

Captura da virtualidade em algoritmos bioinspirados: apropriação da informação em práticas de modelagem computacional biomimética.¹

Rafael Gonçalves² (Unicamp/SP)

Giordano Oliveira Padovan³ (Unicamp/SP)

Palavras-chave: Antropologia da tecnociência; agenciamentos sociotécnicos; algoritmos.

Resumo: Com a crescente digitalização de diversos processos da vida cotidiana e o aumento significativo de situações mediadas por algoritmos, entender como estes são produzidos e funcionam é tarefa fundamental. Nesse sentido, uma classe de algoritmos de grande relevância hoje são os algoritmos bioinspirados, isto é, aqueles que visam imitar algum aspecto de processos biológicos. Exemplos importantes são o algoritmo de “otimização por colônia de formigas”, que visa simular o comportamento de forrageio em formigueiros para resolver tarefas diversas como o “problema do caixeiro viajante”; e as “redes neurais artificiais”, principal componente das tecnologias de inteligência artificial contemporâneas como o ChatGPT da Open AI, inicialmente inspiradas no funcionamento do sistema nervoso de animais e hoje utilizado para resolver as mais diversas tarefas, tais quais: classificação, geração e representação (de imagem e de texto, por exemplo). O processo de dupla tradução envolvido no desenvolvimento desses algoritmos que passa do comportamento de seres vivos para observações-descrições biológicas e, por fim, modelos matemático-computacionais, não é direto e nem neutro. Nele, há a pretensão de extrair da atividade atual de existentes humanos ou mais-que-humanos, suas virtualidades, sua informação. Esse processo cria representações que instrumentalizam as potências desses existentes para a resolução de problemas computacionais que visam, principalmente, a acumulação capitalista. Além disso, analogias e metáforas utilizadas no processo criam uma realimentação que naturaliza e legitima certas práticas sociais em detrimento de outras. Nesse contexto, este trabalho parte de um corpus de artigos científicos de algoritmos bioinspirados - incluindo “redes neurais artificiais”, “enxame de partículas”, “forrageio de bactérias”, “enxame de abelha”, “colônia de formigas” e “algoritmo de morcego” - para analisar como as próprios cientistas descrevem a passagem dos seres concretos para os respectivos modelos abstratos. O objetivo é descrever as traduções operadas por cientistas, relacionando esse processo com a noção de captura das virtualidades inerentes a estes seres com foco na “otimização por colônia de formigas” e nas “redes neurais artificiais”.

Não há objeto puramente atual. Todo atual rodeia-se de uma névoa de imagens virtuais.

– Gilles Deleuze (1996)

¹ Trabalho apresentado na 34ª Reunião Brasileira de Antropologia (Ano: 2024).

² Mestrado com financiamento do processo n. 2023/01858-0, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

³ Financiamento de pesquisa PIBIC pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é desenvolver a ideia de que a dupla tradução operada por cientistas naturais e engenheiras na criação de algoritmos bioinspirados – processo que parte da observação para a descrição de seres vivos biológicos e então sua modelagem matemático-computacional – estaria operando uma captura da dimensão virtual desses seres. Essa captura seria justamente a extração ativa e unidirecional de informação de seres vivos por meio de práticas de modelagem computacional biomimética.

Biomimética, modelagem computacional e algoritmos bioinspirados

Os algoritmos bioinspirados se encontram na intersecção entre duas áreas tecnocientíficas. Por um lado, há a *biomimética*, que se ocupa em replicar estruturas e funcionamentos biológicos em dispositivos artificiais, o que nem sempre envolve computação, como em design industrial, robótica, arquitetura e engenharia de materiais – sendo emblemático o exemplo do sistema de gancho e argola da empresa Velcro, inspirado em rebarbas da planta bardana (Velcro, 2024). Por outro lado, há a *computação natural*, que se interessa tanto por simular comportamentos naturais computacionalmente, quanto em realizar processos de computação utilizando materiais naturais, por exemplo a computação em DNA, o que não envolveria a imitação de um comportamento biológico (Nunes de Castro, 2006). No nexos entre ambas, há a *computação bioinspirada* (CBI) que, como sugerido por Kar (2016, p. 7), “tenta replicar o modo como organismos biológicos ou entidades sub-organísmicas [*sub-organism entities*] (como neurônios e bactérias) operam para atingir altos níveis de eficiência, mesmo que às vezes a solução ótima real não seja atingida”.

Já Hanif et al. (2018, p. 450) entendem que a “CBI é capaz de prover soluções ótimas ao manter um balanço natural entre os componentes de um problema dado”, argumentando que o “auto-balanço” é a melhor característica da CBI, o que têm relação direta com a consideração de que “os principais elementos para entender o campo são a natureza como criadora e inventora, o ambiente como um campo e os elementos biológicos como máquinas computacionais contendo grupos de algoritmos”. Essas ideias estão implícitas na noção de modelagem computacional de processos biológicos como apresentado nos trabalhos sobre “enxame de partículas” (Kennedy e Eberhart, 1995), “forrageio de bactérias” (Passino, 2002), “enxame de abelha” (Karaboga, 2005) e “algoritmo de morcego” (Yang e Gandomi, 2012). Tal desejo de instrumentalização

técnica da realidade biológica aparece nos diversos artigos do campo e é sintetizado, por exemplo, nos questionamentos de Passino (2002, p. 66):

Podemos encontrar aplicações em engenharia que exijam funcionalidades semelhantes ao que a evolução aperfeiçoou para um organismo e então explorar o bio-design enquanto solução para problemas tecnológicos práticos? Ou, dito de outra forma, podemos encontrar sistemas biológicos que consigam solucionar problemas tecnológicos que estão além de nossas capacidades atuais de engenharia?

Entendemos que ao menos duas ideias estão implícitas nesse modo de formular a questão da computação bioinspirada e nos artigos analisados em geral. Em primeiro lugar, uma identificação do ótimo com o máximo (ou mínimo)⁴ e uma formulação do problema em termos de maximização de desempenho (ou minimização do erro), concorrência e eficiência, que ressoam fortemente com os ideais neoliberais (conferir, por exemplo, Dardot e Laval, 2016). Em segundo lugar, um casamento inusitado entre o materialismo e o racionalismo inerentes ao pensamento científico moderno e um maravilhamento com a capacidade criativa e inteligente da “Natureza” tomada como uma engenheira por excelência. Comentando essa espécie de *criacionismo ateuista*, Helmreich (1998) constata que a atenção das cientistas “na otimização frequentemente as leva a sugerir que a evolução é a força do progresso e aprimoramento, uma sugestão reminescente das visões cristãs da natureza como desenhada por um Deus benevolente” e ainda que “a ideia de que humanos seriam uma conquista notável da evolução sugerem uma secularização do ordenamento judaico-cristão das criaturas na Criação, ou em uma reforma evolucionista da Grande Cadeia do Ser” (Helmreich, 1998, p. 49).

