

Instituto Principia
Escola de talentos

Gatos Instáveis - turma 2024

Memória de Trabalho: uma análise através da ótica da Neurociência Computacional

Autor: Isabella Stimer Eberhardt

Orientador: Antônio Carlos Roque da Silva Filho

Paraná
Julho, 2026

Agradecimentos

Primeiramente, à minha família, que sempre me apoiou e esteve ao meu lado, com seu amor incrível.

Aos meus pais, meus melhores amigos, minha casa, que sempre me estimularam a entender o mundo, e muitas vezes deixaram de correr para que eu pudesse voar. Vocês são um mosaico no meu coração.

Ao Wellington, pela paciência e cuidado, e adedicação em todos os encontros e viagens.

Ao Instituto Principia, principalmente à Escola de Talentos, que mudou a minha visão sobre física e ciência, mostrando um novo mundo, deixando uma marca profunda na minha formação e aspirações científicas. A todos os professores que fizeram parte deste projeto, Ricardo Matheus, Leonardo de Lima, André Paschoal e Marcelo Guzzo sempre dispostos a nos ensinar, fundamental para despertar minha paixão pela pesquisa.

Ao professor Antonio Roque, meu orientador, que me guiou na síntese do meu projeto, abordando diversos tópicos, e me aproximando muito mais de uma grande paixão, a neurociência. Obrigada pela calma e disponibilidade, foi um privilégio imenso poder trabalhar com o senhor.

À minha turma, os Gatos Instáveis, companheiros dessa jornada e desafio, mas também de risadas e memórias, mesmo com a distância, o sentimento de pertencimento continua.

Aos meus professores do ensino médio, principalmente aos professores de física Willian Kolc e Samuel Leopolski, que tornaram o aprendizado fluído e leve, tendo sempre risadas em suas aulas, admiro muito os dois e sou grata por mostrarem que eu era mais do que imaginava.

Aos meus colegas e amigos, que fazem parte do meu dia a dia, obrigada pelas conversas variadas, pelos momentos de descontração e por mesmo sem fazer parte do projeto, me incentivaram e estiveram do meu lado.

Acima de tudo, a Deus, meu refrigerio, meu pai amoroso, que abriu essa oportunidade e me manteve em todas as dificuldades. Obrigada por sua graça imensurável.

A todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, torceram por mim e contribuíram para este trabalho que é o reflexo do afeto e do suporte de cada um de vocês.

Resumo

Esta monografia transcorre pela fusão da Neurociência com a modelagem computacional, tendo como foco a memória de trabalho. A Neurociência tem como objeto o estudo o sistema nervoso, de modo multiescalar, desde o nível molecular até o sistêmico. Já a abordagem computacional é vista como uma ferramenta de análise, que atua na criação de modelos que "traduzem" fenômenos neurobiológicos em linguagem matemática, mas também designa que o cérebro, como um todo, realiza computações, em um sentido mais geral do termo. O objetivo da neurociência computacional é estudar e compreender processos e comportamentos, utilizando-se de modelos para isso. Serve para manter durante alguns segundos a informação que está sendo processada no momento. Dando continuidade aos nossos atos.

Já a memória de trabalho serve para determinar o contexto em que diversos acontecimentos, fatos ou outro tipo de informação ocorrem, se vale a pena ou não fazer uma nova memória disso ou se essa informação já consta dos arquivos.

A partir disso podemos entender com mais clareza diversas alterações biológicas, como doenças, síndromes e transtornos. Além da área com um crescimento exponencial, a Inteligência Artificial.

1 Introdução

Por início, alguns conceitos básicos devem ser introduzidos a fim de contextualizar e compreender melhor a temática.

As estruturas nervosas e sua complexidade quando conhecidas um pouco mais a fundo , trazem a clareza do motivo e das consequências de todo o funcionamento do Sistema nervoso, e em principal para essa pesquisa, a memória.

2 Sistema Nervoso

O sistema nervoso pode ser dividido em central e periférico (Figura 1). O Sistema Nervoso Central (SNC) é composto de dois órgãos principais o encéfalo, que integra o cérebro, e a medula espinhal. O cérebro ocupa a maior parte do encéfalo e nele se coordena variadas funções, se processa informações e é a base o raciocínio e linguagem

A outra subdivisão presente nele: os lobos cerebrais (Figura 2). São eles o frontal, occipital, temporal, parietal e da ínsula. A memória de trabalho é processada no lóbulo frontal, assim como o raciocínio, mas isso será discutido melhor mais adiante.

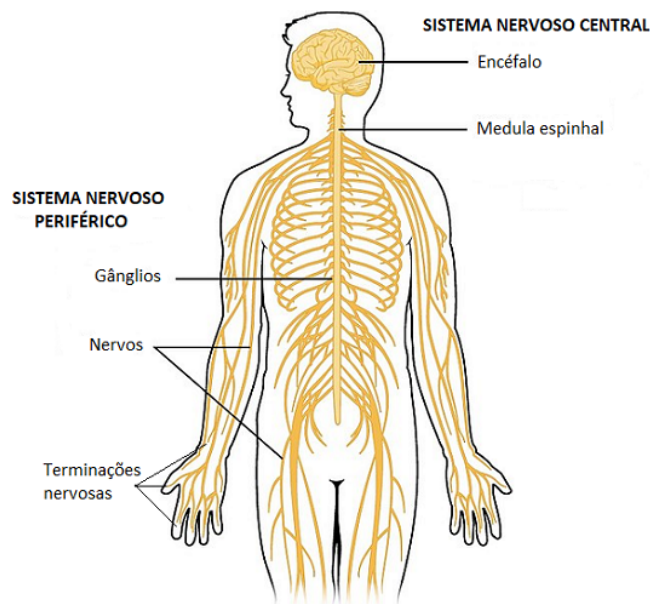


Figura 1: Sistema nervoso central e periférico. Crédito: imagem modificada de OpenStax, CC-BY-SA-4.0. Acesso em: 08/07/2026.

