

O Relógio da Mente: Formalismo Matemático e Modelagem Física da Percepção Temporal

Henrique Klemer, Alex Alves Magalhães dos Santos, Sandro Xavier Coelho, Mariana Pedreira da Silva, Marcio Fraiberg Machado, Luciano Faustinoni, Marco Aurélio Silva Areas



<https://doi.org/10.36557/2674-9432.2026v5n6p68-87>

Artigo recebido em 3 de Junho e publicado em 3 de Agosto de 2026

ARTIGO ORIGINAL

RESUMO

Este artigo propõe uma forma unificada de compreender a percepção do tempo no ser humano, contrastando o tempo linear e mecânico dos relógios (t) com a forma fluida e não-linear como a nossa mente realmente o experiencia (τ). A investigação aborda este fenômeno através de duas perspectivas interligadas: uma macroscópica e outra microfísica. No nível macroscópico, utilizamos equações diferenciais ordinárias para traduzir matematicamente aquela sensação tão comum de que o tempo passa cada vez mais rápido à medida que envelhecemos. No nível microfísico, explicam-se as flutuações do cotidiano — como momentos de perigo ou novidade parecerem durar uma eternidade — ligando a Entropia de Informação de Claude Shannon à termodinâmica estatística, apoiando-se na hipótese do tempo térmico de Carlo Rovelli. Para além disso, integra-se a cinética de Arrhenius para demonstrar como o “relógio interno” do ser humano está intimamente ligado ao seu metabolismo e à temperatura do corpo. O modelo matemático construído sugere, em nível teórico, que a percepção do tempo não é uma ilusão abstrata, mas sim algo associado a como o nosso cérebro processa informação e dissipa energia — uma hipótese consistente com o formalismo apresentado, ainda pendente de validação empírica direta. Por fim, explorou-se como estas fórmulas poderiam ser aplicadas na prática: na criação de Interfaces Cérebro-Máquina (ICM) mais confortáveis e eficientes, no desenvolvimento de testes médicos precoces para doenças neurodegenerativas e no desenho de algoritmos de inteligência artificial que conseguem gerir a sua atenção de forma tão inteligente e econômica como o cérebro humano.

Palavras-chave: Percepção Temporal, Equações Diferenciais, Entropia de Shannon, Equação de Arrhenius, Psicofísica Teórica, Interfaces Cérebro-Máquina

ABSTRACT

This article proposes a unified way of understanding human time perception, contrasting the linear, mechanical time of clocks (t) with the fluid, non-linear way our mind actually experiences it (τ). The investigation approaches this phenomenon through two interrelated perspectives: a macroscopic one and a microphysical one. At the macroscopic level, we use ordinary differential equations to mathematically translate the common sensation that time speeds up as we age. At the microphysical level, everyday fluctuations — such as moments of danger or novelty seeming to last an eternity — are explained by linking Claude Shannon's Information Entropy to statistical thermodynamics, drawing on Carlo Rovelli's thermal time hypothesis. In addition, Arrhenius kinetics is integrated to show how the human “internal clock” is closely tied to metabolism and body temperature. The mathematical model constructed suggests, at a theoretical level, that time perception is not an abstract illusion but rather something associated with how the brain processes information and dissipates energy — a hypothesis consistent with the formalism presented, still pending direct empirical validation. Finally, we explored how these formulas could be applied in practice: in the design of more comfortable and efficient Brain-Machine Interfaces (BMIs), in the development of early medical tests for neurodegenerative diseases, and in the design of artificial intelligence algorithms able to manage their attention as intelligently and economically as the human brain.

Keywords: Time Perception, Differential Equations, Shannon Entropy, Arrhenius Equation, Theoretical Psychophysics, Brain-Machine Interfaces

Intituição Afiliada:

Henrique Klemer – Colégio Adventista de Palhoça - SC

Alex Alves Magalhães dos Santos – Colégio CAIC Professor Febrônio Tancredo Oliveira - SC

Sandro Xavier Coelho – Colégio Adventista de Palhoça - SC

Mariana Pedreira da Silva – Colégio Adventista de Palhoça - SC

Marcio Fraiberg Machado – Colégio Adventista de Palhoça - SC

Luciano Faustinoni – Colégio Adventista de Varginha - MG

Marco Aurélio Silva Areas – Colégio Alfa Coqueiros - SC

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



1 INTRODUÇÃO

Na física clássica newtoniana, o tempo é tratado como uma variável independente, absoluta e imutável. Ele flui equanimemente por todo o universo, servindo como o eixo escalar fundamental (t) sobre o qual as leis da dinâmica operam. Contudo, para um sistema termodinâmico complexo e fora do equilíbrio — como o cérebro humano —, a passagem do tempo não é registrada de forma linear.

A experiência consciente introduz um tempo próprio, denotado aqui por τ (tempo subjetivo ou psicológico). A divergência entre o intervalo cronológico mensurado por um relógio físico (Δt) e o intervalo percebido pelo observador ($\Delta \tau$) indica que a percepção temporal é o output de um sistema dinâmico governado por variáveis biológicas, metabólicas e informacionais (EAGLEMAN et al., 2005). O objetivo deste artigo é formalizar matematicamente e fisicamente as equações que regem essa transformação de coordenadas textuais: $t \rightarrow \tau$.