Natureza, metáforas e legitimação social

Em discussões de biomimética, "Natureza" é apresentada enquanto força criativa atuante através de processos evolutivos que, ao longo de bilhões de anos de seleção natural iterativa, otimizam mecanismos tanto a nível corporal dos organismos, quanto de seus comportamentos, para alcançar maior eficiência de ação e de utilização de recursos. Nesse sentido, “Ela” funcionaria segundo os mesmos princípios de design, lógicas decisivas e objetivos das próprias desenvolvedoras de algoritmos, sendo frequentemente descrita nos textos produzidos por elas como “criadora”, “inventora”, “designer”, “engenheira” e ao mesmo tempo “fonte de inspiração” na forma de um banco de soluções finamente otimizadas que poderiam ser aplicadas para novos e

⁴ Sobre esse ponto cf. Simondon (2008). Analisando a forma hexagonal da colméia das abelhas e das formas geométricas em geral, o autor conclui que a solução ótima não é aquela que maximiza ou minimiza um parâmetro, mas a que *resolve um problema* (Simondon, 2008, p. 86).

variados propósitos. Um exemplo particularmente significativo pode ser encontrado no seguinte artigo de apresentação do campo:

A evolução da natureza levou à introdução de *mecanismos biológicos altamente eficazes e eficientes* em termos de energia. Soluções fracassadas muitas vezes levaram à extinção de uma espécie específica. Em sua evolução, *a natureza arquivou as suas soluções nos genes das criaturas que constituem a vida ao nosso redor*. Imitar os mecanismos da natureza *oferece enormes potenciais para a melhoria da nossa vida e das ferramentas que utilizamos*. Os humanos sempre fizeram esforços para imitar a natureza e estamos cada vez mais atingindo níveis de avanço que tornam significativamente mais fácil imitar métodos, processos e sistemas biológicos. (Bar-Cohen, 2006, p. P11, *grifo nosso*)

A antropóloga Mary Douglas (1986) propõe que as analogias, quando bem estabelecidas, atuam como importantes fontes de legitimidade. Elas são fórmulas que, por se colocarem enquanto diretamente conectadas à “Natureza” (e, portanto, à “Razão”), dão lastro à instituição que se utiliza delas para a fundamentação de uma determinada ordem social. Desse modo, a própria instituição passa a integrar a ordem geral de funcionamento do mundo, ou seja, é naturalizada, se conseguir convencer a todas de que sua estrutura formal corresponde às estruturas formais das dimensões não-humanas, consideradas objetivas e naturais. Ao selecionar determinadas analogias entre natureza e cultura, uma instituição naturaliza certos aspectos culturais, ao mesmo tempo em que constrói culturalmente a natureza como tendo as características daquilo com a qual ela é aproximada⁵.

A constituição de uma versão específica do que seria “a Natureza” se basearia num conjunto de analogias escolhidas e favorecidas, e necessariamente implicaria um acompanhamento da constituição da sociedade e dos indivíduos envolvidos no processo:

Indivíduos, ao selecionarem e escolherem entre as analogias vindas da natureza aquelas às quais darão crédito, também estão selecionando e escolhendo simultaneamente seus aliados, oponentes e o padrão de suas relações futuras. Constituindo sua versão da natureza, estão monitorando a constituição de sua sociedade. Resumindo, eles estão construindo uma máquina para pensar e tomar decisões por eles mesmos. (Douglas, 1986, p. 63)

Helmreich (1998), a partir de um trabalho etnográfico com algoritmos genéticos (AGs), aponta como concepções do que é considerado natural são cristalizadas em artefatos e, assim, simultaneamente invisibilizadas e disponibilizadas para incorporação em outras tecnologias. Acompanhando as mudanças nos significados de “Natureza” num momento em que o orgânico e o tecnológico se implicam e emaranham entre si,

⁵ Sobre o trabalho construtivista de separação entre natureza e cultura executado pela modernidade, ver análise particularmente interessante de Latour (1994).

podemos ver nos algoritmos bioinspirados instâncias de um entendimento culturalmente específico do que é a biologia, oferecendo portanto uma janela para uma forma situada de compreensão, implementação e modelagem do “Natural”:

Uma interpretação deste processo, que muitos cientistas de AG podem fornecer, é que a “natureza” está sendo transposta para artefatos de forma bem-sucedida. Outra interpretação, complementar, é que a “cultura” está alterando e modificando o que é considerado “natural”, mas apenas de acordo com a “natureza”, uma vez que a cultura é em si um “sistema natural”. O que estas visões deixam passar é como a “natureza” está sempre carregada de significados culturalmente específicos – significados que estão sempre mudando e que, hoje, transformam-se em resposta às tecnologias de informação e computação que alegam capturar e revelar a lógica naturalista (Helmreich, 1998, p. 66).

É nesse sentido que se apresentam ressalvas em relação à possibilidade efetiva do entendimento e da incorporação de uma inteligência não-humana ou mais-que-humana no seio daquilo que poderíamos denominar “nossa tecnologia”. Como argumentado por Yuk Hui (2020, p. 179, *grifo nosso*) em seu texto “Sobre os limites da inteligência artificial”:

não sabemos se há meios de sair de uma epistemologia humanista pela imitação dos insetos (e diferentes formas de vida animal e vegetal) em modelos para a inteligência artificial. Plantas e bolores limosos podem nos permitir descobertas sobre os princípios organizmicos e, dessa forma, nos dar inspiração para o aprimoramento de algoritmos (como no caso da 'computação natural', um ramo da ciência da computação). Ao utilizá-las, no entanto, subordinamos essas formas de vida à calculabilidade.

É por isso também que, para o autor, o debate sobre os limites da inteligência artificial recai menos sobre capacidades e limitações dessa técnica específica e mais sobre os limites inerentes a uma noção moderna e totalizante de *inteligência*. Esta ainda estaria assentada sobre uma pretensa superioridade do cálculo e da computação que remontaria ao mecanicismo cartesiano. Nessa medida, na atual integração entre realidade técnica e sociedade humana “o mundo perde o caráter incalculável; em outras palavras, deixa de ser fundacional para a epistemologia baseada na computação” e então “o poder da inteligência artificial se baseia na redução do mundo a modelos computacionais” (Hui, 2020, p. 174). Essa subordinação ativa e unilateral da informação heterogênea de existentes ao computador digital na forma de códigos, recursos ou estruturas computacionais abstratas é o que chamamos aqui de *captura*.

Passemos agora para a análise de dois casos concretos considerados por nós de relevância ímpar.

OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS

Em um país com “pouca saúde”, mas “muita saúde” – como diria Macunaíma, protagonista da obra homônima de Mário de Andrade –, o algoritmo de otimização por colônia de formigas (*ant colony optimization*, ACO) se mostra como objeto de interesse particular, principalmente por também ser um dos algoritmos bioinspirados “clássicos” mais bem conhecidos, com uma produção considerável em torno de melhorias e possíveis aplicações (Kar, 2016, p. 5). Além disso, diversos artigos e livros como “Swarm Intelligence” (Bonabeau; Dorigo; Theraulaz, 1999) e “Ant Colony Optimization” (Dorigo; Stützle, 2004) foram escritos por autoras inicialmente envolvidas. Esses trabalhos expandiram as descrições das motivações e experimentações originais, do processo de desenvolvimento e de diferentes formas de implementação, criando um “ecossistema” de publicações a partir das propostas iniciais apresentadas no início dos anos 90.