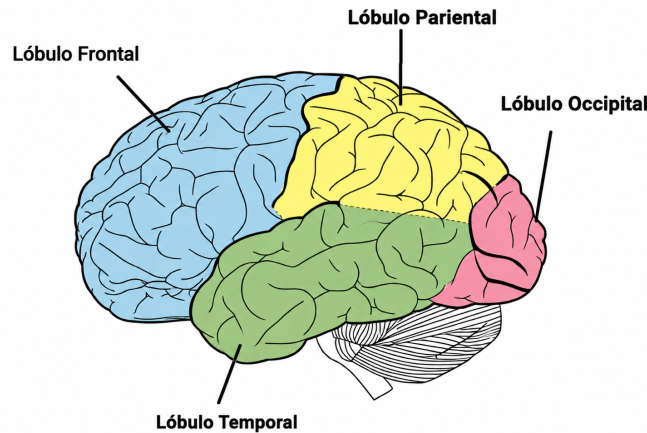


Figura 2: Anatomia dividida evidenciando os lobos cerebrais. Gray e Mysid (2006). Imagem modificada. Disponível em: wikipedia.org. Acesso em: 8 jul. 2026.

3 Os Neurônios

O Neurônio é a principal célula e a unidade funcional básica do sistema nervoso, acredita-se que existem 86 bilhões deles apenas no encéfalo.

Assim como as células comuns, os neurônios possuem membrana plasmática, ribossomo, núcleo, etc. O principal traço que difere os neurônios em relação às células em geral, reside na sua especialização para a comunicação intercelular.

Uma estrutura neuronal padrão compreende três componentes essenciais: os dendritos, a soma e o axônio (Figura 3). Os dendritos são a entrada para os sinais de outros neurônios, passando a ser transmitido para a soma, que processa e gera potenciais de ação, potenciais elétricos que ocorrem apenas se o estímulo for o suficiente. O potencial segue até o axônio, uma grande ramificação, que é o canal de saída. Nos fins desses canais são localizadas as sinapses.

Outro fator importante é que os neurônios não são células retransmissoras, mas sim células que modificam e adicionam informações, além de que, em consequência a suas múltiplas ligações com milhares de outras origens, ele integra diversos sinais e os envia de maneira não linear a milhares de novos neurônios.

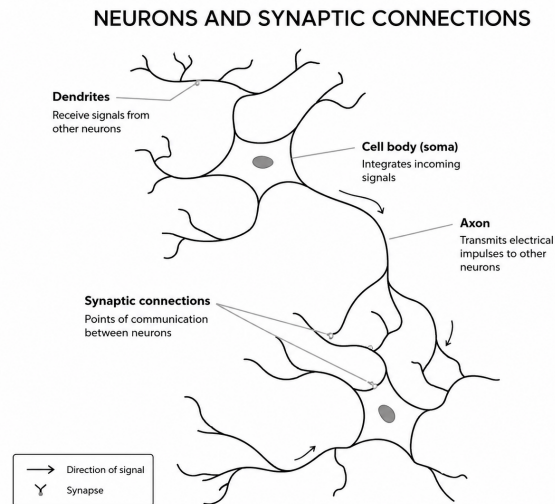


Figura 3: Esquema simplificado da comunicação entre neurônios por meio de conexões sinápticas.

4 Membrana e potencial de ação

A membrana neuronal atua como um capacitor, pois separa cargas elétricas entre o interior e o exterior da célula. Essa diferença de cargas gera uma diferença de potencial elétrico através da membrana. Considerando o lado de fora da célula como zero de voltagem, o lado de dentro do neurônio geralmente apresenta um potencial entre 50 e 90 mV. Isso significa que a face interna da membrana é eletricamente negativa em relação à face externa.

A permeabilidade da membrana a determinados íons depende das condições elétricas, químicas e mecânicas do ambiente em que a célula está imersa. Entre os principais íons envolvidos nesse processo estão o sódio e o potássio. O neurônio tende a concentrar potássio em seu interior e a expelir sódio para o exterior. Um dos mecanismos responsáveis por manter esse desequilíbrio é a bomba de sódio-potássio, formada por proteínas que utilizam energia metabólica, obtida pela hidrólise de ATP, para transportar três íons sódio para fora da célula e dois íons potássio para dentro. Esse processo ajuda a explicar o alto consumo energético das células nervosas.

Quando o potencial de membrana se torna mais negativo do que o potencial de repouso, diz-se que a célula está hiperpolarizada. Quando esse potencial fica menos negativo, aproximando-se de zero, ocorre a despolarização. Entretanto, para que um potencial de ação seja gerado, é necessário que a despolarização atinja um valor crítico, chamado limiar. Quando esse limiar é alcançado por uma corrente despolarizante suficientemente forte, ocorre uma mudança rápida e intensa na voltagem da membrana. O potencial de membrana torna-se positivo por cerca de meio milissegundo e, em seguida, retorna a valores negativos próximos ao potencial de repouso (Figura 4).

Os potenciais de ação são fundamentais para a comunicação entre neurônios, porque são o único tipo de alteração no potencial de membrana capaz de se propagar por grandes distâncias sem sofrer atenuação significativa. Outros tipos de despolarização ou hiperpolarização são fortemente reduzidos ao longo do caminho e, em geral, não se propagam por distâncias superiores a 1 mm.

A existência de um limiar para a geração do potencial de ação é importante porque impede

que pequenas flutuações aleatórias do potencial de membrana produzam sinais nervosos. Assim, apenas estímulos suficientemente relevantes, capazes de ultrapassar esse limiar, são transmitidos como informação ao longo do axônio e comunicados a outros neurônios.

Esse funcionamento segue a chamada lei do tudo ou nada. Se o estímulo não for forte o suficiente para atingir o limiar, nenhum potencial de ação será produzido. Porém, se o estímulo atingir ou ultrapassar o limiar, será gerado um potencial de ação completo, sempre com a mesma forma e amplitude, independentemente de o estímulo ser apenas suficiente ou muito mais intenso do que o necessário.

