

COMPUTAÇÃO FÍSICA: Da máquina Turing ao Universo*PHYSICAL COMPUTATION: From the Turing machine to the Universe*

José Vitor Michelin – michelinjv@gmail.com
Faculdade de Tecnologia de Taquaritinga – Taquaritinga – São Paulo – Brasil

DOI: 10.31510/infa.v22i2.2269

Data de submissão: 22/09/2025

Data do aceite: 03/12/2025

Data da publicação: 20/12/2025

RESUMO

Este trabalho discute a relação entre computação, física e informação, analisando como a noção de máquina de Turing, a teoria da computabilidade e a complexidade computacional se articulam com limites físicos e possibilidades quânticas. Parte-se do princípio de que a informação possui uma dimensão física, e que operações computacionais estão intrinsecamente vinculadas a processos termodinâmicos. Discute-se a hipótese de que o universo pode ser visto como um sistema computacional quântico, no qual fenômenos físicos emergem do processamento de informações. Conclui-se que a computação, longe de ser apenas uma construção formal ou tecnológica, representa um processo físico fundamental, capaz de oferecer novas perspectivas para compreender a realidade. A metodologia utilizada consistiu em pesquisa bibliográfica, por meio de uma abordagem exploratória e analítica da literatura científica.

Palavras-chave: Física. Computação. Teoria Quântica. Informação. Física da Informação.

ABSTRACT

This paper discusses the relationship between computation, physics, and information, analyzing how the notion of the Turing machine, computability theory, and computational complexity connect with physical limits and quantum possibilities. It is based on the principle that information has a physical dimension and that computational operations are intrinsically linked to thermodynamic processes. The hypothesis is discussed that the universe can be understood as a quantum computational system in which physical phenomena emerge from the processing of information. It is concluded that computation, far from being merely a formal or technological construct, constitutes a fundamental physical process capable of offering new perspectives for understanding reality. The methodology used was bibliographic research through an exploratory and analytical approach to scientific literature.

Keywords: Physics. Computation. Quantum Theory. Information. Information Physics.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da ciência da computação moderna iniciou-se com Alan Turing, que estabeleceu os fundamentos da computabilidade e lógica algorítmica. Esse avanço gerou discussões sobre limites da computação e sobre teorias de incomputabilidade e de complexidade. Mais recentemente, a ligação entre computação e física propiciou um novo modo de compreender a informação como entidade física e os sistemas computacionais como processos naturais de transformação de energia e informação.

O problema central desta pesquisa consiste em compreender como a computação pode ser vista como um processo físico e até que ponto o universo pode ser entendido como um sistema computacional. Essa questão envolve as limitações da computabilidade clássica e da complexidade física, além das propriedades apresentadas pela física quântica e pelo paradigma da infocomputação. O objetivo desse estudo é investigar relações entre computação, física e informação, focando em modelos formais. A justificativa para sua realização reside na relevância do caráter interdisciplinar do tema, visto que a computação é fundamental para a compreensão de fenômenos em diversas áreas multidisciplinares e pode trazer novos insights para a ciência e a filosofia.

As hipóteses aqui abordadas são: (i) a computação constitui um processo físico; e (ii) o universo pode ser concebido como um sistema computacional quântico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A máquina de Turing

No final do século XIX, os matemáticos identificaram a necessidade de uma base mais sólida para a matemática, em virtude de crises de formalismo, como o paradoxo da teoria dos conjuntos. Outro elemento relevante foi o surgimento de geometrias não-euclidianas, que desafiaram a noção de que a geometria euclidiana seria a única forma válida de descrição do espaço. Cada geometria mostrava-se lógica e consistente, levando à ideia de que a verdade na matemática depende da consistência dos axiomas, e não de correspondência com a realidade.

Para solucionar essas crises, destacou-se a escola formalista de David Hilbert, que propôs a formalização da matemática a partir de axiomas finitos e princípios lógicos. Hilbert estabeleceu três requisitos para um sistema formal: consistência, completude e decidibilidade.

