, tais como nanoargilas; diagnóstico por nanoestruturas em biossensores; modificação genética de plantas por meio de nanopartículas carregadoras de DNA ou RNA; desenvolvimento de nanomateriais de plantas como engenharia de plantas ou micróbios, por exemplo, nanofibras de resteva de trigo ou soja para bionanocompósitos.

Novamente, a Medicina é a campeã em artigos sobre nanotecnologia nos 1546 *papers* estado da arte. Dessa imensa quantidade de conhecimento existente sobre aplicações nanotecnológicas foram escolhidas quatro que são muito esperançosas para todos aqueles que enfrentam/enfrentaram ou têm/tiveram um ente querido que enfrenta/enfrentou o câncer.

Dentre esses artigos está o de Aftab *et al.* (2018), que descreve vários tipos de nanopartículas que têm sido usadas como carregadores para a entrega de drogas anticâncer, principalmente devido ao seu tamanho ótimo (nanométrico) e aos negligenciáveis efeitos adversos. Os autores descrevem detalhadamente as várias nanopartículas e suas modificações superficiais e químicas que facilitam a entrega das drogas nos sítios de câncer. Segundo os autores, essas partículas têm excelentes qualidades, como hemocompatibilidade, biodistribuição, longo tempo de circulação, hidrofília, lipofília, balanço para alta biodisponibilidade, prevenção de degradação das drogas e de vazamento delas no lugar errado e, o mais importante, são certeiras em atingir os alvos sem danificar as células saudáveis. Eles ainda discutem as vantagens de cada tipo dessas heroicas nanopartículas: poliméricas, magnéticas, de ouro e mesoporosas de sílica. Trata-se de verdadeiros mísseis teleguiados que levam a carga explosiva para destruir completamente as células cancerígenas.

Outra nanotecnologia fantástica usada na luta contra o câncer é descrita por Chen *et al.* (2017), Torelli *et al.* (2018) e Tripathi e Kumar (2018). São os nanorobôs. Os métodos atuais para tratamento do câncer por quimioterapia não são tão eficientes devido ao fato de que boa parte das drogas não alcança as células cancerígenas. No entanto, nanorobôs podem levar essas drogas diretamente aos alvos. Acredita-se que devido a isso em poucos anos o câncer será uma doença crônica, mas completamente manejável. (TRIPATHI; KUMAR, 2018).

Os cientistas têm modificado geneticamente bactérias de *salmonella* (3  $\mu$ m) que carregam nanorobôs. Estes, por sua vez, levam nanopartículas carregadoras com as drogas, e quando a bactéria alcança o tumor os nanorobôs lançam sua carga mortal. (TRIPATHI; KUMAR, 2018).

Chen *et al.* (2017) descrevem detalhadamente os progressos de seus grupos de pesquisa no desenvolvimento de micro e nanorobôs para diversas aplicações, inclusive no combate ao câncer. Eles desenvolvem diversos tipos e funções de nanorobôs: nadadores helicoidais, nadadores flexíveis, caminhadores de superfície, dentre muitos outros, todos utilizados para aplicações em biomedicina e remediação ambiental.

Sokolov *et al.* (2017) imaginam que em um futuro próximo agentes nanométricos inteligentes serão capazes de analisar diferentes fatores fisiológicos dentro dos organismos vivos e implementar programas de correção e construção, desencadeando ações terapêuticas antes mesmo de as doenças acontecerem. Eles serão baseados em sensoriamento biocomputacional, externamente atuados e quimicamente alimentados, gerando movimentos autônomos. Os sistemas seguirão a configuração de *swarm* robôs com o comportamento interconectado por comunicação autônoma tanto entre os membros do ‘enxame’ como entre os elementos externos. A combinação sinérgica entre as tecnologias disponíveis em termos nanotecnológicos e as drogas inteligentes permitem funcionalidades incomparáveis.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

It's just a spark; But it's enough to keep me going; And when it's dark out;  
No one's around, it keeps glowing.  
Paramore, **Last hope** (2013).<sup>6</sup>

Após essa introdução à robótica e à nanotecnologia é necessário fazer alguns comentários sobre a educação contemporânea brasileira frente ao novo cenário que se descortina para a humanidade e evolui cada vez mais rápido, robótica e nanotecnologicamente.

É preciso que o professor perceba o que Freire quis dizer em relação aos nossos alunos: “aprendam algo de sua sintaxe e de sua semântica, sem o que não poderão com eficácia, trabalhar com eles”. (2013, p. 23). Nesse sentido, é preciso que o professor esteja atualizado em termos de informações e tenha foco na origem e no fundamento do que se ensina. É uma questão de origem e atualidade da

informação aliada à linguagem de apresentação, conceitos que formam a grande pedra de toque da AI e da robótica.

Os professores devem divisar um mundo a ser construído de forma diferente e apresentá-lo a seus alunos, que por sua vez devem participar dessas transformações tal qual El Salvador, tornando-se uma sociedade menos malvada, menos injusta, pouco a pouco mais decente, mais humana. (FREIRE, 2013).