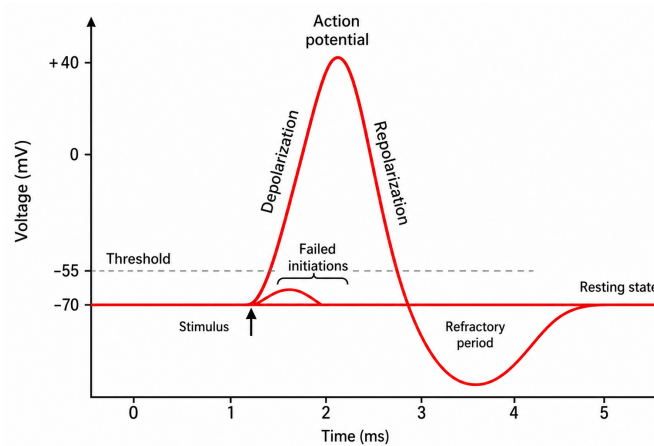


Figura 4: Fases de um potencial de ação e variações na voltagem da membrana neuronal ao longo do tempo. Fonte: Adaptado de Wikimedia Commons (Chris 73; Diberri; tiZom, CC BY-SA 3.0).

5 Sinapses

A sinapse é a região de conexão de dois neurônios. O neurônio transmissor é designado de pré-sináptico, o que recebe o sinal é designado de pós-sináptico. As sinapses não são juntas, existe uma fenda no meio delas chamada fenda sináptica. A conexão entre as células podem ser de caráter química ou elétrica. A sinapse química é mais abundante no cérebro, por isso terá um foco maior. Porém a maior diferença entre as duas é o fato da elétrica ser mais rápida na transmissão, e o sinal é bilateral, enquanto a química é lenta e unilateral. As sinapses químicas tendem a ser muito mais moduláveis que as elétricas, promovendo maior plasticidade sináptica, termo que será explicado adiante.

Em resumo, o funcionamento das sinapses químicas inicia-se com a chegada de um potencial de ação ao terminal pré-sináptico, desencadeando a abertura de canais de cálcio dependentes de voltagem (Figura 5). O influxo de íons Ca^{2+} promove a exocitose de vesículas sinápticas, liberando neurotransmissores na fenda sináptica. Essas moléculas difundem-se e ligam-se a receptores específicos na membrana pós-sináptica, alterando sua permeabilidade iônica e gerando um potencial pós-sináptico. Por fim, o sinal é interrompido por mecanismos de recaptção celular ou degradação enzimática dos neurotransmissores.

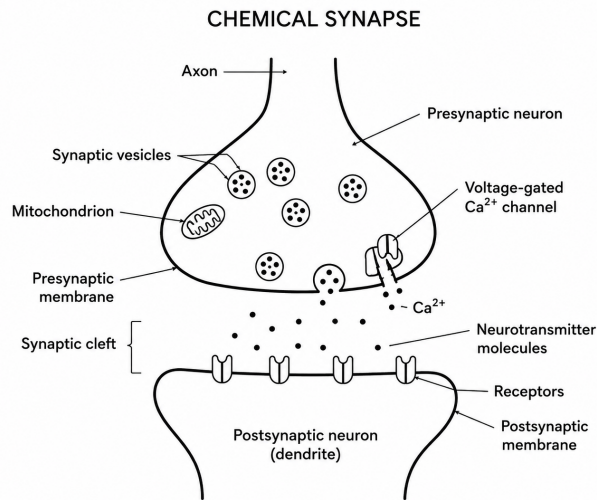


Figura 5: Esquema sobre sinapses químicas

Os receptores que participam da interação podem ser excitatórios ou inibidores. Os excitatórios reduzem temporariamente a diferença de potencial elétrico entre o interior do neurônio e o meio externo. Já os receptores inibitórios exercem o efeito oposto, aumentando essa diferença de potencial. Para que um neurônio consiga gerar um potencial de ação e transmitir o impulso nervoso para outros neurônios, é necessário que ele seja despolarizado até atingir o limiar.

Existem drogas que são capazes de imitar os efeitos dos neurotransmissores nos seus receptores, chamadas agonistas. Há também os antagonistas, que se ligam no lugar das substâncias originais, impedindo sua ação. Alguns exemplos de substâncias agonista são a morfina, e heroína, já de substâncias antagonistas é comum citar a Naloxona e os alucinógenos.

Os principais neurotransmissores no processo da memória são o glutamato, GABA, e dopamina, a noradrenalina, a serotonina e a acetilcolina, moléculas simples. Já quando se trata de moléculas mais complexas, destaca-se os peptídeos, pequeno conjunto de aminoácidos.

Um dos neurotransmissores mais conhecidos são a dopamina, noradrenalina, serotonina e acetilcolina. Nos últimos anos, a imprensa tem popularizado bastante esses nomes, principalmente porque muitos medicamentos usados no tratamento da ansiedade, da depressão e de outras alterações emocionais ou do estado de ânimo atuam modificando a função desses neurotransmissores.

No entanto, ao contrário do que muitas vezes se sugere em matérias jornalísticas, nenhum deles pode ser chamado simplesmente de “transmissor da felicidade”, “do prazer”, “da angústia” ou “da excitação”. Seus efeitos dependem do local onde são liberados, dos receptores sobre os quais atuam e da estrutura cerebral envolvida.

A dopamina, por exemplo, quando age sobre receptores D1 no núcleo accumbens, participa dos mecanismos relacionados à dependência de drogas. Em outras regiões, atuando sobre o mesmo tipo de receptor, pode estar envolvida na atenção; em outras, em certas sensações prazerosas; e, ainda em estruturas como o hipocampo e a amígdala, na formação de memórias e/ou na sua persistência.