Em linhas gerais, o algoritmo de ACO visa modelar o comportamento de forrageio de certas espécies de formigas, que seriam capazes de encontrar e utilizar caminhos eficientes (ou até mesmo o mais curto possível) para o transporte de alimentos da fonte até o ninho, justificando sua aplicação para resolver problemas como os de logística e roteamento de veículos e de pacotes em redes de telecomunicações (Dorigo, Birattari e Stützle, 2006).

Os autores apontam modelos de explicação propostos por biólogas (Goss et al., 1989 e Deneubourg et al., 1990) como a principal fonte de inspiração para o desenvolvimento de ACO, na qual “formigas artificiais” constroem soluções através de um esquema comunicacional baseado no “mecanismo” de stigmergia utilizado pelas “formigas reais”. Ao marcarem o melhor caminho que encontraram com feromônios, as formigas influenciam o comportamento umas das outras, que são atraídas pela substância e passam a seguir as trilhas com maior concentração desta, o que leva a uma convergência por feedback positivo para a rota mais curta.

Modelagem

Entendemos que há, subjacente a tais trabalhos, um processo comum de produção de inscrições e modelagens sucessivas que parte do comportamento de forrageio de formigas em seus ninhos até a construção de soluções computacionais por formigas virtuais nos algoritmos de otimização. A modelagem seria uma interface, uma tradução,

entre os empreendimentos de compreender a natureza (nos modelos feitos por biólogas) e de criar sistemas artificiais (nos modelos feitos por desenvolvedoras), através da tentativa de montar um modelo "biologicamente motivado" do fenômeno observado para, então, explorá-lo sem restrições (Bonabeau, Dorigo e Theraulaz, 1999, p. 19).

O processo observado no caso da ACO, e que gostaríamos de generalizar para a computação bioinspirada, pode ser descrito resumidamente pelas seguintes etapas:

1. **Observação de seres vivos em campo e por experimentos em laboratório:** Os experimentos mencionados como inspiração (Goss et al., 1989 e Deneubourg et al., 1990), observaram os padrões exploratórios e de forrageio de alimento coletivos em colônias de formigas de laboratório expostas a uma arena contendo uma ponte em formato de diamante saindo do ninho. Tal formato com dois braços foi selecionado enquanto mecanismo capaz de reduzir os movimentos dos membros da colônia à escolha binária entre esquerda e direita ao atravessá-lo, facilitando a quantificação geral. Como registro, foram tiradas fotografias em intervalos de tempo regulares para monitorar a distribuição das formigas no espaço.
2. **Produção do modelo de explicação do comportamento:** As pesquisadoras produziram diferentes inscrições para auxiliar em e como resultado da análise quantitativa: diagramas das pontes, figuras como representação das distribuições das formigas ao longo do tempo (pontos se espalhando dentro de quadrados), gráficos de diferentes tipos, equações para a probabilidade de escolha de cada um dos braços da ponte baseadas em estimativas da concentração de feromônio. Tais estimativas foram simplificadas para ignorar a evaporação do feromônio e considerar uma quantidade constante de feromônio deixada por cada formiga ao longo do caminho.

Por fim, foram geradas *simulações computacionais* do padrão coletivo ("Monte Carlo simulations") a partir do modelo e dos parâmetros, com as devidas simplificações e aproximações, para comparação com o comportamento registrado e a fim de confirmar a possibilidade de descrever acuradamente as escolhas das formigas e reproduzir o padrão observado empiricamente:

As simulações 2-D mostram, no entanto, como as interações entre as [formigas] exploradoras individuais, cujo comportamento de traçar e seguir trilhas é reduzido à sua expressão mais simples, geram todas as características do complexo padrão coletivo observado. (Deneubourg et al., 1990, p. 165)

- 3. Publicação da descrição do comportamento e do modelo em artigos de biologia:** O conjunto de inscrições (equações e representações visuais finais) é montado e apresentado para a corroboração da narrativa que organiza os resultados, juntamente com a descrição detalhada dos materiais e métodos empregados e uma discussão final propositiva-interpretativa ligando os resultados ao contexto bibliográfico maior e incluindo o uso de analogias que aproximam o comportamento de formigas do de outros animais, dentre eles, humanos:

Finalmente, o mecanismo autocatalítico básico envolvido nesta formação de trilhas químicas não está restrito à exploração ou forrageamento em grupo ou a trilhas químicas. Uma analogia pode ser feita entre a formação de trilhas, por exemplo, por mamíferos em matagais ou pastagens ou *mesmo por estudantes em um campus coberto de neve!* Quanto mais animais passarem por um determinado ponto, mais a vegetação é pisoteada, menor resistência ela oferece e maior a probabilidade de o animal seguinte seguir aquele mesmo caminho, e assim por diante. (Deneubourg et al., 1990, p. 166-167, *grifo nosso*)

- 4. Escolha da metáfora de inspiração pelas desenvolvedoras:** Bonabeau, Dorigo e Theraulaz (2000) revelam que o apelo inicial para a pesquisa de inteligência de enxame (*swarm intelligence*) foi a fascinação das cientistas da computação por formigas, sendo que os resultados positivos obtidos pelos diversos grupos de pesquisadoras foram surpreendentes, indicando como os interesses prévios das cientistas não podem ser desemaranhados do rumo da pesquisa, que pode ser iniciada de forma experimental sem qualquer garantia de sucesso.

Também podemos supor que a escolha por partir de um exemplo natural está ligada a certo *ethos* de busca pela novidade entrevisto em Hanif et al., (2018) ao encorajarem cientistas do campo de algoritmos bioinspirados a estarem sempre atentas a qualquer oportunidade de "garimpar" estruturas, corpos, atividades coletivas e relações à procura de aplicações úteis possíveis:

Este estudo incentiva as pesquisadoras a examinarem as características do ambiente real para encontrar as estratégias naturais ótimas. As cientistas podem perceber a existência de algoritmos naturais no ambiente, por ex. interação de espécies que vão desde bactérias até humanos, algoritmos de ecossistemas equilibrados, diversidade de estruturas como chuvas, florestas, nuvens, etc. As pesquisadoras podem traduzir mistérios do meio ambiente na forma de algoritmos para usá-los em tecnologia computacional. (Hanif, 2018, p. 453)

- 5. Produção do modelo computacional (com base no modelo biológico):** Seguindo as instruções propostas no artigo, para aplicar a ACO é necessário primeiro construir um modelo adequado do problema de otimização, delimitando um espaço de busca com um conjunto de variáveis de decisão, um conjunto de restrições, e uma função objetivo a ser minimizada. A partir do modelo do problema, o modelo

de feromônio é definido, com um valor associado a cada componente da solução e que é atualizado ao final de cada iteração na qual as formigas constroem algumas soluções possíveis (Dorigo; Birattari; Stützle, 2006, p. 30-31).