No entanto, Gödel (1931) demonstrou que qualquer sistema capaz de representar a aritmética dos números naturais não pode ser simultaneamente consistente e completo. Se consistente, haverá verdades que não poderão ser provadas, violando dois dos requisitos de Hilbert. A decidibilidade, por sua vez, impactou profundamente a teoria moderna da computação. Algoritmos são procedimentos com passos definidos, e um procedimento de decisão fornece respostas diretas a perguntas. Usando a ideia de procedimento de decisão, Hilbert formulou o *Entscheidungsproblem* (que significa “problema de decisão” em alemão), questionando se existiria um método geral para determinar a validade de qualquer enunciado lógico.

Turing (1937) formalizou o conceito de algoritmo, que mais tarde seria conhecida como a máquina de Turing, a qual tem uma fita dividida em células e um cabeçote que pode ler e escrever. Apesar de sua estrutura simples, tal máquina capaz de resolver problemas complexos. A máquina de Turing universal (MTU) pode simular qualquer outra máquina de Turing. A MTU permitiu demonstrar que o problema da parada, que investiga se um programa específico irá parar ou rodar indefinidamente. Por meio de uma demonstração por contradição, Turing demonstrou que o problema da parada é indecidível, o que significa que não há um algoritmo que possa determinar a validade de todos os enunciados lógicos. Os resultados obtidos por Turing indicam que existem limitações em qualquer linguagem formal e sistema axiomático.

2.2 Computabilidade da máquina de Turing

O trabalho de Turing mostrou que determinadas questões não podem ser resolvidas por máquinas de Turing. Esses casos são denominados problemas incomputáveis, por serem intratáveis. Church (1936) e Turing (1937) formularam a equivalência entre diferentes modelos de computação, posteriormente conhecida como tese de Church-Turing. Essa tese afirma que máquinas de Turing são capazes de representar formalmente qualquer algoritmo.

Um procedimento é considerado algorítmico se puder ser descrito como uma máquina de Turing; assim, se um problema de decisão é solucionável, deve existir uma máquina capaz de resolvê-lo. A computabilidade refere-se à capacidade de números, conjuntos e funções serem calculados por máquinas de Turing. Assim, um processo é dito computável se é realizável por uma máquina de Turing (Lewis; Papadimitriou, 1998).

Ao questionar se todos os números reais são computáveis, percebe-se que, embora exista um conjunto contável de números reais computáveis, há infinitos números irracionais que não

podem ser descritos por algoritmos, sendo incomputáveis. Consequentemente, a maioria dos números reais não é computável. Uma função $f(x)$ é computável se seu valor pode ser determinado por uma máquina de Turing. Contudo, mesmo com inúmeras máquinas, apenas uma fração das funções (tanto em \mathbb{N} quanto em \mathbb{R}) é computável. Isso evidencia a presença de questões limitações lógicas e matemáticas inerentes à computabilidade.

As leis matemáticas da física abrangem funções contínuas e discretas em \mathbb{R} e \mathbb{R}^n , que envolvem questões numéricas, equações diferenciais, funções contínuas, funções discretas, etc. Embora isso possa sugerir a existência de problemas físicos não computáveis, a matemática é abstrata enquanto a física é real. Logo, é necessária reflexão adicional sobre o conceito de computação.

2.3 Complexidade computacional e física

Segundo Papadimitriou (1994), diferentemente da computabilidade, que busca determinar se um problema pode ser resolvido, a complexidade computacional analisa a viabilidade e a eficiência das soluções. A teoria da complexidade utiliza modelos como a máquina de Turing para examinar dois recursos principais: tempo de computação, que é o número de operações lógicas necessárias para realizar uma tarefa (complexidade computacional temporal); e espaço de memória, que é a quantidade de bits usados durante esse processamento (complexidade computacional espacial).