Historicamente, a bifurcação entre a duração puramente matemática e a experiência psicológica foi explorada de forma pioneira por William James em seus *Princípios de Psicologia*, publicados originalmente em 1890 (edição consultada: JAMES, 1989). James introduziu o conceito de "presente especioso" (specious present), definindo que nossa consciência não testemunha um instante matemático infinitesimal isolado, mas sim um bloco dinâmico de duração flutuante que varia de poucos segundos a não mais que um minuto (JAMES, 2023). Para James, a intuição original do tempo possui uma espessura cognitiva (uma porção anterior e outra posterior), operando como o núcleo onde a memória e a história constroem suas métricas retroativas. Essa formulação psicológica serve de sustentação fenomenológica para os modelos dinâmicos descritos nos capítulos seguintes. Além disso, a maleabilidade dessa métrica psicológica ganhou apelo popular na célebre analogia humorística popularmente atribuída a Albert Einstein, embora sua autenticidade não seja verificável em nenhum escrito documentado do físico: "Você entende a relatividade quando vê que uma hora com a sua namorada parece um minuto, e um minuto sentado num formigueiro parece uma hora." Embora de origem apócrifa, a imagem ilustra precisamente a dependência de coordenadas do observador consciente, onde o estado interno do sistema atua como um fator de escala para a compressão ou dilatação do tempo físico.

2 METODOLOGIA

Por se tratar de um artigo teórico-matemático, o "material" empregado neste trabalho é o corpo formal já estabelecido na literatura (equações diferenciais ordinárias, entropia de informação de Shannon e cinética de Arrhenius), e o "método" é a derivação analítica desse formalismo em um modelo unificado, apresentada nas seções 2.1 a 2.3 a seguir. Os resultados dessa derivação — as equações obtidas e sua análise de consistência — são sintetizados na seção 3 ("Resultados e Discussão"), onde também são discutidos, incluindo suas limitações e comparação com a literatura quantitativa existente (subseção 3.1).

2.1 Formalismo Matemático: A EDO da Percepção e a Hipótese Logarítmica

Uma das observações empíricas mais comuns na psicofísica é a sensação de que o tempo acelera à medida que um organismo envelhece. Esse tipo de resposta logarítmica a um estímulo físico tem precedente direto na Lei de Weber-Fechner, segundo a qual a magnitude da sensação subjetiva varia com o logaritmo da intensidade do estímulo (FECHNER, 1966). Para modelar esse fenômeno através do cálculo diferencial, postulamos que a taxa de variação do tempo percebido (τ) em relação ao tempo real (t) é inversamente proporcional à idade cronológica total do indivíduo (Teoria de Janet; JANET, 1928).

De forma intuitiva: para uma criança de 5 anos, 1 ano representa 20% de sua existência acumulada; para um adulto de 50 anos, representa apenas 2% de sua biografia histórica. Sob a perspectiva da psicologia organizacional e social, essa assimetria matemática reflete diretamente o conceito de **profundidade temporal**, definido como "*as distâncias temporais integradas no passado e no futuro que os indivíduos e grupos rotineiramente consideram quando tomam decisões ou avaliam experiências*" (Bluedorn; Jaussi, 2007, como citado em Barbosa, 2018, p. 45). À medida que a ancoragem do passado se expande linearmente no adulto, a fração de tempo presente perde peso relativo frente à totalidade mnemônica acumulada, validando qualitativamente o decaimento modelado pela EDO.

2.1.1 Dedução do Modelo Diferencial

Assumindo que a variação infinitesimal do tempo subjetivo $d\tau$ dado um avanço cronológico dt é inversamente proporcional a t , estabelecemos a seguinte Equação Diferencial Ordinária (Equação 1):

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\alpha}{t} \quad (1)$$

Onde a taxa variação diferencial $\frac{d\tau}{dt}$ é dimensional, expressa na razão de unidades de tempo subjetivo por tempo cronológico ($\frac{\alpha}{t}$). Para garantir a estrita homogeneidade dimensional do sistema, o parâmetro α assume a dimensão fundamental de tempo subjetivo

Desse modo, α deixa de ser um mero coeficiente matemático e passa a atuar como um fator de conversão biofísico e de escala, quantificando a capacidade intrínseca do organismo de traduzir o avanço do tempo físico em unidades de percepção consciente (ou "instantes" cognitivos).

Para resolver a Equação (1) e encontrar a função do tempo percebido acumulado, isolamos as variáveis e integramos ambos os lados (Equação 2) em um intervalo que vai de um tempo inicial t_0 (o limiar da memória consciente, ex: $t_0 = 1$ ano) até a idade atual t :

$$\int_{\tau(t_0)}^{\tau(t)} d\tau = \int_{t_0}^t \frac{\alpha}{t} dt \quad (2)$$

$$\tau(t) - \tau(t_0) = \alpha[\ln(t) - \ln(t_0)] \quad (3)$$

A partir da Equação (3), definindo a condição de contorno onde no instante inicial da consciência o tempo percebido acumulado é nulo ($\tau(t_0) = 0$), obtemos a equação fundamental da percepção temporal logarítmica (Equação 4):

$$\tau(t) = \alpha \cdot \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (4)$$

2.1.2 Análise Estática e Consequências de Escala

Como a função logarítmica possui uma derivada segunda estritamente negativa para todo o domínio real positivo (Equação 5):

$$\frac{d^2\tau}{dt^2} = -\frac{\alpha}{t^2} < 0 \quad (5)$$

Os valores de **Tempo Subjetivo Acumulado (τ)** apresentados na Figura 1 são calculados utilizando a **solução analítica da Equação Diferencial Ordinária** proposta na Equação (4), no capítulo 2.1.1 deste artigo.