Tomando um modelo como uma imagem simplificada do fenômeno, há uma distinção importante entre os tipos de modelo construídos por esses diferentes grupos de cientistas ao longo do processo: nos modelos de comportamento de formigas, as biólogas devem manter um lastro nas observações e experimentos empíricos, se atendo aos valores que são consistentes com os padrões identificados nos seres vivos; enquanto que, nos modelos construídos para os algoritmos bioinspirados, as desenvolvedoras podem explorar opções para além das restrições do que seria biologicamente plausível ou relevante ao experimentar livremente com os valores dos parâmetros e variáveis (Bonabeau, Dorigo e Theraulaz, 1999, p. 19-23).

Mesmo assim, os autores mantêm e ressaltam a continuidade de uma ligação direta (se bem que mais distante) desses modelos finais com os seres vivos "reais", mesmo que os algoritmos abandonem o suporte metafórico dos modelos biológicos originais limitados por precisarem se ater ao real:

[P]ode valer a pena explorar modelos que são conhecidos por explicar (plausivelmente) fenômenos de interesse, ao invés de começar do zero. Explorar um modelo para além das restrições da realidade equivale a utilizar uma ferramenta além do seu propósito inicial. Saber que os insetos sociais têm sido particularmente bem-sucedidos na resolução de problemas que podem ser abstraídos e formulados, por exemplo, em linguagem algorítmica, torna os modelos de resolução de problemas em insetos sociais particularmente atraentes: modelos que ajudam a explicar como os insetos sociais resolvem problemas servem como ponto de partida porque podem ser explorados além de seus limites iniciais. (...) Os princípios subjacentes a estes algoritmos são fortemente inspirados no funcionamento das colônias de insetos sociais, mas alguns dos valores dos parâmetros não se situam dentro dos limites empíricos. (Bonabeau, Dorigo e Theraulaz, 1999, p. 19)

A evolução, argumentam tais cientistas, precisa operar dentro do que é possível de acordo com as leis da física, com a bioquímica e com as estruturas já existentes que passarão por um lento e gradual processo de aperfeiçoamento ao longo de bilhões de anos; já as desenvolvedoras são limitadas apenas pela imaginação e pela tecnologia disponível (Bonabeau, Dorigo e Theraulaz, 1999, p. 17).

- 6. Publicação de artigos de apresentação dos algoritmos:** Tais artigos finais geralmente incluem descrições e gráficos do desempenho do algoritmo em questão na resolução de problemas clássicos no campo da computação (e.g., o problema do

caixeiro-viajante), tabelas, listas, equações utilizadas para definir e atualizar os valores das variáveis, e um pseudocódigo resumido do algoritmo com as funções gerais envolvidas. O objetivo desses artigos é convencer a leitora da relevância e da eficiência do algoritmo proposto e já indicar aplicações previstas e potencialmente frutíferas.

REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

As redes neurais artificiais (RNAs) e particularmente sua vertente contemporânea mais forte, as redes neurais profundas (ou aprendizado profundo), são um dos principais algoritmos dos sistemas de inteligência artificial (IA) contemporâneos baseada no processamento matemático-computacional de largas quantidades de dados, o aprendizado de máquina⁶. Em uma definição possível lemos que elas são: “um processador distribuído massivamente paralelo feito de unidades de processamento que tem uma propensão *natural* para armazenar conhecimento exponencial e torná-lo disponível para uso” (Haykin, 2009, p. 2, *grifo nosso*). Elas foram originalmente baseadas no sistema nervoso de animais e, para o autor, lembra o cérebro por dois motivos: “o conhecimento é obtido pela rede de seu ambiente através de um processo de aprendizagem” e “as forças de conexão interneuronal, conhecidas como pesos sinápticos, são usadas para armazenar o conhecimento adquirido” (Haykin, 2009, p. 2).

O termo “inteligência artificial” foi cunhado nos anos 1950s durante o Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence e era, originalmente, um campo de estudos acadêmicos, sendo progressivamente incorporado pelo mercado em substituição ao termo “big data” (Elish e boyd, 2018, p. 60). Mas, como apresentado por Hui (2020), a origem na prática dos algoritmos de IA baseados em dados, como é o caso das RNAs, têm uma origem anterior, localizada no seio das Conferências Macy – 160 conferências interdisciplinares ocorridas em Nova York entre 1946 e 1953 que se notabilizaram por fundarem o campo que ficou conhecido como “cibernética”. Em um livro recente e relevante sobre o aprendizado profundo, podemos ler:

O precursor mais antigo do aprendizado profundo moderno eram modelos lineares simples motivados pela perspectiva neurocientífica. Esses modelos foram designados para receber um conjunto de valores de entrada x_1, \dots, x_n e associar a eles uma saída y . Esses modelos aprenderiam uma série de pesos [sinápticos] w_1, \dots, w_n e calculariam sua saída $f(x, w) =$

⁶ Em inglês, cuja literatura é mais vasta, os termos são, respectivamente: *artificial neural networks* (ANNs), *deep neural networks*, *deep learning*, *artificial intelligence* (AI) e *machine learning*. Uma referência recente sobre o campo, cobrindo em detalhes cada um desses termos, é Goodfellow et al. (2016).

$x_1w_1 + \dots + x_nw_n$ [isto é, a saída y de uma rede neural poderia ser calculada como uma função da soma dos valores de entrada x_i , ponderada pelos pesos sinápticos w_i associados a cada uma delas para todo i] (Goodfellow, Bengio e Courville, 2016, p. 14).

Tal precursor é o modelo neuronal proposto por McCulloch e Pitts em seu “Um cálculo lógico das ideias imanentes na atividade nervosa” (McCulloch e Pitts, 1943) que caracterizava um neurônio como um modelo matemático capaz de representar proposições lógicas. A principal diferença em relação às redes neurais recentes seria que naquelas as entradas e a saída do neurônio são necessariamente binárias (0 ou 1) e suas entradas não são mediadas por pesos, enquanto que estas operam sobre quantidades numéricas contínuas e sua saída advém da ponderação das entradas por “pesos sinápticos”, isto é, parâmetros numéricos. Entretanto, as redes neurais recentes continuam a aproximar a atividade nervosa com funções matemáticas, com a diferença de que agora elas podem ser entendidas como “funções matemáticas flexíveis” (Gonçalves, 2022).