A complexidade física temporal relaciona física e computação, pois depende do tempo que um sistema leva para inverter bits e consumir energia na ação. Quanto maior a energia aplicada, mais rápida é a inversão. A complexidade física temporal pode ser calculada por meio de uma expressão que relaciona a energia e o número de inversões de bits em um certo período, $\phi\text{-TEMPO} = 2Et/\pi\hbar$ (Llyod, 2002).

O espaço de memória também possui um análogo físico, pois a informação está conectada à entropia. Em um sistema em equilíbrio térmico, os bits são aleatórios, mas a computação requer bits específicos. A teoria da computação reversível define a complexidade física espacial sendo $\phi\text{-ESPAÇO} = S_{\text{máx}} - S$, que é a diferença entre a entropia máxima e a entropia real (Llyod, 2002). Reilly e Llyod (2025) chamam essa quantidade de *negentropia*. Enquanto a entropia é composta de bits aleatórios e desconhecidos, a *negentropia* consiste em bits conhecidos e organizados.

As complexidades físicas de tempo e espaço definem os limites do que sistemas físicos podem computar. Reilly e Llyod (2025) destacam que, embora $\phi\text{-TEMPO}$ e $\phi\text{-ESPAÇO}$

sejam apenas números, tais quantidades são influenciados tanto pelas leis da física quanto pelas leis da computação, ou seja, possuem significado físico concreto, pois relacionam-se aos recursos de *negentropia*, energia e tempo necessários para realizar cálculos.

Processar operações requer tempo, espaço e trabalho, sendo que o trabalho que um sistema pode realizar é igual à sua energia livre. Cada operação lógica consome energia, conseqüentemente a energia livre usada para realizar cálculos é proporcional ao número de operações. Como a energia livre indica o trabalho que um sistema pode realizar, temos então que a complexidade física livre é dada por $\phi\text{-LIVRE} = F - F_{eq}$, onde $F = E - TS$ sendo a energia livre e F_{eq} a energia livre no equilíbrio térmico na temperatura T (Llyod, 2002).

Cada operação lógica tem uma base física e se relaciona a processos dinâmicos. Em computadores tradicionais, portas lógicas usam transistores que mudam seu estado conforme as entradas. Já em computadores quânticos, uma porta lógica representa uma transformação unitária sobre certos graus de liberdade. No processamento de informações biológicas, uma operação é definida pela dinâmica de formação/quebra de ligações químicas, que são essenciais para a reprodução e o metabolismo.

A $\phi\text{-LIVRE}$ envolve recursos como tempo, energia, informação/entropia e demonstra as restrições impostas pelas leis físicas na computação. Por fim, Reilly e Llyod (2025) apontam que o desenvolvimento da inteligência artificial é impactado por esses limites, visto que a eficiência das computações digitais atuais é muito inferior à das redes neurais biológicas.

2.4 Computação como processamento de informação

Burgin (2005) define a computação como o processamento de informações. Burgin também aponta que os sistemas de processamento de informações possuem três componentes: *hardware* (equipamentos físicos), *software* (programas que operam o sistema) e *infoware* (informação processada). O *infoware* é importante porque reflete a interação entre *hardware* e *software*, possibilitando a troca de informação e conhecimento. Dessa forma, a computação envolve tanto mudanças na estrutura de dados quanto a conservação da informação.

A concepção de computação como manipulação de símbolos teve início em discussões matemáticas no começo do século XX. A teoria matemática tradicional da computação concentra-se nos algoritmos, razão pela qual os computadores teóricos ideais são tratados como objetos matemáticos equivalentes a algoritmos, autômatos abstratos, procedimentos efetivos, funções recursivas e linguagens formais. De acordo com Abramsky (2016), os modelos de computação de primeira geração surgiram dos desafios

de formalização da matemática e da lógica. Na segunda geração, entretanto, esses sistemas isolados foram substituídos por processos ou agentes, cujas interações entre si e com o ambiente se tornaram fundamentais.