A fórmula exata aplicada a cada linha é a mesma Equação (4), repetida abaixo por conveniência:

$$\tau(t) = \alpha \cdot \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (4)$$

Para a construção dessa tabela padrão, foram adotados os valores normalizados das constantes biológicas:

- $t_0 = 1$ (Idade inicial de 1 ano, definida como o limiar da memória consciente para evitar a indeterminação matemática de dividir por zero ou calcular o logaritmo de zero).
- $\alpha = 1$ u.s. (Unidade de Tempo Subjetivo padrão adotada como fator de escala para a simulação numérica).

A escolha do valor numérico $\alpha = 1$ u.s. (unidade de tempo subjetivo) para a construção da Figura 1 não se baseia em uma limitação biológica estática, mas sim em um procedimento de **normalização e invariância de escala**. Como o parâmetro α varia de

indivíduo para indivíduo — dependendo de fatores genéticos, metabólicos e da eficiência sináptica de cada organismo —, a modelagem matemática adota $\alpha = 1$ como a **unidade padrão de calibração basal**.

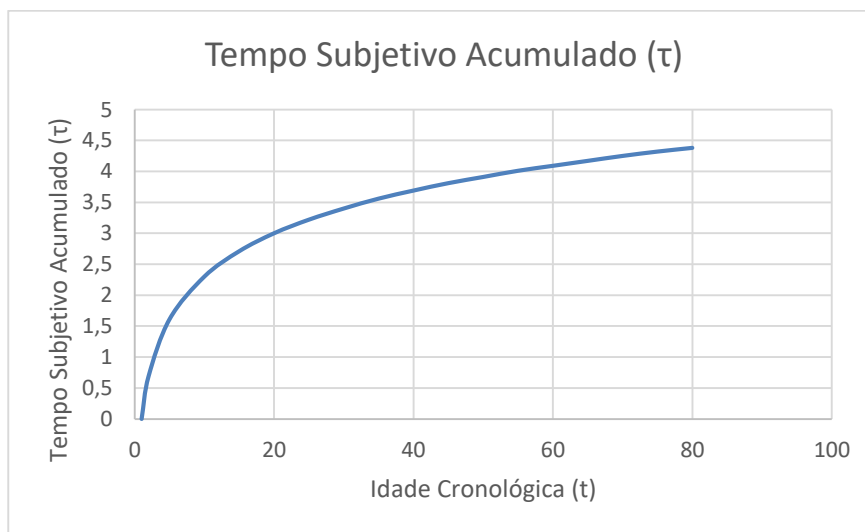
Esse método permite que a curva logarítmica descrita por $\tau(t) = \ln(t)$ sirva como um referencial idealizado. Matematicamente, qualquer alteração no valor biológico de α (seja por aceleração metabólica ou envelhecimento trófico) funcionará como um simples operador multiplicativo de dilatação ou contração vertical na curva do gráfico, mantendo a geometria e as propriedades assintóticas do modelo perfeitamente preservadas.

Como o denominador t_0 é igual a 1, a equação simplifica-se para o cálculo do **Logaritmo Natural (base e)** da própria idade (Equação 6):

$$\tau(t) = \ln(t) \quad (6)$$

Para fins de simulação e mapeamento numérico do modelo proposto, a **Figura 1** apresenta o comportamento do Tempo Subjetivo Acumulado (τ) frente ao avanço da Idade Cronológica (t), considerando as condições de contorno padronizadas.

Figura 1



Fonte: O Autor, 2026

A curva da percepção (Figura 1) acumula-se de forma cada vez mais lenta, gerando um achatamento assintótico. Isso mostra, no âmbito do modelo, que o "comprimento" psicológico de uma mesma unidade de tempo cronológico encolhe continuamente à medida que o denominador da idade biológica (t) aumenta.

2.2 Abordagem Física: Entropia Informacional e Dilatação Temporal

Para além do fator etário macroscópico, a percepção do tempo varia de forma transiente em escalas de curto prazo (horas ou minutos). Situações de alto estresse homeostático, de perigo ou de tédio alteram a nossa métrica cronológica. Podemos modelar essa dinâmica utilizando a **Entropia de Informação de Shannon** combinada com a termodinâmica de processos irreversíveis.

O cérebro é um sistema aberto que consome energia livre para reduzir sua entropia interna através do processamento de sinais do ambiente. Seja H a entropia de informação que mede a quantidade de novos dados processados e codificados na memória microscópica (Equação 7; SHANNON, 1948):

$$H = - \sum_i p_i \log_2 p_i \quad (7)$$

Propõe-se que o intervalo de tempo percebido ($\Delta\tau$) é diretamente proporcional à integral da quantidade de informação efetivamente integrada pelo sistema nervoso central por unidade de tempo físico. Definimos a densidade de processamento de informação como a derivada temporal da entropia de informação, isto é, $\dot{H} = \frac{dH}{dt}$. Portanto (Equação 8):

$$\Delta\tau = \gamma \cdot \int_{t_1}^{t_2} \dot{H}(t) dt \quad (8)$$

Onde γ é o fator de conversão biofísico do sistema. Desse formalismo, derivam-se dois regimes operacionais distintos:

- **Alta Taxa de Processamento ($\dot{H}$ elevado):** Ocorre em situações de novidade, perigo iminente (com consequente surto de adrenalina) ou aprendizado intenso. O cérebro opera em uma frequência de amostragem mais alta do ambiente. Como consequência,

o valor da integral aumenta. No momento da análise retrospectiva, o tempo parece ter se **dilatado**.