A robótica e a nanotecnologia são algumas das escadas tecnológicas possíveis para inseri-los no futuro. Nesse contexto, Alencar (2005) fez uma excelente investigação sobre esse evento complexo que é a tecnologia apoiado nos pensamentos de um dos maiores teóricos da pedagogia progressista da humanidade, Paulo Freire.

Freire fez uma observação que deveria ser o mote principal de todo professor que pretende ensinar sobre robótica e nanotecnologia: “Faço questão enorme de ser um homem de meu tempo e não um homem exilado dele”. (1984, p. 32). E continua, dizendo que “a tecnologia não é tarefa de demônios, mas sim a expressão da criatividade humana”. Alencar (2005) explica que a tecnologia, segundo Freire, nunca é neutra, é sempre intencional e não se produz nem se usa sem uma visão de mundo, de homem e de sociedade.

Segundo Freire, o uso da tecnologia na prática educacional não deve ser realizado sem preparação, é preciso delinear uma metodologia de uso e uma análise para que ela seja incorporada. (ALENCAR, 2005). Em robótica isso é muito gritante, por isso é preciso trazer e desenvolver metodologias apropriadas para cada nível dos estudantes e para cada interesse transdisciplinar.

Peralta, Prado e Gonçalves (1994) admitem que a robótica tem o potencial de tornar o aluno produtor e não apenas consumidor de tecnologia digital, como tem acontecido com o uso da maioria dos recursos tecnológicos na educação, e de fazer do professor protagonista em processos de reconstrução da própria prática pedagógica.

Segundo Pinto (2011), torna-se necessário repensar currículos e práticas pedagógicas para que o ambiente escolar não vire uma ilha do passado, desmotivando alunos e professores. Em relação à robótica nas escolas, ele afirma que na maioria das vezes acontece a aplicação e o desenvolvimento de aparatos de robótica, algo muito motivador e instigante para qualquer um, não só para estudantes. Peralta, Prado e Gonçalves (1994) afirmam que a robótica na escola deve ser direcionada para que o professor seja capaz de criar condições para recontextualizar uma postura interdisciplinar.

Nesse início de século XXI pipocam iniciativas multidisciplinares focadas em robótica nas escolas pelo mundo afora: Coreia do Sul (YOO, 2015), Áustria (LINERT; KOPACEK, 2016), Brasil (COELHO; BARROS; SILVA *et al.*, 2013). Tudo ficou muito facilitado pelo acesso a *kits* pedagógicos em robótica de fácil manuseio, fácil compreensão e custo baixo, tais como o Boost Creative Toolbox (LEGO, 2018a) e o Lego Mindstorms (LEGO, 2018b).

Todas essas ferramentas e metodologias direcionam a escola para uma revolução robótica e nanotecnológica. Os estudantes que já têm acesso a elas estão adorando, e os que ainda não a conhecem vão adorar e aguardam esperançosos.

Cito um trecho da entrevista de Paulo Freire e Seymour Papert para a TV PUC: “a minha questão não é acabar com a escola, é mudá-la completamente, é radicalmente fazer que nasça dela um novo ser tão atual quanto a tecnologia. Eu continuo lutando no sentido de por a escola à altura do seu tempo. E por a escola à altura do seu tempo não é soterrá-la, mas refazê-la”. (PAULO FRANCISCO SLOMP, 2007, n.p.).

É uma tarefa homérica e titânica. Principalmente porque o tempo urge, e se os professores não acordarem para essa desenfreada e alucinante corrida pedagógico-tecnológica serão os culpados, turma após turma, por gerações de estudantes que sairão da escola sem o devido preparo, sem as devidas armas e armaduras para enfrentar esse mundo que muda a passos exponenciais com a robótica e a nanotecnologia.

Obviamente, os professores não são os únicos culpados, pois os governos, os pais, a nação e sua sociedade também têm sua dose de responsabilidade. Ser professor não é e nunca foi fácil. Aliás, é até perigoso. Como Albert Camus expressou em sua obra prima **A peste**,

Aqueles homens arriscavam a vida. Mas há sempre, na história, um momento em que, se alguém ousa dizer que dois e dois são quatro, é condenado à morte. O professor não ignora isto. E não se trata de saber qual a recompensa ou a punição que aguarda esse raciocínio. A questão é saber se de fato dois e dois são quatro. (1946).

Aquele que arrisca a vida nem sempre tem coragem. Mas aquele que tem coragem, se necessário, arrisca a vida. É preciso ter coragem e assumir a tarefa atual de ensinar robótica a quatro mãos, talvez seis, oito, dez, por meio de uma postura didático/pedagógica transdisciplinar. É essencial dominar as novas tecnologias e levá-las para dentro das salas de aula com metodologias novas, instrumentos novos e ideias novas, despertando a curiosidade em nossas crianças, motivando-as a saltarem sobre esse muro de travamento mental que as impede de avançar eficientemente pela aventura da vida.