6 Circuitos e Redes neurais

Uma célula neural sozinha não é capaz de exercer um processo, mas quando conectadas, essas milhares podem sentir, pensar, lembrar e outras inúmeras funções. Leva-se em conta o fato de que não são órgãos independentes, mas sim processos derivados de uma interconexão de áreas do cérebro, criando assim uma rede. Uma determinada parte do cérebro pode até ter o papel central em determinada função, porém regiões encefálicas específicas não são responsáveis por faculdades mentais específicas.

Através de análises, observa-se um padrão elementar na maneira que os neurônios se conectam, a fim de realizar computações. Esse padrão se repete em escalas muito maiores, mas o menor conjunto de neurônios ligados que produzem uma função, ou seja, o menor desses agrupamentos, se chama de microcircuito canônico.

Somando a isso, um fator essencial para essa teia é a plasticidade sináptica, sendo o reflexo biológico das adaptações e aprendizados biológicos sofridos pela rede. As conexões entre as células nervosas podem ser enfraquecidas baseado nas experiências. Essas modificações podem ser de curta duração ou de longa duração, podendo durar anos ou até a vida inteira (chamada plasticidade hebbiana).

No começo do século XX, o zoólogo alemão Richard Semon (1859-1918) criou o termo "engrama" para definir a base física da memória. Ele defendia que os estímulos externos geram alterações físico-químicas duradouras em grupos de células cerebrais, servindo como o registro material dessas vivências. Além da ideia de assembleias neuronais, teorizadas por Donald Hebb, grupos de neurônios são definidos pela força de suas conexões entre si. Os neurônios individuais podem estar espalhados, porém devem estar intensamente conectado com os outros, além da capacidade de participarem de mais de uma rede ao mesmo tempo.

De maneira simplificada, podemos dizer que essas redes são um conjunto de várias unidades de processamento, neurônios artificiais. Quando interligadas, conseguem ter um comportamento inteligente.

O funcionamento de um neurônio artificial inicia-se com a apresentação dos sinais de entrada. Cada um desses sinais é multiplicado por um peso, que representa o grau de influência de cada entrada sobre a saída da unidade. Em seguida, é realizada a soma ponderada desses valores, gerando um nível de atividade. Por fim, esse nível é comparado ao limiar. Caso o nível de atividade ultrapasse esse limite, o neurônio produz uma resposta de saída; caso contrário, permanece inativo. (Figura 6)

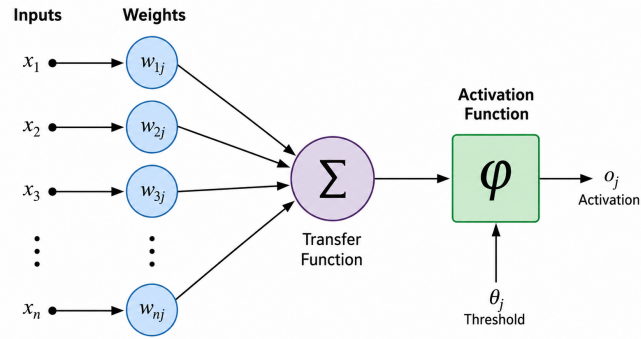


Figura 6: Estrutura de um neurônio artificial. Representação esquemática de um neurônio artificial, ilustrando as entradas, os pesos sinápticos, o somatório, a função de ativação e a saída do modelo computacional. Fonte: Wikimedia Commons. Artificial neuron structure.svg. Disponível em: https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:Artificial_neuron_structure.svg. Acesso em : 13 jul. 2026.

Aspecto	Redes Biológicas	Redes Artificiais
Componentes	Neurônios, dendritos, axônios, sinapses	Nós (unidades), links (pesos)
Tipo de Sinal	Eletroquímico (analógico)	Númerico (computacional)
Aprendizagem	Gradual, adaptativa	Ajuste paramétrico (pesos, backpropagation)
Adaptabilidade	Alta (plasticidade e autorregulação)	Baseada em algoritmos e dados de treino
Velocidade	Relativamente lenta (milissegundos)	Pode ser muito rápida
Escala	Bilhões de neurônios	Tipicamente em milhões ou menos

Figura 7: Tabela comparações redes neurais biológicas e artificiais.

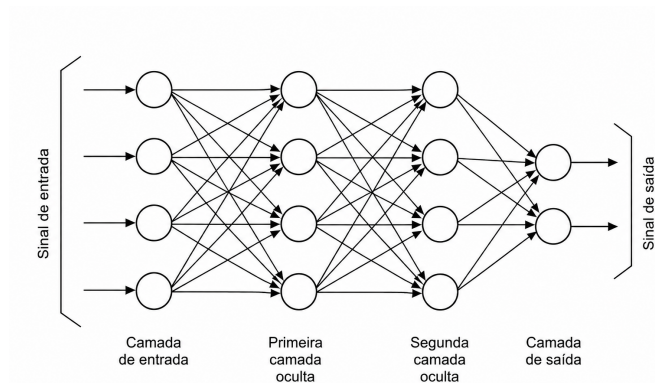


Figura 8: Arquitetura de uma rede neural artificial do tipo perceptron multicamada (MLP). Esquema ilustrando a organização de uma rede neural artificial composta por uma camada de entrada, duas camadas ocultas e uma camada de saída, com conexões totalmente conectadas entre neurônios adjacentes.

7 O que é memória ?

Mesmo sendo uma ideia e palavra usada de forma habitual e por todos os tipos de pessoas, o seu significado pode ser subjetivo e um tanto quanto reflexivo, quando ignoramos o costume e damos uma atenção especial, percebemos o quão extraordinário é a capacidade de lembrarmos, não só de aprendizados, mas de acontecimentos emotivos, sensações físicas, até de questões identitárias.

Porém, em segundo plano, visto através da lente da ciência, a memória é a aquisição, formação, evocação e conservação de informação. Um conjunto de lembranças de cada um determina aquilo que se denomina personalidade ou forma de ser, é o que nos difere como indivíduos.