- **Baixa Taxa de Processamento ($\dot{H}$ reduzido):** Ocorre em rotinas estandardizadas, repetição monotônica ou quadros de depressão do sistema nervoso. Pouca informação nova é retida e estruturada. A integral resulta em um valor numericamente baixo; o período de tempo, quando verificado na memória, parece ter sofrido um **colapso**.

Consequentemente, a modelagem do tempo subjetivo (τ) não pode se desvincular das leis que regem a dissipação de energia e a assimetria dos sistemas complexos. Na física teórica contemporânea, a própria natureza do fluxo temporal tem sido descrita não como um elemento fundamental do tecido cósmico, mas sim como um fenômeno emergente de caráter estritamente termodinâmico e estatístico. Conforme aponta o físico Carlo Rovelli:

"A diferença entre passado e futuro, entre causa e efeito, entre memória e esperança, entre arrependimento e intenção... na gramática elementar das coisas, não existe. Só existe a entropia. É a entropia que distingue o passado do futuro. Ela é a única lei geral da física que conhece a assimetria do tempo. O que chamamos de 'fluxo' do tempo não é uma característica fundamental do tecido cósmico, mas sim o efeito macroscópico da nossa própria cegueira em relação aos detalhes microscópicos do mundo. O tempo nasce da nossa incapacidade de ver o universo em sua totalidade microscópica, emergindo como uma aproximação estatística, uma névoa termodinâmica induzida pela nossa perspectiva limitada" (ROVELLI, 2018, p. 98).

A provocação teórica de Rovelli (2018) estabelece um paralelo direto com o formalismo matemático proposto neste artigo. É importante ressaltar que essa aproximação é empregada aqui em sentido analógico e inspiracional, não como uma aplicação literal da hipótese do tempo térmico — que, em sua formulação original, refere-se ao fluxo modular de estados KMS em sistemas físicos, e não à dinâmica de sistemas biológicos. A analogia é produtiva como motivação conceitual para associar entropia e percepção temporal, mas não constitui, por si só, uma derivação formal a partir do arcabouço de Rovelli. Ao mapear a flecha do tempo como uma propriedade emergente da termodinâmica, abre-se espaço para correlacionar a entropia física com a entropia

informacional (Shannon) no cérebro humano. Se o "fluxo" percebido decorre de nossa incapacidade de processar o estado microscópico do universo de forma exata, o tempo subjetivo (τ) descrito na equação diferencial fundamental deste modelo comporta-se, essencialmente, como essa "névoa". A taxa de dissipação entrópica no processamento cortical de dados atua como o motor do relógio biológico. Onde há maior atividade dissipativa, a densidade de eventos percebidos expande-se, alterando drasticamente a métrica da nossa percepção em relação ao tempo mecânico cronometrado (t).

2.3 O Efeito Térmico-Metabólico: O Cérebro como Oscilador Harmônico Excitado

Podemos também analisar o "marcapasso" biológico sob a ótica da física de osciladores harmônicos excitados. Os processos bioquímicos que ditam o ritmo do relógio interno dependem diretamente da energia cinética das moléculas e da frequência de colisões efetivas, obedecendo à **Equação de Arrhenius** para a constante de velocidade (k) de reações químicas corporais (Equação 9; ARRHENIUS, 1889). A ideia de que um "relógio químico" corporal regula a percepção do tempo, acelerando com o aumento da temperatura, encontra precedente empírico direto em Hoagland (1933), que documentou variações na percepção de duração associadas a episódios febris. Formalmente:

$$k_{reação} = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (9)$$

Onde A é o fator de frequência, E_a é a energia de ativação, R é a constante universal dos gases e T é a temperatura em Kelvin.

Quando a temperatura interna de um organismo aumenta (como em um estado febril ou hipertermia induzida por esforço físico pesado), a taxa das reações químicas cerebrais (k) acelera exponencialmente. O oscilador biológico passa a operar em uma frequência angular intrínseca mais alta ($\omega_{interno} > \omega_{padrão}$).

Como o cérebro usa sua própria frequência interna como padrão de calibração para a contagem dos segundos do mundo externo, os relógios físicos externos parecerão atrasados em relação ao referencial acelerado da mente. Isso caracteriza um fenômeno análogo à dilatação temporal por variação de energia cinética e metabólica.

2.3.1 A Equação Mestre e Unificada da Percepção Temporal

Após a determinação isolada do comportamento assintótico do envelhecimento (escala macro) e dos fatores biofísicos de processamento de estímulos (escala micro), torna-se possível consolidar um formalismo matemático único. Postula-se que a dinâmica global da percepção temporal ($\frac{d\tau}{dt}$) é governada pelo produto harmônico entre a base cronológica inversa, a densidade de informação disponível e a eficiência cinética do metabolismo (Equação 10):

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\alpha(H,T)}{t} \quad (10)$$

Aqui, a constante de proporcionalidade original (α) deixa de ser um escalar estático e assume a forma de uma função de estado dependente da Entropia de Informação de Shannon (H) e da Temperatura metabólica (T). Incorporando a taxa de variação da entropia no tempo $\frac{dH}{dt}$ e o fator de frequência ativado pela equação cinética de Arrhenius, a função $\alpha(H, T)$ é formalizada como (Equação 11):

$$\alpha(H, T) = \phi \cdot \left(\frac{dH}{dt}\right) \cdot Ae^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (11)$$