É uma tarefa difícil e que gera medo. Nesse sentido, Paulo Freire motiva os professores com esperança, incentivando-os a vencer o medo e seguir os ditames de sua sabedoria:

1. há sempre uma relação entre medo e dificuldade, medo e ‘difícil’. Mas, nesta relação, obviamente, se acha também a figura do sujeito que tem ‘medo do difícil’ ou da ‘dificuldade’. Sujeito que ‘teme’ a tempestade, que ‘teme’ a solidão ou que teme não poder contornar as dificuldades para finalmente entender o texto, ou produzir a inteligência do texto;
2. a questão que se coloca não é, de um lado, negar o ‘medo’, mesmo quando o perigo que o gera é fictício. O medo, porém, em si é concreto. A questão que se apresenta é não permitir que o medo facilmente nos paralise ou nos persuada de desistir de enfrentar a situação desafiante sem luta e sem esforço;
3. com estas reflexões quero sublinhar que o ‘difícil’ ou a ‘dificuldade’ está sempre em relação com a capacidade de resposta do sujeito que, em face do difícil e da avaliação de si mesmo quanto à capacidade de resposta, terá mais ou menos ‘medo’, nenhum ‘medo’ ou ‘medo infundado’;
4. um dos erros mais funestos que podemos cometer, enquanto estudamos, como alunos ou professores, é recuar em face do primeiro obstáculo com que nos defrontamos. É o de não assumirmos a

responsabilidade que a tarefa de estudar nos impõe, como, de resto, qualquer tarefa o faz a quem a deve cumprir;

5. estudar é um ‘que-fazer’ exigente em cujo processo se dá uma sucessão de dor, de prazer, de sensação de vitórias, de derrotas, de dúvidas e de alegria. Mas estudar, por isso mesmo, implica a formação de uma disciplina rigorosa que forjamos em nós mesmos, em nosso corpo consciente. (1997, p. 55; 57; 60).

Os professores que assumirem com coragem a grande aventura de ensinar robótica e nanotecnologia para crianças podem ser definidos por Freire (1987, 2013, 2014) como professores que dominam o conteúdo e são carismáticos. E principalmente, o mais importante, que amam seus estudantes, não como tias ou tios, mas como mestres e mestras perante seus discípulos e discípulas, como a sabedoria chinesa do Tao vaticina: o objetivo último do mestre é que seu discípulo lhe supere.

## BIBLIOGRAFIA

AFTAB, S. *et al.* Nanomedicine: an effective tool in cancer therapy. **International Journal of Pharmaceutics** [on-line], v. 540, n. 1-2, p. 132-149, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.02.007>. Acesso em: 25 out. 2019.

ALENCAR, A. F. de. O pensamento de Paulo Freire sobre a tecnologia: traçando novas perspectivas. In: COLÓQUIO INTERNACIONAL PAULO FREIRE, 5, 2005, Recife. **Anais...** Recife: Centro Paulo Freire, 2005. p. 1-13. Disponível em: [http://seminariopaulofreire-proa8.pbworks.com/f/texto\\_pensamentofreire\\_sobretecnologia\\_pdf.pdf](http://seminariopaulofreire-proa8.pbworks.com/f/texto_pensamentofreire_sobretecnologia_pdf.pdf). Acesso em: 25 out. 2019.

AGLAÉ, A. *et al.* A robótica pedagógica no contexto da educação infantil: auxiliando o alfabetismo. **Revista Tecnologias na Educação** [on-line], p. 1-9, 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/237643936\\_A\\_ROBOTICA\\_PEDAGOGICA\\_NO\\_CONTEXTO\\_DA\\_EDUCACAO\\_INFANTIL\\_AUXILIANDO\\_O\\_ALFABETISMO](https://www.researchgate.net/publication/237643936_A_ROBOTICA_PEDAGOGICA_NO_CONTEXTO_DA_EDUCACAO_INFANTIL_AUXILIANDO_O_ALFABETISMO). Acesso em: 25 out. 2019.

ALKAHTANI, R. N. The implications and applications of nanotechnology in dentistry: a review. **Saudi Dental Journal** [on-line], v. 30, n. 2, p. 107-116, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2018.01.002>. Acesso em: 25 out. 2019.

ASIMOV, I. **I, robot**. [S.l.: s.ed.], 1059. Disponível em: [https://www.ttu.ee/public/m/mart-murdvee/Techno-Psy/Isaac\\_Asimov\\_-\\_I\\_Robot.pdf](https://www.ttu.ee/public/m/mart-murdvee/Techno-Psy/Isaac_Asimov_-_I_Robot.pdf). Acesso em: 25 out. 2018.

ASIMOV, I. **Histórias de robôs**. Porto Alegre: L&PM, 2010.

BAI, R. G. *et al.* Graphene: a versatile platform for nanotheranostics and tissue engineering. **Progress in Materials Science** [on-line], v. 91, p. 24-69, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.08.004>. Acesso em: 25 out. 2019.