“Somos aquilo que recordamos” - Norberto Bibbo
(mas também o que resolvemos esquecer)

As memórias são armazenadas nas fendas sinápticas e em redes de neurônios específicas e evocadas pelas mesmas. Elas são fortemente influenciadas a se modular e se estabelecerem pelas emoções, nível de consciência e estado de ânimo. Por exemplo, as redes são fortalecidas em casos de emoções intensas, por isso lembramos com maior facilidade momentos de excessiva alegria ou tristeza.

Com o passar do tempo, vamos esquecendo memórias desnecessárias, porém também incorporamos variações que as enriquecem, as modificam, mesmo que involuntariamente.

Isso ocorre, em partes, pois a memória é uma tradução da realidade em códigos complexos de sinais elétricos e bioquímicos, quando relembremos, precisamos converter novamente a biologia em algo “concreto”, nesses processos ocorrem alterações.

A memória de trabalho é predominantemente processada pelo córtex pré-frontal, assim como memórias em geral, a porção mais anterior do lobo frontal, com destaque para suas regiões ântero-lateral e órbito-frontal. Esse sistema desempenha um papel central na gestão das informações, sendo responsável por explorar e organizar conteúdos relacionados à memória por meio de suas conexões com outras áreas cerebrais. Entre essas conexões, destacam-se as interações com a amígdala basolateral e o hipocampo, mediadas pelo córtex entorrinal. Dessa forma, os processos de exploração da memória conduzidos pelo córtex pré-frontal dependem da comunicação integrada entre essa região, o hipocampo e outras estruturas envolvidas nos mecanismos gerais da memória

7.1 Tipos de Memória e suas diferenças

A memória pode ser classificada em diversas categorias, dependendo do critério adotado. Elas podem ser divididas pelo conteúdo, tempo de duração ou função.

As memórias de fatos e registros, onde conseguimos declarar que existem, são chamadas de declarativas, podendo ser as memórias episódicas, às quais participamos ou assistimos, e as de índole geral as semânticas. As episódicas, são todas autobiográficas, nós sabemos a sua origem. Os conhecimentos comuns, cores, são semânticos. Mesmo que possamos reconhecer a existência ou como as adquirimos, não conhecemos como é definida suas fronteiras, quando o cérebro decide que um episódio começa e outro termina.

O outro tipo de memória que também é classificada a partir do seu conteúdo é a memória de procedimentos. As capacidades motoras e sensoriais, hábitos comuns e ações, como falar, andar, correr, escrever, entre outros. Sendo divididas em implícitas quando não percebe se que estão

sendo adquiridas, enquanto as explícitas tem se consciência e até esforço, dependendo do caso, para formar a memória.

Se organizadas pelo tempo que duram, a maneira mais comum e popular, pode ser dividida em memória curta, longa duração e memória remota. A de curta duração dura até 6h, o tempo necessário para a consolidação das memórias de longo prazo. Quando as memórias de longa duração duram meses ou anos se chamam de memórias remotas.

Ao contrário do senso comum, a memória de curto prazo funciona de forma independente, com dinâmicas e mecanismos próprios, não sendo apenas uma fase inicial da memorização. Já a memória de longo prazo exige tempo para se consolidar, o que a torna altamente vulnerável a interferências e instabilidades nas primeiras horas desse processo

Um exemplo prático dessa separação ficou evidente no caso do paciente K.F. Apesar de apresentar uma lesão grave na memória verbal de curto prazo, suas memórias visual e de longo prazo permaneceram preservadas. Em avaliações médicas, K.F. demonstrou capacidade de reter somente um ou dois dígitos por vez em sua memória de trabalho — um desempenho muito inferior à média humana, que é de sete dígitos. Contudo, ele conseguia adquirir novos vocábulos, recordar fatos e conversar normalmente, mesmo sendo incapaz de reter uma lista numérica simples por poucos segundos.

Essa condição atípica revolucionou os conceitos científicos da época. Até então, o modelo tradicional de Atkinson e Shiffrin propunha uma via única, onde as memórias de curto prazo e de trabalho obrigatoriamente abasteciam a de longo prazo. O caso K.F. provou que ambos os sistemas operam de maneira autônoma, servindo de base para a criação de teorias mais profundas, como o modelo de memória de trabalho.

8 Memória de trabalho

A memória de trabalho é um sistema cognitivo que permite manter informações temporariamente acessíveis e utilizá-las enquanto realizamos alguma tarefa. Manusear e dialogar entre o externo e interno, entre as memórias que já constam nos nossos arquivos e o que vale a pena originar uma nova memória, sem deixar remanescentes. Diferentemente da memória de curto prazo, cuja principal função é apenas armazenar informações por alguns segundos, a memória de trabalho também permite manipular essas informações. Por isso, ela é considerada uma das chamadas funções executivas, conjunto de capacidades mentais responsáveis por organizar o pensamento, controlar a atenção, planejar ações e tomar decisões.

No dia a dia, utilizamos a memória de trabalho o tempo todo. Imagine que alguém lhe diga o caminho para chegar a um museu em uma cidade desconhecida. Enquanto caminha, você precisa manter a sequência de ruas em mente, prestar atenção no trânsito, evitar obstáculos e decidir quando virar à direita ou à esquerda. Se, durante o percurso, você for interrompido por uma distração, talvez já não se lembre exatamente do restante das instruções. Outro exemplo é fazer uma conta de cabeça. Para calcular $37 + 48$, não basta lembrar os números: é preciso somá-los mentalmente, guardar o resultado parcial e utilizá-lo nos passos seguintes. Esses exemplos mostram que a memória de trabalho não apenas conserva informações por um curto período, mas também permite operar sobre elas.

Essa característica distingue a memória de trabalho da memória de curto prazo. Se alguém apenas dita um número de telefone para que ele seja imediatamente discado, basta armazenar a

sequência durante alguns segundos. Porém, se a pessoa disser que o quarto algarismo deve ser substituído por outro antes da ligação, será necessário manter toda a sequência ativa enquanto ela é modificada mentalmente. Nesse caso, a informação está sendo não apenas lembrada, mas também transformada, caracterizando o funcionamento da memória de trabalho.