Para assegurar a homogeneidade dimensional desse funcional biológico sob a abordagem bidimensional, a constante de acoplamento ϕ atua como o operador fundamental de conversão entre as grandezas físicas, informacionais e cognitivas. Sabendo que a função de estado possui dimensão de tempo subjetivo $[\alpha] = \text{u.s.}$, a taxa de processamento de Shannon possui dimensão de fluxo de dados ($\left[\frac{dH}{dt}\right] = \text{bits} \cdot \text{s}^{-1}$) e o marcapasso metabólico de Arrhenius possui dimensão de frequência (s^{-1}), a análise dimensional impõe que a unidade de medida estrita de ϕ no Sistema Internacional seja dada por (Equação 12):

$$[\phi] = \text{u.s.} \cdot \text{s}^2/\text{bits} \quad (12)$$

Esse parâmetro quantifica a eficiência do tecido cortical em transmutar a aceleração do processamento de dados sob uma determinada frequência metabólica em expansão da consciência temporal. Substituindo a função acoplada na equação diferencial original, deduz-se a **Equação Mestre da Percepção Temporal** (Equação 13):

$$d\tau = \left[\phi \cdot \left(\frac{dH}{dt} \right) \cdot Ae^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \right] \frac{dt}{t} \quad (13)$$

Para encontrar o tempo subjetivo acumulado (τ) ao longo do ciclo de vida, conforme a Equação (13), realizamos a integração analítica de ambos os membros a partir de um limiar inicial de consciência perceptiva estável (t_0) até o instante atual (t) (Equação 14):

$$\tau(t) = \int_{t_0}^t \left[\phi \cdot \left(\frac{dH}{dt'} \right) \cdot Ae^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \right] \frac{1}{t'} dt' \quad (14)$$

Em um regime onde a temperatura interna (T) e o fluxo médio de processamento de informação ambiental ($\frac{dH}{dt}$) estabilizam-se em valores médios constantes a longo prazo (T e $\frac{dH}{dt}$), os termos constantes podem ser extraídos do integrando. Sob a condição de contorno inicial $\tau(t) = 0$, a solução geral resulta em (Equação 15):

$$\tau(t) = \left[\phi \cdot \left(\frac{dH}{dt} \right) \cdot Ae^{-\frac{E_a}{R \cdot \langle T \rangle}} \right] \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \quad (15)$$

A Equação (15) traduz matematicamente a sensibilidade do "relógio da mente": o denominador t' dita o inevitável achatamento temporal com a idade, enquanto desvios localizados na derivada do funcional de Shannon ($\frac{dH}{dt}$) operam as dilatações ou contrações momentâneas da nossa experiência vivida.

2.3.2 Análise de Limites Assintóticos e Fronteiras de Controle Termodinâmico

Para validar a consistência interna e a estabilidade física da Equação Mestre da Percepção Temporal, torna-se indispensável submeter o modelo analítico proposto aos testes de estresse em regimes de fronteiras térmicas extremas. Avaliar os limites

assintóticos quando a temperatura corporal absoluta (T) tende a zero e ao infinito permite mapear o comportamento do referencial subjetivo frente às leis da termodinâmica e da cinética cortical.

2.3.2.1 Comportamento no Limite do Zero Absoluto ($T \rightarrow 0$ K)

Considerando o cenário hipotético em que a temperatura biológica do sistema aproxima-se de forma assintótica do zero absoluto (0 K), aplica-se o limite sobre o operador cinético de Arrhenius (Equação 16):

$$\lim_{T \rightarrow 0^+} \left(-\frac{E_a}{R \cdot T} \right) = -\infty \quad (16)$$

Transpondo o resultado matemático para o expoente da base e , a eficiência de velocidade das reações químicas do sistema reduz-se a (Equação 17):

$$\lim_{T \rightarrow 0^+} e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} = e^{-\infty} = 0 \quad (17)$$

Ao substituir esse teto nulo na formulação diferencial unificada, obtém-se o comportamento global do fluxo temporal subjetivo (Equação 18):

$$d\tau = \left[\phi \cdot \left(\frac{dH}{dt} \right) \cdot A \cdot 0 \right] \frac{dt}{t} \Rightarrow d\tau = 0 \Rightarrow \tau(t) = C \quad (18)$$

Onde C representa uma constante de integração. Esse limite é consistente com um dos pilares conceituais do modelo — não o comprova empiricamente, mas mostra que o formalismo se comporta de maneira logicamente coerente com a hipótese de que a percepção do tempo é uma propriedade emergente da atividade termodinâmica biológica. No zero absoluto, onde a energia cinética das partículas e a taxa de colisões moleculares efetivas cessam por completo, o "marcapasso interno" é interrompido. Sem variação trófica e sem dissipação entrópica, a capacidade do cérebro de fatiar o avanço do tempo cronológico (dt) em unidades de consciência é anulada. O tempo subjetivo congela completamente ($d\tau = 0$), gerando o colapso absoluto da percepção temporal.