BATISTA, A. V. A. *et al.* Multifunctional robot at low cost for small farms. **Ciência Rural** [on-line], v. 47, n. 7, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170080>. Acesso em: 25 out. 2019.

BECHAR, A.; VIGNEAULT, C. Agricultural robots for field operations: concepts and components. **Biosystems Engineering** [on-line], v. 149, p. 94-111, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014>. Acesso em: 25 out. 2019.

BECHAR, A.; VIGNEAULT, C. Agricultural robots for field operations. Part 2: operations and systems. **Biosystems Engineering** [on-line], v. 153, p. 110-128, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.11.004>. Acesso em: 25 out. 2019.

BEETZ, M. *et al.* AI reasoning methods for robotics. *In*: SICILIANO, B.; KHATIB, O. (Ed.). **Springer handbook of robotics**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. p. 1655. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=RTvADAAAQBAJ&pg=PA329&dq=Joachim+Hertzberg,+Raja+Chatila+%2B+handbook+of+robotics&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEw7qSRy8naAhUGHJAKHdQSA6kQ6AEIJzAA#v=onepage&q=Joachim+Hertzberg%2C+Raja+Chatila+%2B+handbook+of+robotics&f=false>. Acesso em: 25 out. 2019.

BHUSHAN, B. (ed.). **Springer handbook of nanotechnology**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>. Acesso em: 25 out. 2019.

BHUSHAN, B.; MARTI, O. Scanning probe microscopy: principle of operation, instrumentation, and probes. *In*: BHUSHAN, B. (ed.). **Nanotribology and Nanomechanics: an introduction**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. p. 41-115. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/3-540-28248-3\\_2](https://doi.org/10.1007/3-540-28248-3_2). Acesso em: 25 out. 2019.

CALSAVERINI, R. S. Lógica bayesiana. **Ars Physica** [on-line], v. 46, 21 ago. 2009. Disponível em: <https://arsphysica.wordpress.com/2009/11/13/logica-bayesiana/>. Acesso em: 20 abr. 2018.

CAMUS, A. **A peste**. [S.l.: s.ed.], 1946. Disponível em: <http://lelivros.love/book/download-a-pesto-albert-camus-em-e-pub-mobi-e-pdf/>. Acesso em: 25 out. 2019.

CEPAK, K. **R.U.R.**, 1921. Disponível em: <http://www.gutenberg.org/ebooks/13083>. Acesso em: 25 out. 2019.

CEPAK, K. **R.U.R.**: Rossum's Universal Robots. Tradução de Paul Selver e Nigel Playfair, 1925. Disponível em: <http://preprints.readingroo.ms/RUR/rur.pdf>. Acesso em: 25 out. 2019.

CHEN, X. Z. *et al.* Recent developments in magnetically driven micro- and nanorobots. **Applied Materials Today** [on-line], v. 9, p. 37-48, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.04.006>. Acesso em: 25 out. 2019.

CHRISTENSEN, H. I.; HAGER, G. D. *In*: SICILIANO, B.; KHATIB, O. (ed.). **Springer handbook of robotics**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. p. 2227. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=RTvADAAAQBAJ&pg=PA91&lpg=PA91&dq=Henrik+I.+Christensen,+Gregory+D.+Hager+%2B+handbook+of+robotics&source=bl&ots=QS5fXKRLEB&sig=1lJjdlmg8HhQjId5EkfUiWml-s&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwik8dfd4sjaAhWJfpAKHefaBtMQ6AEIPTAE#v=onep>. Acesso em: 25 out. 2019.

CHUNG, W.; FU, L. C.; HSU, S. H. Motion Contr. *In*: SICILIANO, B.; KHATIB, O. (ed.). **Springer handbook of robotics**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. Disponível em: <https://users.dimi.uniud.it/~antonio.dangelo/Robotica/2012/helper/Handbook-mcontrol.pdf>. Acesso em: 25 out. 2019.

CONTRERAS, J. E.; RODRIGUEZ, E. A.; TAHA-TIJERINA, J. Nanotechnology applications for electrical transformers: a review. **Electric Power Systems Research** [on-line], v. 143, p. 573-584, fev. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.10.058>. Acesso em: 25 out. 2019.

DALLASEGA, P.; RAUCH, E.; LINDER, C. Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: a systematic literature review. **Computers in Industry** [on-line], v. 99, p. 205-225, ago. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.03.039>. Acesso em: 25 out. 2019.

DERAKHSHANFAR, S. *et al.* 3D bioprinting for biomedical devices and tissue engineering: a review of recent trends and advances. **Bioactive Materials** [on-line], v. 3, n. 2, p. 144-156, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2017.11.008>. Acesso em: 25 out. 2019.

DRESSELHAUS, M. S. *et al.* Nanowires. In: BHUSHAN, B. (ed.). **Springer handbook of nanotechnology**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. p. 1972. Disponível em: [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-642-02525-9\\_4.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-642-02525-9_4.pdf). Acesso em: 25 out. 2019.