Os primeiros estudos científicos sobre memória remontam ao final do século XIX, com os experimentos de Hermann Ebbinghaus sobre aprendizagem e esquecimento. Pouco depois, William James distinguiu uma memória responsável pelos conteúdos que permanecem temporariamente na consciência de outra encarregada do armazenamento duradouro. Entretanto, a ideia moderna de memória de trabalho surgiu apenas durante a chamada Revolução Cognitiva, na segunda metade do século XX, quando psicólogos passaram a comparar o funcionamento da mente ao processamento de informações realizado por computadores. Nessa época, George Miller, Eugene Galanter e Karl Pribram propuseram que, para executar um plano de ação, a mente precisava manter temporariamente as informações mais importantes em uma espécie de memória de acesso rápido, que chamaram de *working memory* (memória de trabalho).

Alguns anos depois, Alan Baddeley e Graham Hitch desenvolveram um dos modelos mais influentes para explicar esse sistema. Segundo eles, a memória de trabalho é formada por diferentes componentes especializados. A alça fonológica é responsável por manter informações verbais e sons da fala; o esboço visuoespacial conserva imagens e informações espaciais; e um executivo central coordena a atenção e decide quais informações devem ser mantidas ou manipuladas. Posteriormente, Baddeley acrescentou um quarto componente, o *buffer episódico*, responsável por integrar informações provenientes desses diferentes sistemas e da memória de longo prazo. Esse modelo continua sendo amplamente utilizado na Psicologia Cognitiva.

Ao longo das últimas décadas, outros pesquisadores passaram a defender uma visão diferente. Em vez de considerar a memória de trabalho como um conjunto de compartimentos especializados, propuseram que ela corresponde a um estado temporário de ativação das próprias redes cerebrais que normalmente processam as informações. Assim, quando precisamos manter uma imagem em mente, por exemplo, as áreas visuais do cérebro continuariam temporariamente ativas; quando pensamos em palavras, seriam ativadas principalmente as regiões relacionadas à linguagem. Nessa perspectiva, a memória de trabalho não seria um "lugar" específico onde as informações ficam armazenadas, mas um modo especial de funcionamento de vários sistemas cerebrais distribuídos. Esse debate entre a memória de trabalho como um sistema especializado ("lugar") ou como um estado temporário de ativação ("estado") permanece aberto e constitui um dos principais temas de pesquisa na área atualmente.

Diversos experimentos ajudaram a compreender como a memória de trabalho funciona. Um dos mais conhecidos é o teste de amplitude de dígitos (*digit span*), no qual uma pessoa deve repetir sequências de números apresentadas pelo experimentador. Quando a repetição ocorre na mesma ordem, a tarefa exige principalmente armazenamento temporário; quando a sequência deve ser repetida de trás para frente, torna-se necessário reorganizar mentalmente os números, aumentando a participação da memória de trabalho. Outro paradigma muito utilizado consiste em apresentar rapidamente um conjunto de figuras coloridas e, após alguns segundos, perguntar se uma delas mudou de cor ou de posição. Esses experimentos mostraram que nossa capacidade de manter informações simultaneamente é limitada e depende da atenção.

Modelos computacionais procuram explicar como esses processos poderiam ser realizados pelo cérebro. Alguns modelos assumem que grupos de neurônios permanecem ativos durante todo

o tempo em que uma informação precisa ser lembrada, mantendo-a disponível para uso. Outros sugerem que a informação pode permanecer armazenada temporariamente por mudanças nas conexões entre neurônios, mesmo sem atividade contínua. Embora utilizem abordagens diferentes, esses modelos têm um objetivo comum: compreender como o cérebro consegue manter informações acessíveis, atualizá-las rapidamente e protegê-las contra distrações enquanto realizamos tarefas complexas.

Hoje se sabe que a memória de trabalho desempenha um papel central em praticamente todas as atividades intelectuais. Ela participa da compreensão da linguagem, da leitura, da resolução de problemas matemáticos, do planejamento de ações, da aprendizagem e da tomada de decisões. Além disso, diferenças individuais em sua capacidade estão relacionadas ao desempenho escolar, ao raciocínio lógico e à inteligência fluida, e alterações em seu funcionamento são observadas em diversos transtornos neurológicos e psiquiátricos, como o transtorno do déficit de atenção e hiperatividade (TDAH), a doença de Alzheimer e a esquizofrenia. Por essa razão, a memória de trabalho tornou-se um dos temas mais estudados da Psicologia Cognitiva e da Neurociência nas últimas décadas.

9 Modelos

A dificuldade presente no contexto da neurociência, permite a variação do meio de estudo, surgindo a modelagem teórica. A ideia central baseia-se em traduzir o foco da pesquisa em modelos em linguagem matemática. Surge assim experimentos *in silico*, revolucionando o método científico através dos computadores, onde o *in silico* se trata de experimentos realizados via simulações de modelos matemáticos de sistemas biológicos em um computador.

Um modelo simplifica os fenômenos intencionalmente, mantendo apenas as características essenciais para explicar o comportamento do sistema. A fim de facilitar a compreensão natural dos processos e conecta as suposições teóricas com os dados obtidos nos testes práticos. Além disso, a metodologia une informações vindas de múltiplos níveis, como molecular, celular e sistêmico, o que permite esclarecer novos comportamentos que foram previstos pelo modelo ou notados após a sua criação.