2.3.2.2 Comportamento no Limite da Temperatura Infinita ($T \rightarrow \infty$ K)

Inversamente, ao avaliar um estado de excitação térmica e metabólica extrema, onde a temperatura atinge patamares infinitamente elevados, calcula-se o limite assintótico exponencial correspondente (Equação 19):

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \left(-\frac{E_a}{R \cdot T} \right) = 0 \Rightarrow \lim_{T \rightarrow \infty} e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} = e^0 = 1 \quad (19)$$

Substituindo este fator de saturação na Equação Mestre, o funcional de estado reduz-se a (Equação 20):

$$d\tau = \left[\phi \cdot \left(\frac{dH}{dt} \right) \cdot A \right] \frac{dt}{t} \quad (20)$$

A integração subsequente sob este regime especial de contorno resulta na seguinte solução analítica (Equação 21):

$$\tau(t) = \left[\phi \cdot \left(\frac{dH}{dt} \right) \cdot A \right] \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) \quad (21)$$

Este resultado é importante para a consistência interna do modelo: ele indica que, dentro do formalismo proposto, o tempo psicológico não diverge para o infinito de forma descontrolada diante de um pico térmico ou de uma descarga metabólica exacerbada.

À medida que a temperatura cresce, a barreira imposta pela energia de ativação (E_a) torna-se negligenciável perante a energia térmica total disponível no tecido cortical, fazendo com que o termo de Arrhenius atinja o seu teto assintótico idealizado ($= 1$). Sob essas condições extremas, a taxa de amostragem informacional do cérebro alcança a sua velocidade máxima teórica permitida pelo arranjo físico. O tempo subjetivo experimenta um processo de dilatação severa em relação ao tempo mecânico, contudo, o sistema permanece estável e contido, sendo governado exclusivamente pela taxa de processamento de informação de Shannon ($\frac{dH}{dt}$), pela frequência basal de colisões moleculares (A) e pelo amortecimento histórico logarítmico da idade cronológica ($\ln(t)$).

3 RESULTADOS e DISCUSSÃO

A derivação analítica conduzida nas seções anteriores produziu três resultados centrais. Em escala macroscópica, a solução da Equação Diferencial Ordinária proposta resultou na equação fundamental da percepção temporal logarítmica (Equação 4), segundo a qual o tempo subjetivo acumulado cresce com o logaritmo da idade cronológica. Em escala microfísica, a combinação da entropia de informação de Shannon com a cinética de Arrhenius resultou na Equação Mestre da Percepção Temporal (Equação 13, resolvida na Equação 15), que unifica os efeitos do envelhecimento, do processamento informacional e da temperatura metabólica em um único formalismo. Por fim, a análise de limites assintóticos (Equações 16 a 21) mostrou que esse formalismo se comporta de maneira internamente consistente nos extremos térmicos teóricos ($T \rightarrow 0$ K e $T \rightarrow \infty$), sem divergências matemáticas — resultado que sustenta a estabilidade do modelo proposto, discutido a seguir junto de suas limitações.

3.1 Limitações do Modelo, Definições Operacionais e Validação Empírica Proposta

É importante situar o presente modelo dentro do panorama já consolidado da psicofísica temporal (WEARDEN, 2016). A literatura conta com arcabouços quantitativos amplamente testados empiricamente, como a Teoria da Expectativa Escalar (Scalar Expectancy Theory), que descreve a variabilidade multiplicativa dos erros de estimação temporal (GIBBON, 1977), e os modelos de marcapasso-acumulador revisados por Buhusi e Meck (2005), que associam a velocidade do "relógio interno" a mecanismos dopaminérgicos e a circuitos tálamo-córtico-estriatais. Revisões mais recentes, como a de Wittmann (2013), propõem que a ativação neural cumulativa ("climbing neural activation"), sobretudo no córtex insular, constitui um correlato neurofisiológico plausível da duração percebida. A Equação Mestre da Percepção Temporal (Equação 15) aqui proposta não substitui esses modelos: oferece um formalismo complementar em escala macroscópica (envelhecimento) e mesoscópica (entropia informacional e cinética metabólica), sem ainda especificar o substrato neural subjacente — lacuna que os modelos citados endereçam de forma mais direta e que trabalhos futuros devem buscar integrar.

Essa aproximação com a literatura, no entanto, permanece incompleta sem uma comparação direta de previsões, o que se procura explicitar a seguir em três pontes

específicas. Primeiro, a contribuição central da SET não é apenas postular um relógio interno, mas prever que o erro de estimação de duração cresce proporcionalmente à duração estimada — a variabilidade escalar associada à Lei de Weber (GIBBON, 1977). O presente modelo, em sua forma atual, é determinístico e descreve apenas o valor esperado de τ , sem derivar uma previsão sobre a variância dos erros de estimação; investigar se flutuações estocásticas em dH/dt reproduzem naturalmente essa propriedade escalar é uma extensão necessária, ainda não realizada aqui. Segundo, Buhusi e Meck (2005) associam a velocidade do relógio interno a manipulações farmacológicas dopaminérgicas, nas quais agonistas aceleram e antagonistas desaceleram a percepção de duração — uma associação diretamente comparável ao presente modelo: se dH/dt ou $\alpha(H,T)$ forem, de fato, proxies da atividade dopaminérgica, o modelo prevê que a magnitude da distorção temporal sob manipulação farmacológica deveria seguir a mesma direção e, idealmente, uma forma funcional comparável à já documentada nessa literatura. Terceiro, o mecanismo de ativação neural cumulativa ("climbing neural activation") descrito por Wittmann (2013), no qual um sinal se acumula ao longo do intervalo e sua magnitude no córtex insular se correlaciona com a duração percebida, é conceitualmente próximo da integral de $\dot{H}(t)$ postulada na Equação (8); propõe-se que esse sinal de ativação cumulativa insular seja, fisiologicamente, o correlato observável dessa integral — hipótese diretamente testável por fMRI ou EEG durante tarefas de estimação de duração. Por fim, cabe destacar o que distingue o presente modelo dos três anteriores: nenhum deles incorpora explicitamente a temperatura corporal ou o metabolismo como variável de estado. A introdução da cinética de Arrhenius (Equação 9) como determinante da velocidade do relógio subjetivo constitui, portanto, a contribuição potencialmente original deste artigo em relação à literatura estabelecida — uma hipótese que, como as demais, permanece a ser testada.