Outro trabalho fundante foi o livro *A organização do comportamento: uma teoria neuropsicológica* (Hebb, 1949) escrito pelo psicólogo Donald Hebb que propõe um mecanismo de plasticidade sináptica frequentemente sintetizada como “células que disparam juntas, permanecem juntas”. A teoria de Hebb foi complementada pela teoria conexionista da mente proposta pelo economista neoliberal Friedrich Hayek em seu *The sensory order*, de modo que pode-se dizer que Hayek “roubou [a ideia de] reconhecimento de padrão [da neurologia e da cibernética] e a transformou em um princípio neoliberal de regulação do mercado” (Pasquinelli, 2021, 160). Nesse sentido:

Em 1958, Frank Rosenblatt definiu o Perceptron (a primeira rede neural artificial operacional para reconhecimento de padrões) como “conexionista” [em oposição à vertente dita “simbólica” da IA, mais reconhecida naquele momento] e reconheceu que o trabalho de “Hebb e Hayek” foram “o mais sugestivo” para o seu próprio (Pasquinelli, 2021, p. 160).

O perceptron, entendido como “primeira verdadeira máquina conexionista” (Cardon, Cointet e Mazieres, 2018, p. 185), foi muito influente no campo, de tal maneira que ainda hoje uma das principais classes desses algoritmos é chamada de “perceptron de múltiplas camadas”⁷. Já sobre a proximidade do economista com o campo, podemos dizer que a influência foi bidirecional. Se, por um lado, a cibernética e a modelagem computacional do cérebro influenciaram a obra de Hayek; por outro lado, é bastante evidente que os desenvolvimentos do campo do aprendizado profundo, ainda hoje, são

⁷ Um interessante histórico das redes neurais artificiais, consideradas como máquinas indutivas, é apresentado por Cardon, Cointet e Mazieres (2018).

fortemente pautados por ideias de maximização de acertos e minimização de erros, que ressoam com as tendências neoliberais de maximização do desempenho e do prazer (Dardot e Laval, 2016).

Em relação às redes neurais com múltiplas camadas, tais como são empregadas hoje, na seção denominada “O que é uma rede neural?” da introdução de Haykin (2009, p. 1, **grifo nosso**), lemos:

Trabalhos sobre redes neurais artificiais, comumente referidas como “redes neurais”, foram motivados desde sua origem pelo reconhecimento de que o cérebro humano calcula [*computes*] de um modo totalmente diferente de um computador digital convencional. **O cérebro é um computador altamente complexo, não-linear e paralelo (sistema de processamento de informação)**. Ele tem a capacidade de organizar seus constituintes estruturais, conhecidos como *neurônios*, de modo que desempenhem certas computações (e.g., reconhecimento de padrões, percepção e controle motor) muitas vezes mais rápido do que o computador digital mais rápido existente hoje.

E ainda:

Considere, por exemplo, **a visão humana, que é uma tarefa de processamento de informação**. É função do sistema visual prover uma *representação* do ambiente ao nosso redor e, mais importante ainda, suprir a informação que precisamos para *interagir* com o ambiente. Para ser específico, **o cérebro rotineiramente cumpre tarefas de reconhecimento perceptivo** (e.g., reconhecimento de uma face familiar integrada em uma cena não familiar) **em aproximadamente 100-200 ms, enquanto que tarefas de uma complexidade muito menor demoram muito mais em um computador potente**.

O que gostaríamos de enfatizar é que há aqui uma inversão: os algoritmos que pretendiam, originalmente, modelar o sistema nervoso animal passam a ser utilizados para explicá-lo. O cérebro se torna um “computador de processamento distribuído” e a visão humana, “uma tarefa de reconhecimento de padrões”. Desse modo, o aprendizado humano é referido como a criação de regras comportamentais por meio da plasticidade cerebral e da adaptação ao ambiente, da mesma forma como um algoritmo de rede neural artificial calcularia os pesos sinápticos ao ser exposto a uma tarefa computacional específica: “uma *rede neural* é uma máquina que foi desenhada para modelar a forma como o cérebro realiza uma tarefa particular ou uma função de interesse” (Haykin, 2009, p. 2), embora hoje também expliquemos o cérebro humano com uma surpreendente proximidade em relação a uma rede neural artificial.

Em outro artigo importante da área, fundante do termo “aprendizado profundo”, lemos, inicialmente, que “as camadas convolucionais e de agrupamento nas ConvNets [redes neurais convolucionais] são diretamente inspiradas pelas noções clássicas sobre células complexas e simples na neurociência visual, e sua arquitetura geral lembra a hierarquia LGN–V1–V2–V4–IT do caminho ventral do córtex visual” (LeCun, Bengio e

Hinton, 2015, p. 439) e, em seguida, que “a visão humana é um processo ativo que amostra [*sample*] sequencialmente a matriz óptica de um modo inteligente e específico usando uma fôvea pequena e de alta resolução com um amplo entorno de baixa resolução” (LeCun, Bengio e Hinton, 2015, p. 442). As analogias fluem em ambos os sentidos.

Em Goodfellow, Bengio e Hinton (2016), também é visível uma tensão entre o argumento de que diversos avanços da área vieram da inspiração biológica; e a desvinculação das RNAs e do aprendizado de máquina em geral, de qualquer noção de imitação biológica. Desse modo, concluem que “hoje, a neurociência é tida como uma importante fonte de inspiração para pesquisadoras do aprendizado profundo, mas não é mais um guia proeminente para o campo” [*today, neuroscience is regarded as an important source of inspiration for deep learning researchers, but it is no longer the predominant guide for the field*]” (Goodfellow, Bengio e Hinton, 2016, p. 15). No sentido atribuído por Douglas (1986), podemos ver que as analogias traçadas nesses artigos legitimam uma visão mecanicista do humano, tanto quanto um funcionamento neoliberal das redes neurais que visam, quase sempre, maximizar taxas de acerto e minimizar erros. O próprio sentido que o campo da IA ruma, com a proposição contínua de modelos tidos como adversários que disputam uma posição em um campo concorrencial que é científico, tanto quanto mercadológico, confirma esse movimento. Um exemplo recente são os modelos de linguagem como o ChatGPT da OpenAI e o Copilot da Microsoft em relação ao Gemini da Google, entre outros.

CAPTURA DA VIRTUALIDADE EM ALGORITMOS BIOINSPIRADOS

Informação, codificação e virada cibernética

Atento às mudanças advindas da passagem do século XX para o século XXI, Laymert Garcia dos Santos (2003, p. 10-11) cunha o termo “virada cibernética” para designar o movimento “que selou a aliança entre o capital e a ciência e a tecnologia, e conferiu à tecnociência a função de motor de uma acumulação que vai tomar todo o mundo existente como matéria-prima à disposição do trabalho tecnocientífico”. O que estaria na base dessas transformações seria a noção de *informação*, central nos trabalhos sobre teoria da informação e da comunicação de Claude Shannon (1948) e na *Cibernética* de Norbert Wiener (2007), ambos publicados em 1948. Baseado nos trabalhos de Gilbert Simondon e Gregory Bateson, Garcia dos Santos a define como “a singularidade real

por meio da qual uma energia potencial se atualiza, através da qual uma incompatibilidade é superada” (Garcia dos Santos, 2003, p. 13).