Bateson (1972, p. xxv-xxvi.) define informação como “a diferença que faz a diferença na percepção do agente sobre o mundo.” Essa percepção varia conforme o sistema de coleta de dados do agente, influenciando sua compreensão da realidade. Assim, a informação constituiria a representação que o agente cognitivo faz do mundo, enquanto o processamento de informação corresponderia à dinâmica de interação de suas estruturas informacionais.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho fundamenta-se na pesquisa bibliográfica, de caráter exploratório, na qual as informações coletadas de livros e artigos acadêmicos direcionam para as respostas das hipóteses formuladas. A pesquisa bibliográfica fornece informações e conclusões previamente analisados e documentados por outros cientistas e estudiosos. A revisão crítica da literatura permite integrar conceitos provenientes da computação, física e teoria da informação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 A física em termos de informação

A física clássica concebe o universo como uma máquina que opera segundo leis fixas. Nessa perspectiva, agentes ideais seriam capazes de realizar medições sem alterar o estado do objeto estudado, permitindo a obtenção de conhecimento completo a partir da integração dos dados obtidos. Um sistema físico e suas propriedades podem representar o universo ou parte dele, sendo seu estado em um tempo t descrito por um objeto matemático chamado estado S , que possibilita a previsão de medições. Dessa forma, um agente ideal teria conhecimento total do sistema.

A mecânica quântica, por outro lado, introduz um modelo de medição com quatro características principais. A primeira é a descrição, que sugere que os resultados das medições podem ser finitos ou contáveis, contrariando a concepção clássica de que as quantidades variam continuamente. A segunda é a previsibilidade dos resultados em termos de probabilidade, revelando que os eventos não são determinados de forma absoluta por leis universais. Assim, os resultados de um experimento específico tendem a ser incertos, exigindo várias medições.

A terceira característica é a perturbação, pois a medição altera o estado do sistema. Embora medições possam ser repetidas, elas tendem a perturbar de significativamente o estado do sistema, muitas vezes eliminando o estado anterior. A quarta característica, a complementaridade, afirma que uma medição fornece informações apenas sobre determinados parâmetros do sistema, impossibilitando a coleta de dados sobre todos os aspectos de um estado por meio de medições repetidas. Ou seja, um observador necessita utilizar diferentes abordagens para compreender plenamente o sistema.

A física clássica propõe que a realidade pode ser dividida em partes isoladas que são descritas separadamente e combinadas para formar uma descrição do todo. Contudo, o formalismo da física quântica demonstra que a realidade não é simplesmente a soma das partes. Existem estados emaranhados que não podem ser descritos isoladamente. Quando duas partículas interagirem seus estados permanecem correlacionados mesmo quando suas partes estão separadas espacialmente. A medição de uma partícula altera o emaranhamento, modificando permanentemente o sistema. Esse fenômeno desafia a ideia clássica de que interações devem ocorrer a uma velocidade finita. O teorema de Bell indica a existência de conexões entre sistemas entrelaçados que persistem independentemente da distância, influenciando as medições realizadas em sistemas correlacionados (Bell, 1964).

Dado o estado de um sistema, o agente não consegue prever o resultado de uma medição devido à incerteza H , a qual é eliminada após a medição. A função H quantifica a falta de informação antes da medição e é análoga à entropia de Shannon $H(p_1, \dots, p_n) = -\sum p_i \ln p_i$. Shannon (1948) demonstrou que a informação está associada a eventos probabilísticos, contribuindo para uma nova perspectiva nas teorias físicas, especialmente aquelas relacionadas a processos probabilísticos. Wootters (1980) investigou a quantidade de informação que um agente pode extrair de um sistema quântico a partir de cópias do sistema e sugeriu que as leis físicas que maximizam a informação de Shannon são as que efetivamente observadas na natureza.