Para que os parâmetros α , ϕ e γ deixem de ser fatores de ajuste puramente formais e passem a designar grandezas mensuráveis, propõe-se a seguinte operacionalização. O parâmetro α (Equação 4) pode ser estimado a partir de curvas de autorrelato sobre a percepção da passagem do tempo em diferentes idades, tomando-se α como o coeficiente angular da regressão entre o tempo subjetivo relatado e $\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)$. O

parâmetro ϕ (Equação 11) deveria ser calibrado comparando-se a magnitude da dilatação temporal relatada sob variação controlada de temperatura corporal com o valor previsto pela Equação de Arrhenius, isolando-se experimentalmente a contribuição de $\left(\frac{dH}{dt}\right)$. Já γ (Equação 8) poderia ser obtido correlacionando-se medidas de entropia de sinais neurofisiológicos com estimativas retrospectivas de duração em tarefas de diferentes cargas informacionais. Sem esse procedimento de calibração, os três parâmetros permanecem graus de liberdade formais, e não constantes biológicas com significado físico independente.

De modo semelhante, a entropia de informação H (Equação 7) carece, neste artigo, de uma definição operacional explícita quanto ao que constituem os estados discretos i . Propõe-se que os p_i sejam interpretados como as probabilidades de ocorrência de estados discretizados de um sinal neurofisiológico mensurável — por exemplo, a distribuição de amplitudes de potenciais evocados em registros de EEG, ou a distribuição de intervalos entre disparos neuronais (inter-spike intervals). Sob essa leitura, dH/dt corresponderia à taxa de variação da entropia espectral do sinal em uma janela deslizante, grandeza já empregada em estudos de complexidade e dinâmica não linear de sinais de EEG (STAM, 2005). Essa operacionalização permanece, contudo, uma proposta a ser testada, não uma definição adotada com dados neste trabalho.

Quanto aos limites assintóticos da seção 2.3.2, cabe uma ressalva importante: os regimes $T \rightarrow 0$ K e $T \rightarrow \infty$ são idealizações matemáticas empregadas para testar a consistência interna e a estabilidade do modelo, não descrições de estados fisiologicamente alcançáveis. Um organismo humano viável opera em uma janela térmica estreita, aproximadamente entre 308 K e 314 K (35°C a 41°C), da hipotermia moderada à hipertermia febril extrema. Dentro dessa faixa realista, o termo de Arrhenius varia de modo bem mais discreto do que nos limites teóricos explorados — de modo que a conclusão qualitativa (aceleração do relógio subjetivo com o aumento da temperatura) permanece plausível, mas a magnitude do efeito dentro da faixa fisiológica ainda precisa ser estimada a partir de dados reais de dilatação temporal em estados febris, e não extrapolada a partir dos limites assintóticos apresentados.

Por fim, é necessário reconhecer explicitamente que o modelo aqui apresentado é, no

estágio atual, uma proposta teórica ainda não submetida a validação empírica direta. Um programa de validação poderia incluir: (i) o ajuste da Equação (4) — com α estimado como parâmetro livre, e não fixado em 1 como na Equação (6) normalizada — a dados longitudinais de autorrelato sobre a percepção da passagem do tempo em diferentes faixas etárias; (ii) testes controlados de estimação de duração sob variação induzida da temperatura corporal, comparando as previsões da Equação (9) com os desvios de estimação temporal observados; e (iii) medidas de entropia de sinais neurofisiológicos durante tarefas de diferentes cargas informacionais, testando a proporcionalidade postulada na Equação (8). Até que esses testes sejam realizados, as conclusões deste artigo devem ser lidas como hipóteses matematicamente consistentes e testáveis, não como resultados empiricamente confirmados.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho procurou dar uma resposta matemática a uma das maiores curiosidades da experiência humana: a forma como o tempo parece moldar-se à nossa volta. Ao confrontar o tempo rígido e mecânico dos relógios (t) com a fluidez do tempo subjetivo (τ), a **Equação Mestre da Percepção Temporal** aqui deduzida (Equação 15) conseguiu algo fundamental: unir a nossa jornada de longo prazo (o envelhecimento) com os pequenos instantes do cotidiano.

À escala macroscópica, o modelo traduz matematicamente aquela sensação tão comum de que os anos parecem passar a voar à medida que envelhecemos, um fenómeno associado ao peso do tempo já vivido ($1/t'$). Já à escala microfísica, a introdução da função dinâmica $\alpha(H, T)$ sugere (Equação 11) que o nosso relógio interno não bate sempre ao mesmo ritmo. Ele é, segundo o modelo, profundamente afetado pelas oscilações da Entropia de Shannon ($\frac{dH}{dt}$) e pela energia do nosso próprio metabolismo (Arrhenius). A fusão destas fórmulas mostra-nos que a mente humana funciona como um sistema vivo e aberto: quando somos expostos a grandes novidades ou a picos de adrenalina, o cérebro consome mais energia e processa mais informação, operando uma verdadeira dilatação na nossa linha temporal. Cinco minutos podem, de fato, parecer uma eternidade.