FAUST, O. *et al.* Deep learning for healthcare applications based on physiological signals: a review. **Computer Methods and Programs in Biomedicine** [on-line], v. 161, p. 1-13, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2018.04.005>. Acesso em: 25 out. 2019.

FEATHERSTONE, R.; ORIN, D. E. (2008). Dynamics. In: SICILIANO, B.; KHATIB, O. (ed.). **Springer handbook of robotics**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. p. 2227. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=RTvADAAAQBAJ&pg=PA37&lp=PA37&dq=Roy+Featherstone,+David+E.+Orin+%2B+handbook+of+robotics+%2B+dynamics&source=bl&ots=QS5fWONJwy&sig=9hy2x7\\_vyWtO37Gy6bEIUm0J1z8&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjYxYWh88baAhUBQJAKHYziBK0Q6AEIMTAD#v](https://books.google.com.br/books?id=RTvADAAAQBAJ&pg=PA37&lp=PA37&dq=Roy+Featherstone,+David+E.+Orin+%2B+handbook+of+robotics+%2B+dynamics&source=bl&ots=QS5fWONJwy&sig=9hy2x7_vyWtO37Gy6bEIUm0J1z8&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjYxYWh88baAhUBQJAKHYziBK0Q6AEIMTAD#v). Acesso em: 25 out. 2019.

FERREIRA, A. D. B. L.; NÓVOA, P. R. O.; MARQUES, A. T. Multifunctional material systems: a state-of-the-art review. **Composite Structures** [on-line], v. 151, p. 3-35, set. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.028>. Acesso em: 25 out. 2019.

FEYNMAN, R. **There's plenty of room at the bottom**: an invitation to enter a new field of physics, 1960. Disponível em: <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>. Acesso em: 25 out. 2019.

FREIRE, P. A máquina está a serviço de quem? **BITS**, São Paulo, v. 1, n. 7, p. 6, maio 1984.

FREIRE, P. **Pedagogia da autonomia**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2014.

FREIRE, P. **Pedagogia da esperança**: um reencontro com a pedagogia do oprimido. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2013.

FREIRE, P. **Pedagogia do oprimido**. 17. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1987.

FREIRE, P. **Professora sim, tia não**: cartas a quem ousa ensinar. São Paulo: Olho d'água, 1997.

GHANY, N. A. A.; ELSHERIF, S. A.; HANDAL, H. T. Revolution of Graphene for different applications: State-of-the-art. **Surfaces and Interfaces** [on-line], v. 9, p. 93-106, dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2017.08.004>. Acesso em: 25 out. 2019.

GRUYER, D. *et al.* Perception, information processing and modeling: critical stages for autonomous driving applications. **Annual Reviews in Control** [on-line], v. 44, 2017, p. 323-341, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2017.09.012>. Acesso em: 25 out. 2019.

HASSABIS, D. *et al.* Neuroscience-Inspired Artificial Intelligence. **Neuron** [on-line], v. 95, n. 2, p. 245-258, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.06.011>. Acesso em: 25 out. 2019.

HELLER, M. J. *et al.* Next-generation DNA hybridization and self-assembly nanofabrication devices. *In*: BHUSHAN, B. (ed.). **Springer handbook of nanotechnology** p. 389-401. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-02525-9\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-02525-9_13). Acesso em: 25 out. 2019.

INGRAND, F.; GHALLAB, M. Deliberation for autonomous robots: a survey. **Artificial Intelligence** [on-line], v. 247, jun. 2017, p. 10-44. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.artint.2014.11.003>. Acesso em: 25 out. 2019.

KAMM, R.; LAMMERDING, J.; MOFRAD, M. Cellular nanomechanics. *In*: BHUSHAN, B. (ed.). **Springer Handbook of Nanotechnology**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, p. 1171-1200.

KAVRAKI, L. E.; LAVALLE, S. M. Motion planning. **Semantic Scholar** [on-line], 2007. *In*: SICILIANO, B.; KHATIB, O. (ed.). **Springer handbook of robotics**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2016, p. 1655. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Chapter-5-Motion-Planning-by-Lydia-E.-Kavraki-and-LaValle/9c17b4debbca700db44eabf3d02c4549dc2c88be>. Acesso em: 25 out. 2019.

KIM, D. H. *et al.* Realization of task intelligence for service robots in an unstructured environment. **Annual Reviews in Control** [on-line], v. 44, p. 9-18, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2017.09.013>. Acesso em: 25 out. 2019.

KORTENKAMP, D.; SIMMONS, R. Robotic systems architectures and programming. *In*: SICILIANO, B.; KHATIB, O. (ed.). **Springer handbook of robotics**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2016, p. 1655. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.363.5664>. Acesso em: 25 out. 2019.

KORVINK, J. G.; PAUL, O. **MEMS: a practical guide to design, analysis, and applications**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-33655-6>. Acesso em: 25 out. 2019.