Desse modo, a informação é uma dimensão comum e transversal aos domínios físico, biológico e social que abre o mundo para o controle tecnocientífico. Para Donna Haraway (2009, p. 65) ela é “aquele tipo de elemento quantificável (unidade, base da unidade) que permite uma tradução universal e, assim, um poder universal sem interferências, isto é, aquilo que se chama de ‘comunicação eficaz’ ”. Por isso, ela, juntamente com o *código*, noção paralela a de informação, sua versão discretizada e quantificável, permitem uma instrumentalização sem precedentes:

As estratégias de controle serão formuladas em termos de taxas, custos de restrição, graus de liberdade. Os seres humanos, da mesma forma que qualquer outro componente ou subsistema, deverão ser situados em uma arquitetura de sistema cujos modos de operação básicos serão probabilísticos, estatístico. *Nenhum objeto, nenhum espaço, nenhum corpo é, em si, sagrado; qualquer componente pode entrar em uma relação de interface com qualquer outro desde que se possa construir o padrão e o código apropriados, que sejam capazes de processar sinais por meio de uma linguagem comum* (Haraway, 2009, p. 62, grifo nosso).

Essa “dessacralização da vida” foi ulteriormente consagrada pelos direitos de propriedade intelectual (Garcia dos Santos, 2003, p. 19). Por um lado, a possibilidade de patenteamento de um código genético significa a privatização de uma potência de vida; por outro lado, as licenças privadas sobre códigos digitais criam uma escassez artificial que tolhe as potencialidades da informação digital. Em ambos os casos, é a dimensão virtual que passa a ser controlada pela aliança capital-tecnociência:

Agora se torna possível investir sobre toda criação, inclusive a criação da vida. (...) [A] ambição maior da nova economia é assenhorear-se da dimensão virtual da realidade, e não apenas da dimensão da realidade virtual, do ciberespaço, como tem sido observado. Se tivermos em mente que a dimensão virtual da realidade começa a ser mais importante em termos econômicos do que a sua dimensão atual, teremos uma ideia melhor do sentido da corrida tecnológica. Aliado à tecnociência, o capitalismo tem a ambição de apropriar-se do futuro (Garcia dos Santos, 2003, p. 18).

Desse modo, constatamos que o que o sistema de propriedade intelectual, a biopirataria, os padrões de software proprietários e, argumentamos aqui, a modelagem computacional de processo biológicos operam é uma captura da dimensão virtual de diferentes fenômenos. Se no caso da patente do código genético de uma planta, a virtualidade diz respeito a sua potência de vida ainda-não-efetivada, no caso dos algoritmos bioinspirados se trata de uma potência real que se sobrepõe à atualidade de cada um dos processos biológicos modelados. De sua estrutura geral que dura no tempo. Das possibilidades de tomada de forma. Da informação.

Optando pela estratégia da aceleração tecnológica e econômica total, pela colonização do virtual e pela capitalização da informação genética e digital, a sociedade ocidental contemporânea se volta para o futuro e parece condenar todas as outras sociedades à integração ao seu paradigma ou ao desaparecimento – como se não houvesse a possibilidade de uma convivência entre ela e outras formações sociais e culturais (Garcia dos Santos, 2003, p. 28).

A captura da virtualidade

Mas não é só na tecnociência moderna que a captura possui uma posição de relevo. Viveiros de Castro (2018) possui apontamentos interessantes, localizando a captura, em sua vertente canibal, como momento importante da metafísica ameríndia. Baseado na “semiofagia guerreira dos Tupi” e em estudos que aproximam a “caça de cabeças dos Jívaro” a um “dispositivo de captura das virtualidades de pessoas”, entre outros, conceitualiza uma “economia da alteridade predatória” nos ameríndios: deste ponto de vista, conclui que “a ‘interioridade’ do corpo social [ameríndio] é integralmente constituído pela captura de recursos simbólicos - nomes e almas, pessoas e troféus, palavras e memórias - do exterior” (Viveiros de Castro, 2018, p. 161). Entretanto, o que diferencia o paradigma ameríndio do moderno, segundo o próprio antropólogo, é a ênfase dada para a inteligibilidade que está ou na objetividade, no caso deste, ou na subjetividade, no caso daquele.

A forma de conhecer o mundo, baseada na matemática, na computação e na digitalização, é amparada em uma tendência ocidental de reduzir processos informacionais qualitativos a quantidades objetivas (na forma de números, dados, fórmulas ou algoritmos). Viveiros de Castro (2018) chama esse modo de conhecimento de mundo de *objetivação* – em oposição à *subjetivação* que seria privilegiada por outros coletivos, como o ameríndio. Enquanto que o “xamanismo ameríndio” é guiado por um ideal segundo o qual “conhecer é ‘personificar’, tomar o ponto de vista daquilo que deve ser conhecido”, em que “[a] forma do Outro é a pessoa” e “[a] boa interpretação xamânica é aquela que consegue ver cada evento como sendo, em verdade, uma ação, uma expressão de estados ou predicados intencionais de algum agente” (Viveiros de Castro, 2018, p. 51), o objetivismo moderno age no sentido inverso:

O xamanismo é um modo de agir que implica um modo de conhecer, ou antes, um certo ideal de conhecimento. Tal ideal está, sob certos aspectos, nas antípodas da epistemologia objetivista favorecida pela modernidade ocidental. Nesta última, a categoria do objeto fornece o *telos*: conhecer é “objetivar”; é poder distinguir no objeto o que lhe é intrínseco do que pertence ao sujeito cognoscente, e que, como tal, foi indevida e/ou inevitavelmente projetado no objeto. Conhecer, assim, é dessubjetivar, explicitar a parte do sujeito presente no objeto, de modo a reduzi-la a um mínimo ideal (ou a ampliá-la demonstrativamente em vista da obtenção de efeitos críticos espetaculares). Os sujeitos, tanto quanto os objetos, são

concebidos como resultantes de processos de objetivação: o sujeito se constitui ou reconhece a si mesmo nos objetos que produz, e se conhece objetivamente quando consegue se ver “de fora”, como um “isso”. Nosso jogo epistemológico se chama objetivação; o que não foi objetivado permanece irreal e abstrato. A forma do Outro é a coisa (Viveiros de Castro, 2018, p. 50).

É por esse motivo que, para o autor, enquanto que os ameríndios sabem que a alma é um fundo comum compartilhado de todos os existentes, restando dúvida sobre a universalidade do corpo; para o moderno, a materialidade está dada, enquanto que, por outro lado, continuamos em busca de uma resposta definitiva sobre a existência da “alma” em outros seres⁸. Mas de forma contraditória, é justamente uma “alma” que dá vida aos processos biológicos sobre os quais biólogos e cientistas da computação se voltam para resolver certos problemas materiais. Essa potência pode ser dita anímica tanto no sentido de que envolve intenções, funcionamentos e sinergias que resolvem problemas complexos escapando a compreensão humana sobre como exatamente chegou-se a esse estado associativo, mas também, nas próprias linhas de fuga que aparecem nos relatos do comportamento observado⁹.