Vedral (2018) propõe que a informação constitui o elemento mais fundamental da realidade, defendendo que essa abordagem oferece um meio útil de compreender fenômenos físicos e naturais. Vedral aprofunda essa concepção ao afirmar que o universo é essencialmente composto por informação, funcionando por meio de processos de fluxo e refluxo de informação.

4.2 Computação como um processo físico

Landauer (1961) relaciona informação e termodinâmica, demonstrando que a exclusão de um bit de informação exige gasto energético mínimo expresso pela fórmula $E_{min} = k_B T \ln 2$, onde k_B é a constante de Boltzmann e T é a temperatura. Em trabalho posterior, Landauer (1988) reforça que informação é uma entidade física e que operações computacionais envolvem dissipação de energia na forma de calor, evidenciando a natureza física da informação.

A máquina de Turing, que altera seus estados de forma determinística, reflete princípios da física clássica e constitui a base conceitual dos computadores modernos. Turing contribuiu a aproximação entre física e computação ao destacar que o projeto de qualquer máquina computacional deve respeitar as leis físicas. Isso suscita o questionamento acerca de como a teoria quântica pode modificar o processamento de informações, seja ao impor novas limitações, seja ao oferecer novas possibilidades, especialmente devido a fenômenos como o emaranhamento.

Na teoria da informação quântica, o qubit é a unidade fundamental, e sua medição fornece apenas informações limitadas, pois o ato de medir altera seu estado e distingue o estado anterior do estado pós-medição. A hipótese de Church-Turing sugere que qualquer função matemática computável pode ser realizada por um computador digital universal. Deutsch (1985), entretanto, propõe que qualquer estrutura natural pode ser simulada por um computador quântico universal, afirmando que qualquer dinâmica física computável pode ser calculada por meio de computação quântica.

4.3 Física infocomputacional

O termo computação está associado ao processamento de informações; contudo, existem diferentes definições de informação. Na termodinâmica, a informação está relacionada à entropia e à incerteza sobre o estado de um sistema. Já na teoria da informação, ela é uma medida da probabilidade de eventos e da dependência entre variáveis. Em ambas as perspectivas, a computação pode ser compreendida como o processamento de informações.

Hewitt (2007) afirma que a informação estabelece relações entre os sistemas físicos, sendo possível que cada sistema contenha informações sobre o outro. Isso implica que todos os sistemas físicos processam informações. Considerando-se que todo estado físico carrega informações, conclui-se que qualquer sistema físico realiza processamento de informação a partir da manipulação de seus estados.

A computação pode ser definida como o processamento de informação segundo o modelo de ator proposto por Hewitt, Bishop e Steiger (1973). Nesse modelo, dispositivos computacionais atuam como agentes autônomos (atores). Os atores são centrais no processo computacional: respondem a mensagens, tomam decisões locais, criam novos atores e determinam suas futuras respostas. A computação é distribuída, assíncrona e sem estados bem definidos, diferente da máquina de Turing, que é sequencial e determinística.

O modelo de ator está fundamentado em princípios físicos, diferente de outros modelos, como o de Turing, que se baseiam em lógica matemática, teoria de conjuntos e álgebra. Cada ator possui seu próprio tempo e processa informações independentemente, de forma semelhante ao que ocorre na física relativística. Os estados são locais e somente se alteram mediante interações, como na mecânica quântica. Sistemas distribuídos emergem da interação entre múltiplos elementos autônomos, de modo semelhante ao que ocorre na termodinâmica (Hewitt, 2012).

A infocomputação é um conceito que descreve a computação como um processo de auto estruturação da informação, no qual todos os sistemas físicos se comportam como entidades computacionais por meio de interações baseadas em mensagens (Dodig-Crnkivic, 2017). Se a computação é vista como um processo físico, e se as leis físicas regem esse processo, então a computação ocorre em diversos níveis da natureza.