LEE, S. C.; BHUSHAN, B. Biological molecules in therapeutic nanodevices. *In*: BHUSHAN, B. (ed.). **Springer handbook of nanotechnology**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, p. 693-722. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-54357-3\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54357-3_22). Acesso em: 25 out. 2019.

LEGO. Boost creative toolbox. [S.l.: s.ed.], 2018a. Disponível em: <https://shop.lego.com/en-US/BOOST-Creative-Toolbox-17101>. Acesso em: 25 out. 2019.

LEGO. Mindstorms. [S.l.: s.ed.], 2018b. Disponível em: <http://www.legobrasil.com.br/temas/Mindstorms>. Acesso em: 25 out. 2019.

LINERT, J.; KOPACEK, P. Robots for education (edutainment). **IFAC-PapersOnLine** [on-line], v. 49, n. 29, 2016, p. 24-29. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.065>. Acesso em: 25 out. 2019.

LU, Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. **Journal of Industrial Information Integration** [on-line], v. 6, p. 1-10, jun. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>. Acesso em: 25 out. 2019.

MAHMOUD, M. Z. *et al.* Evolution of robot-assisted ultrasound-guided breast biopsy systems. **Journal of Radiation Research and Applied Sciences** [on-line], v. 11, n. 1, p. 89-97, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2017.11.005>. Acesso em: 25 out. 2019.

MEHREGANY, M. *et al.* Principles in design and microfabrication of variable – capacitance side – drive motors. **Journal of Vacuum Science & Technology A** [on-line], v. 8, n. 4, 1998, p. 3614-3624. Disponível em: <https://doi.org/10.1116/1.576515>. Acesso em: 25 out. 2019.

MONTHIOUX, M. *et al.* Introduction to carbon nanotubes. *In*: BHUSHAN, B. (ed.). **Springer handbook of nanotechnology**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. p. 43-112. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-29857-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-29857-1_3). Acesso em: 25 out. 2019.

MORAES, S. A. de; TERUYA, T. K. Paulo Freire e formação do professor na sociedade tecnológica. *In*: SIMPÓSIO ACADÊMICO. Formação de Professores no contexto da Pedagogia histórico-crítica, 2007, Cascavel. *Anais...* Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2007. Disponível em: [http://www.unioeste.br/cursos/cascavel/pedagogia/eventos/2007/Simpósio Acadêmico 2007/Trabalhos Completos/Trabalhos/PDF/64 Sonia Augusta de Moraes.pdf](http://www.unioeste.br/cursos/cascavel/pedagogia/eventos/2007/Simpósio%20Academico%202007/Trabalhos%20Completo/Trabalhos/PDF/64%20Sonia%20Alguna%20de%20Moraes.pdf). Acesso em: 25 out. 2019.

MUSIĆ, S.; HIRCHE, S. Control sharing in human-robot team interaction. **Annual Reviews in Control** [online], v. 44, 2017, p. 342-354. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2017.09.017>. Acesso em: 25 out. 2019.

NEHME, J.; NEVILLE, J. J.; BAHOUN, A. N. The use of robotics in plastic and reconstructive surgery: a systematic review. **JPRAS Open**, v. 13 [online], set. 2017, p. 1-10. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpra.2017.03.005>. Acesso em: 25 out. 2019.

NELSON, B. J.; DONG, L. Nanorobotics. *In*: BHUSHAN, B. (ed.). **Springer handbook of nanotechnology**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. p. 1972. Disponível em: [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-642-02525-9\\_46.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-642-02525-9_46.pdf). Acesso em: 25 out. 2019.

NEOURO. Teranóstico – um novo passo da Medicina avançada, 2018. Disponível em: <http://neouro.com.br/artigos/teranostico-um-novo-passo-da-medicina-avancada/>. Acesso em: 25 out. 2019.

NUNN, N. *et al.* Nanodiamond: a high impact nanomaterial. **Current Opinion in Solid State and Materials Science** [online], v. 21, n. 1, p. 1-9, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2016.06.008>. Acesso em: 25 out. 2019.

ORIN, D. E. (ed.). Part A: robotics foundations. *In*: SICILIANO, B.; KHATIB, O. (ed.). **Springer handbook of robotics**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/bfm%3A978-3-540-30301-5%2F2%2F1.pdf>. Acesso em: 25 out. 2019.

OTAKE, M. **Electroactive polymer gel robots**. Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-44705-4> Springer. Acesso em: 25 out. 2019.

PARAMORE. **Last Hope**. 2014. Disponível em : <https://www.youtube.com/watch?v=XoYu7K6Ywkg>. Acesso em: 08 nov. 2019

PARISI, C.; VIGANI, M.; RODRÍGUEZ-CEREZO, E. Agricultural nanotechnologies: what are the current possibilities? **Nanotoday** [online], v. 10, n. 2, 2015, p. 124-127. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2014.09.009>. Acesso em: 25 out. 2019.

PAULO FRANCISCO SLOMP. Paulo Freire e Seymour Papert - 0. **Paulo Francisco Slomp**, 2007. Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=bPVweGFj\\_q8](https://www.youtube.com/watch?v=bPVweGFj_q8). Acesso em: 25 out. 2019.