Os modelos computacionais empregados na neurociência podem ser classificados em três categorias principais. Os modelos descritivos têm como objetivo representar e organizar dados experimentais de forma quantitativa, descrevendo o comportamento de neurônios e circuitos sem necessariamente explicar os mecanismos envolvidos. Os modelos mecanísticos buscam compreender como estruturas neurais, conexões sinápticas e processos fisiológicos dão origem às funções cognitivas, incluindo a memória de trabalho. Já os modelos interpretativos (ou normativos) utilizam princípios teóricos, como teoria da informação e otimização, para investigar por que o sistema nervoso processa informações de determinada maneira. Em conjunto, essas abordagens oferecem diferentes perspectivas para compreender a organização e o funcionamento dos sistemas neurais, servindo como base para o desenvolvimento de modelos específicos de memória de trabalho.

Dentre os modelos computacionais desenvolvidos para explicar a memória de trabalho, destacam-se aqueles que descrevem os mecanismos responsáveis pela manutenção e manipulação temporária das informações. Esses modelos diferem quanto ao nível de detalhamento, abrangendo desde formulações matemáticas mais abstratas até simulações de redes neurais biologicamente plausíveis. De modo geral, as principais abordagens podem ser agrupadas em modelos de ati-

vidade persistente, modelos baseados em redes neurais recorrentes e modelos fundamentados na plasticidade sináptica.

Os modelos de atividade persistente partem da hipótese de que as informações permanecem ativas na memória de trabalho devido à manutenção contínua da atividade elétrica de grupos de neurônios durante o intervalo em que o estímulo já não está presente. Nesse contexto, conjuntos de neurônios continuam disparando de forma sustentada, preservando a representação da informação até que ela deixe de ser necessária. Esse comportamento é possibilitado principalmente pela presença de conexões recorrentes entre os neurônios, que permitem a retroalimentação da atividade neural e impedem que o sinal desapareça rapidamente.

As redes neurais recorrentes constituem uma das principais implementações computacionais dessa hipótese. Diferentemente das redes neurais convencionais, elas possuem conexões de realimentação que permitem que informações produzidas em instantes anteriores influenciem o processamento atual. Essa característica torna essas redes especialmente adequadas para representar processos cognitivos que dependem da manutenção temporal de informações, como a memória de trabalho. Além de armazenar representações ao longo do tempo, esses modelos conseguem reproduzir diferentes padrões de atividade observados experimentalmente em circuitos corticais, contribuindo para a compreensão dos mecanismos neurais envolvidos nesse processo.

Embora os modelos baseados em atividade persistente expliquem diversos aspectos da memória de trabalho, evidências experimentais mais recentes sugerem que a manutenção das informações nem sempre depende de disparos contínuos dos neurônios. Como alternativa, foram propostos modelos baseados na plasticidade sináptica, nos quais as informações podem permanecer armazenadas por meio de alterações temporárias na intensidade das conexões entre neurônios. Nessa abordagem, mudanças rápidas na eficácia sináptica permitem conservar as representações mesmo durante períodos de baixa atividade elétrica, reduzindo o consumo energético do sistema nervoso e oferecendo uma explicação complementar para os mecanismos de armazenamento temporário das informações.

Esses diferentes modelos não são necessariamente excludentes. Atualmente, muitos estudos sugerem que a memória de trabalho resulta da interação entre atividade neural persistente, circuitos recorrentes e modificações transitórias nas conexões sinápticas, permitindo explicar de forma mais abrangente a flexibilidade e a capacidade limitada desse sistema cognitivo.

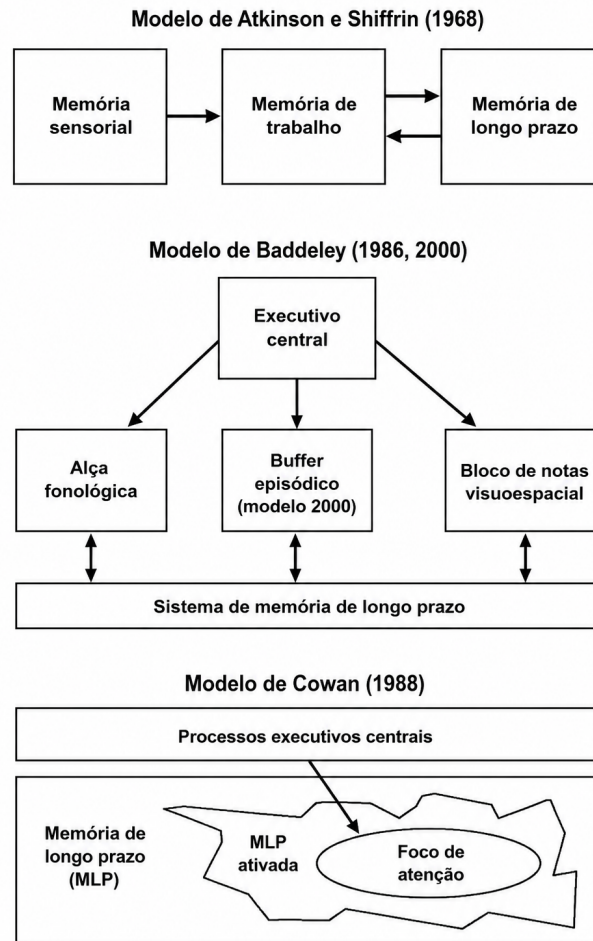


Figura 9: Modelos teóricos da memória de trabalho. Representação esquemática dos modelos de memória propostos por Atkinson e Shiffrin (1968), Baddeley (1986; 2000) e Cowan (1988), evidenciando as principais estruturas e o fluxo de processamento das informações em cada abordagem. Fonte: Elaboração própria, com base em Ricker, AuBuchon e Cowan (2010).

10 Doenças ligadas a memória de trabalho

Muitas doenças neurodegenerativas estão relacionadas a falhas na memória de trabalho, impedindo funções do dia a dia. Por exemplo, ela desempenha um papel fundamental no ajuste fino do comportamento em tempo real. Quando há comprometimento desse sistema, torna-se difícil, ou mesmo inviável, avaliar adequadamente a relevância dos estímulos que ocorrem continuamente. Como consequência, a própria percepção da realidade pode ser significativamente prejudicada.