Dessa forma, pode-se visualizar a dinâmica dos estados físicos na natureza como processamento de informações. Isso inclui níveis mecânicos, quânticos, clássicos e biológicos, onde ocorre computação em células, tecidos, órgãos, organismos e ecossistemas. Interações sociais também podem ser incluídas na infocomputação, uma vez que envolvem processos comunicativos e interativos.

4.4 O Universo como um computador quântico

De acordo com Lloyd (2004), o universo é um sistema físico que registra bits de informação através de seus estados. Qualquer sistema físico que tenha dois estados registra um bit, enquanto sistemas com maior número de estados registram mais bits. A evolução de um sistema físico assemelha-se a um processo computacional: cada bit não apenas representa um valor associado ao estado do sistema, mas também orienta ações — por exemplo, 0 pode significar “execute isto” e 1 “execute aquilo”. Todos os sistemas físicos registram informações e, ao evoluírem, processam essas informações. Até meados do século XX, a ciência

concentrava-se na energia; desde então, a informação passou ser igualmente importante. A energia executa ações, enquanto a informação orienta tais ações.

Se a informação é física e a computação consiste em seu processamento, seria possível conceber o universo como um computador? A mecânica quântica descreve sistemas fundamentais cujos princípios não podem ser reproduzidos por modelos clássica. Portanto, o universo não pode ser entendido como um computador clássico convencional. Um computador quântico utiliza efeitos quânticos para realizar cálculos que os computadores clássicos não conseguem. Feynman (1982) propôs que dispositivos quânticos poderiam simular sistemas quânticos, e Lloyd (1996) desenvolveu um algoritmo capaz de executar tal simulação. Um computador quântico pode programar qualquer interação quântica, simulando eficientemente outros sistemas quânticos. Consequentemente, eles são logicamente equivalentes. A construção Feynman-Lloyd mapeia dinâmicas quânticas em um computador quântico, de modo que universo se torna indistinguível de um computador quântico.

A teoria da informação algorítmica mede a complexidade de representar textos ou sequências de bits em um computador, avaliando a quantidade de informação de um objeto pelo tamanho do programa mais curto capaz de gerá-lo. Sequências simples podem ser descritas por programas curtos, enquanto sequências complexas não permitem redução significativa em sua descrição. Ainda assim, programas simples podem gerar saídas complexas, mesmo de maneira aleatória. Dodig-Crnkovic (2017) argumenta que as flutuações do vácuo quântico fornecem bits aleatórios de entrada para a computação quântica do universo. Krauss (2012) sugere que o universo pode ter surgido do "nada", onde o nada são as flutuações do vácuo quântico.

Lloyd (2004) afirma que os comportamentos complexos que vemos ao nosso redor decorrem da aleatoriedade inerente ao universo computacional, gerada pela superposição dos estados do programa no estado inicial do universo. No universo primitivo, flutuações quânticas produziram múltiplas entradas possíveis, interpretadas como instruções em computações quânticas paralelas. À medida que o universo evoluiu, bits quânticos interagiram, se inverteram e criaram novas superposições. A informação difundiu-se, resultando em decoerência e rupturas de possibilidade. Chandler (2023) diz que ao longo do tempo, regras computacionais básicas podem gerar toda a complexidade presente no universo.

As interações fundamentais da natureza permitem operações lógicas quânticas. O universo computa seu próprio estado a partir do atual, ou seja, o universo está computando sua própria evolução dinâmica. Os fenômenos que vemos ao nosso redor emergem do processamento de informações em diversos níveis de organização.

5 CONCLUSÃO

O estudo evidencia que a computação ultrapassa os limites estritamente matemático e tecnológico. Desde a formalização da máquina de Turing até os avanços da física quântica, observa-se que a informação possui caráter físico e que informação e computação são processos intrinsecamente vinculados. Compreender a realidade como resultado do processamento de informações permite integrar física, computação e sistemas complexos — biológicos, químicos, sociais, entre outros — por meio de um paradigma unificado. Esse entendimento oferece não apenas um modelo explicativo inovador, mas também um caminho fértil para futuras investigações interdisciplinares.