PERALTA, D.; PRADO, J. de A.; GONÇALVES, H. **Robótica como postura pedagógica interdisciplinar na escola**, 1994, p. 4245-4250. Disponível em: [http://www.uece.br/endipe2014/ebooks/livro1/494- ROBÓTICA COMO POSTURA PEDAGÓGICA INTERDISCIPLINAR NA ESCOLA.pdf](http://www.uece.br/endipe2014/ebooks/livro1/494-ROBÓTICA%20COMO%20POSTURA%20PEDAGÓGICA%20INTERDISCIPLINAR%20NA%20ESCOLA.pdf). Acesso em: 25 out. 2019.

PINTO, M. DE C. **Aplicação de arquitetura pedagógica em curso de robótica educacional com hardware livre**. Dissertação. (Mestrado em Informática) – Programa de Pós-Graduação em Informática, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: [http://www.nce.ufrj.br/ginape/publicacoes/dissertacoes/d\\_2011/d\\_2011\\_marcos\\_de\\_castro.pdf](http://www.nce.ufrj.br/ginape/publicacoes/dissertacoes/d_2011/d_2011_marcos_de_castro.pdf). Acesso em: 25 out. 2019.

PORTUGAL, I.; ALENCAR, P.; COWAN, D. The use of machine learning algorithms in recommender systems: a systematic review. **Expert Systems with Applications** [on-line], v. 97, p. 205-227, maio 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.12.020>. Acesso em: 25 out. 2019.

RAYMO, F. M. Nanomaterials synthesis and applications: molecule-based devices. In: BHUSHAN, B. (Ed.). **Springer Handbook of Nanotechnology**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. p. 17-45. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-02525-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-02525-9_2). Acesso em: 25 out. 2019.

ROSA, J. G. **Grande sertão**: Veredas. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2001.

SARDI, L.; IDRI, A.; FERNÁNDEZ-ALEMÁN, J. L. A systematic review of gamification in e-health. **Journal of Biomedical Informatics** [on-line], v. 71, p. 31-48, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2017.05.011>. Acesso em: 25 out. 2019.

SCHEINMAN, V.; MCCARTHY, J. M.; SONG, J. B. Mechanism and atuation. In: SICILIANO, B.; KHATIB, O. (ed.). **Springer handbook of robotics**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. p. 2227. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=RTvADAAAQBAJ&pg=PA67&lpg=PA67&dq=Victor+Scheinman,+J.+Michael+McCarthy+%2B+handbook+of+robotic+%2B+mechanism&source=bl&ots=QS5fWOVNEv&sig=m\\_aUvHzLxH-zh1x2Av01NVh9zyY&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwiAj7LrksfaAhWEx5AKHYsgArwQ6AEI](https://books.google.com.br/books?id=RTvADAAAQBAJ&pg=PA67&lpg=PA67&dq=Victor+Scheinman,+J.+Michael+McCarthy+%2B+handbook+of+robotic+%2B+mechanism&source=bl&ots=QS5fWOVNEv&sig=m_aUvHzLxH-zh1x2Av01NVh9zyY&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwiAj7LrksfaAhWEx5AKHYsgArwQ6AEI). Acesso em: 25 out. 2019.

SCIENCEDIRECT. Science, health and medical journals, full text articles and books, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/>. Acesso em: 25 out. 2019.

SENGUPTA, A. (Ed.). **Chaos, nonlinearity, complexity**. Springer Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.

SHISHEHGAR, M.; KERR, D.; BLAKE, J. A systematic review of research into how robotic technology can help older people. **Smart Health** [on-line], v. 7-8, p. 0-1, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.smhl.2018.03.002>. Acesso em: 25 out. 2019.

SICILIANO, B.; KHATIB, O. (ed.). Introduction. In: SICILIANO, B.; KHATIB, O. (ed.). **Springer handbook of robotics**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5>. Acesso em: 25 out. 2019.

SILVA, A. A. R. S. et al. A robótica pedagógica no contexto da educação infantil: auxiliando o alfabetismo. **Revista Tecnologiasna Educação** [on-line], v. 1, n. 1, p. 1-9, 2009. Disponível em: <https://tededu.pro.br/numeros-publicados/>. Acesso em 08 nov. 2019.

SNIEGOWSKI, J. J.; GARCIA, E. J. Surface-micromachined gear trains driven by an on-chip electrostatic microengine. **IEEE Electron Device Letters** [on-line], v. 17, n. 7, p. 366-368, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/55.506369>. Acesso em: 25 out. 2019.