Na esquizofrenia, observa-se um comprometimento relevante da memória de trabalho. O indivíduo pode apresentar dificuldades em interpretar corretamente o ambiente ao seu redor. Por exemplo, ao entrar em um espaço movimentado, onde diversas pessoas conversam, caminham e mudam de posição, o paciente pode não conseguir organizar essas informações de forma coerente. Em vez de perceber indivíduos distintos, com ações e falas separadas, pode interpretar a cena como

um conjunto desorganizado, ameaçador ou desprovido de sentido. Nessa situação, há prejuízo na discriminação de memórias simultâneas ou sucessivas relacionadas às pessoas, aos gestos, às vozes e aos movimentos percebidos.

Diversos autores contemporâneos, como Weinberger e Danion, apontam que o caráter alucinatório da realidade vivenciada por indivíduos com esquizofrenia pode estar associado a déficits na memória de trabalho. O processamento dessas memórias de maneira inadequada, conferindo-lhes um caráter potencialmente alucinatório.

Outro transtorno afetado é o TDAH (Transtorno de déficit de atenção e hiperatividade). Enquanto grande parcela da sociedade trata a condição neurológica como um problema de memória, estudos apontam que entre 75% e 81% das crianças com TDAH apresentavam graves dificuldades com a memória de trabalho, e não na memória de curto prazo como se imagina.

Esses déficits demonstram a importância da memória de trabalho para diversas funções executivas e justificam o interesse crescente no desenvolvimento de modelos computacionais capazes de compreender esses transtornos.

11 Conclusão

A memória de trabalho representa um dos processos cognitivos mais importantes para o funcionamento humano, pois permite manter e manipular informações temporariamente durante a realização de tarefas, tornando possível o raciocínio, a aprendizagem, a linguagem, a tomada de decisões e o planejamento de ações. Ao longo deste trabalho, observou-se que esse sistema não depende de uma única estrutura cerebral, mas da interação dinâmica entre diferentes regiões do encéfalo, circuitos neurais e mecanismos celulares, evidenciando a complexidade dos processos envolvidos na cognição.

Sob a perspectiva da Neurociência Computacional, os modelos matemáticos e computacionais constituem ferramentas fundamentais para investigar esses mecanismos, permitindo representar, testar e comparar hipóteses sobre o funcionamento da memória de trabalho. Modelos baseados em atividade persistente, redes neurais recorrentes e plasticidade sináptica oferecem diferentes interpretações para a manutenção temporária das informações, sendo atualmente considerados abordagens complementares, e não necessariamente excludentes. A integração dessas diferentes propostas tem contribuído para uma compreensão mais abrangente do processamento cognitivo e do funcionamento dos circuitos neurais.

Além de ampliar o conhecimento sobre os mecanismos biológicos da memória, esses modelos apresentam importantes aplicações clínicas. A compreensão mais detalhada da memória de trabalho auxilia na investigação de alterações observadas em transtornos neurológicos e psiquiátricos, como esquizofrenia, transtorno do déficit de atenção e hiperatividade (TDAH) e doença de Alzheimer, favorecendo o desenvolvimento de estratégias diagnósticas mais precisas e de novas abordagens terapêuticas voltadas à reabilitação cognitiva.

Por fim, as perspectivas futuras apontam para uma integração cada vez maior entre Neurociência Computacional, inteligência artificial, técnicas de neuroimagem e grandes modelos computacionais do cérebro. O desenvolvimento de modelos capazes de representar simultaneamente diferentes níveis de organização do sistema nervoso — do funcionamento sináptico às redes cerebrais — poderá ampliar significativamente a compreensão da memória de trabalho e de sua relação com outros processos cognitivos.

Compreender a memória de trabalho vai muito além de explicar como conseguimos lembrar uma informação por alguns segundos. Significa buscar entender um dos processos que tornam possíveis o pensamento, a aprendizagem, o planejamento e a tomada de decisões, capacidades que fazem parte da experiência humana. Nesse contexto, a Neurociência Computacional estabelece uma ponte entre a biologia, a matemática e a computação, oferecendo novas formas de investigar o funcionamento do cérebro. À medida que essa área avança, amplia-se também nossa capacidade de compreender um dos sistemas mais complexos da natureza e de transformar esse conhecimento em benefícios para a ciência, a medicina e a sociedade.

Referências

- [1] BRAITHWAITE, Lauren. **Working Memory**. The Decision Lab, [2026]. Disponível em: <https://thedecisionlab.com/reference-guide/psychology/working-memory>. Acesso em: 2 jul. 2026.
- [2] KANDEL, Eric R. et al. **Princípios de neurociências**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2014.
- [3] IZQUIERDO, Iván. **Memória**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2011.
- [4] POSTLE, Bradley R.; OBERAUER, Klaus. Working Memory: Theoretical, Computational, and Neural Considerations. In: KAHANA, Michael J.; WAGNER, Anthony D. (org.). **The Oxford Handbook of Human Memory**: Volume 1: Foundations. Oxford: Oxford University Press, 2024.
- [5] ROQUE, Antonio. **Apresentação da Neurociência Computacional**. Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, 2025.
- [6] ROQUE, Antonio. **Elementos Básicos de Neurociência**. Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, 2025. Notas de aula.
- [7] ROQUE, Antônio. **Potenciais de Membrana e de Ação**. Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, 2024.
- [8] ROQUE, Antônio. **Equação da Membrana**. Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, 2024. Notas de aula.
- [9] BHAT, Adithya. **Day 43: Introduction to Neural Networks — Biological vs. Artificial Networks**. Medium, 2025. Disponível em: <https://medium.com/@bhatadithya54764118/day-43-introduction-to-neural-networks--biological-vs-artificial-networks-b8cd40d7df7d>. Acesso em: 25 jun. 2026.
- [10] CARVALHO, André de. **Redes Neurais Artificiais**. São Carlos: ICMC-USP, [20–]. Disponível em: <https://sites.icmc.usp.br/andre/research/neural/>. Acesso em: 22 jun. 2026.