No caso da ciência moderna, Latour (2011) mostra como objetividade é uma característica atribuída *a posteriori*, quando um fenômeno resiste a provas de força e pode, portanto, ser considerado como um fato verdadeiro ou uma máquina eficaz. No caso dos algoritmos bioinspirados, como visto acima, sua objetividade jaz na capacidade desses modelos em resolver problemas de forma eficiente e consistente. Por isso, os modelos das cientistas da computação se tornam máquinas eficazes, tanto quanto as descrições das biólogas, fatos críveis.

Mas é justamente a natureza direcionada, cíclica e cumulativa da produção de conhecimento que permite a Bruno Latour aproximar, embora de maneira implícita, a empresa tecnocientífica da colonial. Para Latour (2011, p. 343), “conhecimento” é o

⁸ Como nota o antropólogo: “A velha ‘alma’ recebeu nomes novos, agora ela avança mascarada (*larvatus prodeo*): chama-se-lhe ‘a cultura’, ‘o simbólico’, ‘a mente’. O problema teológico da alma alheia transmutou-se diretamente no quebra-cabeça filosófico conhecido como o ‘*problem of other minds*’, hoje na linha de frente das investigações neurotecnológicas sobre a consciência humana, sobre os fundamentos possíveis da atribuição da condição jurídica de “pessoa” a outros animais e, por fim, sobre a inteligência das máquinas (os deuses passaram a habitar os microprocessadores Intel). Nos dois últimos casos, trata-se de saber se certos animais não teriam, afinal, algo como uma alma ou consciência – talvez mesmo uma cultura –, e se certos sistemas materiais não-autopoiéticos, ou seja, desprovidos de um corpo orgânico (máquinas computacionais), podem se mostrar capazes de intencionalidade” (Viveiros de Castro, 2018, p. 37, n. 6).

⁹ Um exemplo particularmente interessante é a constatação de que “[t]odo morcego utiliza ecolocalização para sentir distância, e eles também ‘sabem’ a diferença entre comida/presa e barreiras de fundo *de algum modo mágico* [[a]ll bats use echolocation to sense distance, and they also ‘know’ the difference between food/prey and background barriers *in some magical way*]” (Yang, 2009, p. 4, *grifo nosso*).

resultado de um processo ativo de acumulação que visa trazer inscrições da periferia de uma rede até um centro que se torna capaz de representá-la e agir sobre ela em processos de “capitalização” e “ação a distância”. Por isso, “a informação não é um signo, e sim uma relação estabelecida entre dois lugares”, uma periferia e um centro, por onde circulam “inscrições” (Latour 2004, 40). Ou seja, informação é “o que os membros de uma expedição devem levar, na volta, para que um centro possa representar um outro lugar” (Latour 2004, 41). Desse modo, inscrições heterogêneas se tornam comensuráveis em um centro que capitaliza a partir de abstrações e matematizações que “pontualizam” o conhecimento em formas mais densas (Latour, 2011).

É a ideia de *centro de cálculo*. Por manter a mobilidade das relações e a imutabilidade do que é transportado, as inscrições podem ser vistas como “móveis imutáveis” que circulam entre centro e periferia (Latour, 2004, p. 55). Desse modo, fica mais claro agora as operações que definem a empresa moderna (colonial ou tecnocientífica): o deslocamento de inscrições da periferia da rede para o centro; a capitalização no centro de cálculo por meio do traçado de relações abstratas matemáticas; e a ação a distância que mobiliza inscrições desta vez do centro para a periferia.

Apropriação da informação em práticas de modelagem computacional biomimética

Retomando o processo de modelagens como desenhado acima para o caso da otimização de colônia de formigas, podemos ver como uma sequência de inscrições traduzem a complexidade de fenômenos biológicos, em grande parte desconhecida, em diferentes tipos de modelos simplificados através de uma série de reduções que visam garantir a reprodutibilidade e comparabilidade dos resultados dos experimentos realizados e dos algoritmos propostos.

As inscrições capturadas da periferia (no nosso caso, os fenômenos biológicos) servem de veículo para a informação, circulando ao longo das redes de transformações formadas entre e pelos laboratórios, instrumentos, expedições, e que conectam cada inscrição produzida ao mundo moderno. Os fatos são compostos de forma a só terem existência através das séries de transformações que atravessam continuamente e reversivelmente os limites entre signos e coisas, forma e matéria (Latour, 2004). Ao longo do processo de modelagem, acompanhamos a construção dupla tanto das

formigas reais pelos biólogos quanto das formigas virtuais pelos desenvolvedores, do neurônio artificial, mas também do neurônio biológico. Os fatos biológicos são apresentados como um dado da natureza meramente descrito, enquanto que as máquinas computacionais, como artefatos completamente produzidos.

Donna Haraway afirma que, na biologia moderna, o organismo é traduzido em termos de problemas de codificação e de leitura de códigos. A biotecnologia seria então uma “tecnologia da escrita” para a qual os organismos deixam de existir como objetos de conhecimento, sendo substituídos por componentes bióticos, isto é, tipos especiais de dispositivos de processamento de informação. A própria biologia é, dessa perspectiva, uma espécie de criptografia (Haraway, 2009). Desse modo, a dimensão virtual dos fenômenos biológicos, sua informação, é capturada uma vez na descrição da bióloga, e outra, na construção do algoritmo.

A potencialidade do ser vivente é tomada como informação e tornada calculável tanto na biologia, quanto na computação, devendo inscrições comensuráveis que participam da capitalização no centro. Dois modelos, gestados em contextos distintos, com objetivos distintos, mas transponíveis e comparáveis no seio da tecnociência moderna.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, ainda inicial e exploratório, buscamos descrever o processo de dupla tradução operado na modelagem algorítmica bioinspirada. A primeira, operada pela bióloga com pretensão especular em relação à “natureza”, entendida como entidade objetiva e autônoma, embora portadora de inteligência e criatividade. A segunda, operada pela cientista da computação ou desenvolvedora de software, com a pretensão inversa: artefato artificial produzido pela humanidade com diferentes graus de comprometimento com essa mesma “natureza”.

O uso de metáforas e analogias com fenômenos naturais, confere aos algoritmos bioinspirados uma legitimação, na medida em que amparam os ideais de eficiência e objetividade, não na ciência moderna ou na razão neoliberal, mas nessa “natureza” destacada do social. Com isso, não só dão força aos algoritmos, naturalizando seus pressupostos; mas também constroem a natureza como sendo justamente essa entidade criativa que resolve problemas de otimização.

Assim, constatamos que há na computação bioinspirada um processo de dupla tradução, que reduz ao mesmo tempo que constrói a ideia de natureza. A redução foi aqui enquadrada como captura da virtualidade, na medida que os modelos apresentados se assentam sobre fenômenos biológicos, captando apenas o que é racionalizável e computável na forma de inscrições que se acumulam na capitalização operada pelo centro. Já o aspecto construtivo foi apresentado aqui na forma da legitimação que as analogias com a natureza promovem à instituição que as opera, ao mesmo tempo que reafirmam justamente os aspectos naturais relacionados, construindo a natureza como essa semelhante a tal instituição. No nosso caso, da natureza como entidade objetiva e criativa, capaz de resolver de forma eficiente e dentro dos ideais neoliberais, uma miríade de problemas de computação.