SOKOLOV, I. L. *et al.* Smart materials on the way to theranostic nanorobots: molecular machines and nanomotors, advanced biosensors, and intelligent vehicles for drug delivery. **Biochimica et Biophysica**

- Acta (BBA) – General Subjects** [on-line], v. 1861, n. 6, p. 1530-1544, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2017.01.027>. Acesso em: 25 out. 2019.
- SOURI, A.; NAVIMIPOUR, N. J.; RAHMANI, A. M. Formal verification approaches and standards in the cloud computing: a comprehensive and systematic review. **Computer Standards and Interfaces** [on-line], v. 58, p. 1-22, maio 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2017.11.007>. Acesso em: 25 out. 2019.
- TEOW, Y. H.; MOHAMMAD, A. W. New generation nanomaterials for water desalination: a review. **Desalination**, v. 451, p. 2-17, fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.041>. Acesso em: 25 out. 2019.
- TORELLI, E. *et al.* DNA origami nanorobot fiber optic genosensor to TMV. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 99, p. 209-215, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2017.07.051>. Acesso em: 25 out. 2019.
- TRIPATHI, R.; KUMAR, A. Application of nanorobotics for cancer treatment. **Materials Today: Proceedings** [on-line], v. 5, n. 3, p. 9114-9117, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.10.029>. Acesso em: 25 out. 2019.
- ULLATTIL, S. G. *et al.* Black TiO<sub>2</sub> nanomaterials: a review of recent advances. **Chemical Engineering Journal** [on-line], v. 343, p. 708-736, jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.069>. Acesso em: 25 out. 2019.
- VASILEVICH, A.; DE BOER, J. Robot-scientists will lead tomorrow's biomaterials discovery. **Current Opinion in Biomedical Engineering** [on-line], v. 6, jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2018.03.005>. Acesso em: 25 out. 2019.
- VILLANI, L.; DE SCHUTTER, J. Force control. In: SICILIANO, B.; KHATIB, O. (ed.). **Springer handbook of robotics**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. Disponível em: <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/183747/1/08PP074.pdf>. Acesso em: 25 out. 2019.
- VON GLEICH, A. *et al.* **Potentials and trends in biomimetics**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- WALDRON, K.; SCHMIEDELER, J. Kinematics. In: SICILIANO, B.; KHATIB, O. (ed.). **Springer handbook of robotics**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. Disponível em: <http://homepages.inf.ed.ac.uk/s0565544/10918401-c-A-1.pdf>. Acesso em: 25 out. 2019.
- WANG, P. *et al.* The beauty and utility of DNA origami. **Chem** [on-line], v. 2, n. 3, p. 359-382, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2017.02.009>. Acesso em: 25 out. 2019.
- WAYMO, 2019. Disponível em: <https://waymo.com/tech/>. Acesso em: 25 out. 2019.
- WOLFERT, S. *et al.* Big Data in smart farming – a review. **Agricultural Systems** [on-line], v. 153, p. 69-80, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>. Acesso em: 25 out. 2019.
- YASSIN, N. I. R. *et al.* Machine learning techniques for breast cancer computer aided diagnosis using different image modalities: a systematic review. **Computer Methods and Programs in Biomedicine** [on-line], v. 156, p. 25-45, mar. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2017.12.012>. Acesso em: 25 out. 2019.
- YOO, J. Results and outlooks of robot education in Republic of Korea. **Procedia – Social and Behavioral Sciences** [on-line], v. 176, fev. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.01.468>. Acesso em: 25 out. 2019.

YOUNG, D.; ZORMAN, C.; MEHREGANY, M. MEMS/NEMS devices and applications. *In*: BHUSHAN, B. (ed.). **Springer handbook of nanotechnology**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. p.415-442. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-29857-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-540-29857-1_15). Acesso em: 25 out. 2019.

YU, X. *et al.* Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: a brief review. **Progress in Materials Science** [on-line], v. 94, p. 114-173, maio 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.12.003>. Acesso em: 25 out. 2019.

ZHAO, G.; FU, J. Microfluidics for cryopreservation. **Biotechnology Advances** [on-line], v. 35, n. 2, p. 323-336, mar.-abr. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.01.006>. Acesso em: 25 out. 2019.

## NOTAS EXPLICATIVAS

- 1 Caso se interesse por ler o roteiro original em tcheco, você pode acessá-lo no *link* <http://www.gutenberg.org/ebooks/13083>. Caso não domine o tcheco, há uma versão em inglês disponível em <http://preprints.readingroo.ms/RUR/rur.pdf>.
- 2 Se porventura o leitor se interessar especificamente por algum desses assuntos, poderá consultar a Bibliografia deste capítulo.
- 3 Global porque foi definida arbitrariamente como a base ‘i’, com origem em ‘O’, ou seja, foi uma escolha deliberada. Poderíamos ter escolhido qualquer outra para ser a base global.
- 4 Caso o leitor se interesse pelo assunto, pode se aprofundar na literatura relacionada.
- 5 Caso o leitor se interesse por uma explicação mais técnica, mas ainda palatável sobre o assunto, pode acessar o *blog* de Calsaverini por meio do *link* <https://arsphysica.wordpress.com/2009/11/13/logica-bayesiana/>.
- 6 Tradução livre: “É apenas uma faísca, mas é o bastante para me manter continuando; e quando está escuro lá fora, ninguém por perto, continua brilhando.”.