Mais do que uma discussão teórica isolada, os resultados deste modelo abrem portas para possíveis aplicações práticas no mundo tecnológico e médico:

1. **Interfaces Cérebro-Máquina (ICM) e Realidade Virtual:** Ao compreender a quantidade de informação necessária para expandir ou contrair o tempo na nossa mente, os engenheiros podem desenhar ambientes digitais que evitam a fadiga mental e ajudam o usuário a entrar mais facilmente num estado de foco e imersão (*flow*), na linha dos sistemas de comunicação e controle mediados por interface cérebro-computador já demonstrados por Wolpaw et al. (2002).
2. **Diagnóstico Clínico de Doenças Neurodegenerativas:** Como este relógio mental depende diretamente da estabilidade do nosso metabolismo, desvios acentuados nas curvas esperadas podem vir a servir como sinais de alerta precoces. Isto abre caminho para novos testes não invasivos no acompanhamento de patologias como o Mal de Alzheimer ou Parkinson, cuja plausibilidade é reforçada por evidências de que anormalidades na percepção temporal já funcionam como marcador precoce em pacientes recém-diagnosticados com Parkinson (BERNARDINIS et al., 2019).
3. **Inteligência Artificial Eficiente:** Ao imitar a forma como o cérebro humano compacta e gere os dados ao longo do tempo, os novos algoritmos de IA podem aprender a distribuir a sua capacidade de processamento de forma mais inteligente. O sistema focaria a sua atenção e energia (alta amostragem) apenas em momentos de grande incerteza ou perigo iminente, tal como sugere a visão do tempo térmico de Carlo Rovelli — em linha com o papel já central que mecanismos de atenção computacional exercem em arquiteturas modernas de IA (VASWANI et al., 2017).

No fundo, o "Relógio da Mente" talvez não seja uma ilusão abstrata ou uma falha de percepção, mas — segundo a hipótese aqui formalizada e ainda por validar empiricamente — a assinatura biológica e entrópica de um sistema vivo, medindo a velocidade com que absorvemos, processamos e sentimos o universo ao nosso redor.

5 REFERÊNCIAS

- ARRHENIUS, S. **Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren.** Zeitschrift für Physikalische Chemie, v. 4, p. 226-248, 1889.
- BARBOSA, Jane Kelly Dantas. **Temos todo tempo do mundo?** Um Estudo sobre Percepções

- Temporais e Prazer e Sofrimento com Jovens Trabalhadores. 2018. 146 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2018.
- BERNARDINIS, M.; ATASHZAR, S. F.; JOG, M. S.; PATEL, R. V. **Differential temporal perception abilities in Parkinson's disease patients based on timing magnitude**. Scientific Reports, v. 9, art. 19638, 2019.
- BUHUSI, C. V.; MECK, W. H. **What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing**. Nature Reviews Neuroscience, v. 6, n. 10, p. 755-765, 2005.
- EAGLEMAN, D. M.; TSE, P. U.; BUONOMANO, D.; JANSSEN, P.; NOBRE, A. C.; HOLCOMBE, A. O. **Time and the brain: how subjective time relates to neural time**. Journal of Neuroscience, v. 25, n. 45, p. 10369-10371, 2005.
- FECHNER, G. T. **Elements of psychophysics: volume 1**. Tradução de H. E. Adler; organização de D. H. Howes e E. G. Boring. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1966.
- GIBBON, J. **Scalar expectancy theory and Weber's law in animal timing**. Psychological Review, v. 84, n. 3, p. 279-325, 1977.
- HOAGLAND, H. **The physiological control of judgments of duration: evidence for a chemical clock**. Journal of General Psychology, v. 9, p. 267-287, 1933.
- JAMES, William. *Principios de Psicología*. Cidade do México: Fondo de Cultura Económica, 1989
- JAMES, William. *A percepção do tempo*. Tradução de Renato Duarte Fonseca. Modernos & Contemporâneos - International Journal of Philosophy, v. 7, n. 16, p. 251-282, 2023.
- JANET, P. *L'évolution de la mémoire et de la notion du temps*. Paris: A. Chahine, 1928.
- ROVELLI, C. *A Ordem do Tempo*. Rio de Janeiro: Companhia das Letras, 2018.
- SHANNON, C. E. *A Mathematical Theory of Communication*. Bell System Technical Journal, v. 27, p. 379-423, 623-656, 1948.
- STAM, C. J. **Nonlinear dynamical analysis of EEG and MEG: review of an emerging field**. Clinical Neurophysiology, v. 116, n. 10, p. 2266-2301, 2005.
- VASWANI, A.; SHAZEER, N.; PARMAR, N.; USZKOREIT, J.; JONES, L.; GOMEZ, A. N.; KAISER, L.; POLOSUKHIN, I. **Attention is all you need**. In: ADVANCES IN NEURAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS (NeurIPS), 31., 2017, Long Beach. Anais [...]. p. 5998-6008.
- WEARDEN, J. H. *Time and the Mind: How Mental Clocks and Calendars Really Work*. Londres: Oxford University Press, 2016.
- WITTMANN, M. **The inner sense of time: how the brain creates a representation of duration**. Nature Reviews Neuroscience, v. 14, n. 3, p. 217-223, 2013.
- WOLPAW, J. R.; BIRBAUMER, N.; MCFARLAND, D. J.; PFURTSCHELLER, G.; VAUGHAN, T. M. **Brain-computer interfaces for communication and control**. Clinical Neurophysiology, v. 113, n. 6, p. 767-791, 2002.