Em um universo computacional, os fenômenos emergem de algoritmos simples operando sobre elementos fundamentais de computação. O universo certamente não é um computador digital rodando um sistema operacional, mas organiza e manipula informações de forma estruturada. Qualquer interação entre graus de liberdade é suficiente para executar uma operação lógica quântica nesses graus de liberdade.

Os resultados analisados sugerem que o universo, como um todo, é capaz de realizar computação quântica. Mesmo que o universo não seja um computador convencional, ele ainda pode computar no sentido de processar informações. E o que o universo está computando? Ele está computando seu próprio comportamento. O universo computa a si mesmo.

REFERÊNCIAS

- ABRAMSKY, S. Information, processes and games. **Philosophy of Information**, Amsterdam, Netherlands: North Holland, 2008.
- BATESON, G. **Steps to an ecology of mind**. New York: Ballantine, 1972.
- BELL, J. S. On the Einstein Podolsky Rosen paradox. **Physics**, v. 1, n. 3, p. 195-200, 1964.
- BURGIN, M. **Super-Recursive Algorithms**. Berlin; Heidelberg: Springer Science Business Media, 2025.
- CHANDLER, D. L. Could the universe be a giant (quantum) computer? *Nature*, v. 620, n. 7976, p. 943-945, 31 ago. 2023.
- CHURCH, A. An unsolvable problem of elementary number theory. **American Journal of Mathematics**, v. 58, n. 2, p. 345-363, 1936.

DEUTSCH, D. Quantum theory, the Church–Turing principle and the universal quantum computer. **Proceedings of the Royal Society London A**, v. 400, p. 97-117, 1985.

DODIG-CRNKOVIC, G. Nature as a network of morphological infocomputational processes for cognitive agents. **European Physical Journal – Special Topics**, v. 226, p. 181-195, 2017.

FEYMAN, R. P. Simulating physics with computers. **International Journal of Theoretical Physics**, v. 21, p. 467-488, 1982.

HEWITT, C.; BISHOP, P.; STEIGER, P. A universal modular ACTOR formalism for Artificial Intelligence. **IJCAI – Proceedings of the 3rd International Joint Conference on Artificial Intelligence**, Stanford, CA, USA, San Francisco, CA, USA: William Kaufmann, 1973.

HEWITT, C. What is computation? Actor model versus Turing’s model. **A computable universe, understanding computation & exploring nature as computation**. Londres, Imperial College Press, 2012.

KRAUSS, L. **A Universe from Nothing: Why There Is Something Rather Than Nothing**. New York: Free Press, 2012.

LANDAUER, R. Irreversibility and heat generation in the computing process. **IBM Journal of Research and Development**, v. 5, n. 3, p. 183-191, 1961.

LANDAUER, R. Dissipation and noise immunity in computation and communication. **Nature**, v. 335, p. 779-784, 1988.

LEWIS, H. R.; PAPADIMITRIOU, C. H. **Elements of the Theory of Computation**. 2^oed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998.

LLOYD, S. Universal quantum simulators. **Science**, v. 273, p. 1073-1078, 1996.

GÖDEL, K. Uber formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I’, **Monatshefte für Mathematik und Physik** v. 38, p.173–198, 1931.

TURING, A. M. On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. **Proceedings of the London Mathematical Society**, ser. 2, v. 42, n. 2, p. 230-265, 1937.

VEDRAL, Vlatko. *Decoding Reality: The Universe as Quantum Information*. Oxford: Oxford University Press, 2018. Edição online: Oxford Academic, 12 nov. 2020.

WOOTTERS, William Kent. *The Acquisition of Information from Quantum Measurements*. 1980. Tese (PH.D. Physics) – University of Texas, Austin, TX, USA, 1980.