REFERÊNCIAS

- BAR-COHEN, Y. Biomimetics: using nature to inspire human innovation. **Bioinspir Biomim.**, v. 1, n. 1, p. P1-P12, mar. 2006.
- BONABEAU, Eric; DORIGO, Marco; THERAULAZ, Guy. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. New York: Oxford University Press, 1999.
- BONABEAU, Eric; DORIGO, Marco; THERAULAZ, Guy. Inspiration for optimization from social insect behaviour. **Nature**, v. 406, p. 39-42, jul. 2000.
- CARDON, Dominique; COINTET, Jean-Philippe; MAZIERES, Antoine. La revanche des neurones: l'invention des machines inductives et la controverse de l'intelligence artificielle. **Réseaux**, v. 5, n. 211, 2018.
- DARDOT, Pierre; LAVAL, Christian. **A nova razão do mundo**. tradução: Mariana Echalar. 1. ed. São Paulo: Boitempo, 2016.
- DELEUZE, Gilles. "O atual e o virtual". In: ALLIEZ, Éric. **Deleuze: Filosofia Virtual** (trad. Heloísa B.S. Rocha). Editora 34, São Paulo, SP, p. 47-57, 1996.
- DENEUBOURG, J.-L.; ARON, S.; GOSS, S.; & PASTEELS, J. M. The self-organizing exploratory pattern of the Argentine ant. **Journal of Insect Behavior**, v. 3, n. 2, p. 159-168, 1990.
- DORIGO, Marco; BIRATTARI, Mauro; STÜTZLE, Thomas. Ant colony optimization. **IEEE computational intelligence magazine**, v. 1, n. 4, p. 28-39, 2006.
- DORIGO, Marco; STÜTZLE, Thomas. *Ant Colony Optimization*. Cambridge: The MIT Press, 2004.
- DOUGLAS, Mary. **How institutions think**. Syracuse University Press, 1986.
- ELISH, M. C.; BOYD, danah. Situating methods in the magic of Big Data and AI. **Communication Monographs**, v. 85, n. 1, p. 57-80, 2018.
- GARCIA DOS SANTOS, Laymert. A informação após a virada cibernética. In: **Revolução Tecnológica, Internet E Socialismo**. 1. ed. São Paulo, SP, Brasil: Editora Fundação Perseu Abramo, 2003. (Socialismo em discussão). p. 9-34.
- GONÇALVES, Rafael. Automatismo ontem e hoje: reflexões sobre os limites da inteligência artificial a partir de Simondon. **Ideias**, [s. l.], v. 13, p. e022008, 2022.
- GOODFELLOW, Ian; BENGIO, Yoshua; COURVILLE, Aaron. **Deep Learning**. MIT Press, 2016. Disponível em: <http://www.deeplearningbook.org>. Acesso em: 06 jul. 2024.
- GOSS, S.; ARON, S.; DENEUBOURG, J.-L.; PASTEELS, J.-M. Self-organized shortcuts in the Argentine ant. **Naturwissenschaften**, v. 76, p. 579-581, 1989.
- HANIF, Muhammad Kashif *et al.* Comparison of bioinspired computation and optimization techniques. **Current Science**, v. 115, n. 3, p. 450-453, 2018.

- HARAWAY, Donna. Manifesto ciborgue: ciência, tecnologia e feminismo-socialista no final do século XX. In: KUNZRU, Hari; HARAWAY, Donna. **Antropologia do ciborgue: As vertigens do pós-humano**. tradução: Tomaz Tadeu. 2. ed. Belo Horizonte: Autêntica Editora, 2009. p. 33–118.
- HAYKIN, Simon S. **Neural networks and learning machines**. 3 ed. New York: Prentice Hall, 2009.
- HEBB, Donald O. **The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory**. New York: Wiley, 1949.
- HELMREICH, Stefan. Recombination, Rationality, Reductionism and Romantic Reactions: Culture, Computers, and the Genetic Algorithm. **Social Studies of Science**, v. 28, n. 1, p. 39-71, fev. 1998.
- HUI, Yuk. **Tecnodiversidade**. tradução: Humberto do Amaral. São Paulo: Ubu Editora, 2020.
- KAR, Arpan Kumar. Bio inspired computing—a review of algorithms and scope of applications. **Expert Systems with Applications**, v. 59, p. 20–32, 2016.
- KARABOGA, Dervis. **An idea based on honey bee swarm for numerical optimization**. Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer, 2005.
- KENNEDY, James; EBERHART, Russell. Particle swarm optimization. In: , 1995. **Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks**. ieee, 1995. p. 1942–1948.
- LATOUR, Bruno. **Ciência em ação: como seguir cientistas e engenheiros sociedade afora**. tradução: Ivone C. Benedetti. 2. ed. São Paulo: Unesp, 2011.
- LATOUR, Bruno. **Jamais fomos modernos**. São Paulo: Editora 34, 1994.
- LATOUR, Bruno. Redes que a razão desconhece: laboratórios, bibliotecas, coleções. **Tramas da rede: novas dimensões filosóficas, estéticas e políticas da comunicação**.(Trad. Marcela Mortara) Porto Alegre: Sulina, [s. l.], p. 39–63, 2004.
- LECUN, Yann; BENGIO, Yoshua; HINTON, Geoffrey. Deep learning. **Nature**, v. 521, n. 7553, p. 436–444, 2015.
- MCCULLOCH, Warren S.; PITTS, Walter. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **The bulletin of mathematical biophysics**, v. 5, p. 115–133, 1943.
- NUNES DE CASTRO, Leandro. **Fundamentals of Natural Computing: Basic Concepts, Algorithms, and Applications**. Hoboken: CRC Press, 2006.
- PASQUINELLI, Matteo. How to Make a Class: Hayek's Neoliberalism and the Origins of Connectionism. **Qui Parle**, v. 30, n. 1, p. 159–184, 2021.
- PASSINO, Kevin M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. **IEEE control systems magazine**, v. 22, n. 3, p. 52–67, 2002.
- SHANNON, C. E. A Mathematical Theory of Communication. **Bell System Technical Journal**, v. 27, n. 3, p. 379–423, 1948.
- SIMONDON, Gilbert. **Imagination et invention, 1965-1966**. Chatou: les Éd. de la Transparence, 2008.
- VELCRO. Our Story. **Velcro**. 2024. Disponível em: <https://www.velcro.co.uk/original-thinking/our-story/>. Acesso em: 9 jul. 2024.
- VIVEIROS DE CASTRO, Eduardo. **Metafísicas canibais: elementos para uma antropologia pós-estrutural**. São Paulo: Ubu Editora, n-1 edições, 2018.
- WIENER, Norbert. **Cybernetics or control and communication in the animal and the machine**. 2. ed., reprinted. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2007.
- YANG, Xin-She; HOSSEIN GANDOMI, Amir. Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization. **Engineering computations**, v. 29, n. 5, p. 464–483, 2012.