

A PRIMAZIA DAS RELAÇÕES: ESTRUTURA E FORMALIZAÇÃO DO CAMPO DE DISPONIBILIDADE RELACIONAL (CDR)

THE PRIMACY OF RELATIONSHIPS: STRUCTURE AND FORMALIZATION OF THE RELATIONAL AVAILABILITY FIELD (CDR)

LA PRIMACÍA DE LAS RELACIONES: ESTRUCTURA Y FORMALIZACIÓN DEL CAMPO DE DISPONIBILIDAD RELACIONAL (CDR)

Jayme Marrone Júnior¹

DOI: 10.54899/dcs.v22i85.4042

Recibido: 17/11/2025 | Aceptado: 10/12/2025 | Publicación en línea: 15/12/2025.

RESUMO

A Hipótese da Disponibilidade Relacional (HDR) propõe que as relações precedem ontologicamente a existência da matéria e que a realidade física emerge de processos relacionais capazes de atingir estados críticos de atualização. Este artigo desenvolve a formulação matemática inicial do Campo de Disponibilidade Relacional (CDR), concebido como um campo ontológico fundamental, escalar e atemporal, dotado de densidade relacional variável, memória e hábito. A partir de um conjunto de axiomas, da construção da lagrangiana e da derivação da equação mestra do campo, mostra-se como propriedades físicas primárias, como massa, carga e spin, podem ser compreendidas como efeitos emergentes da superação de um limiar relacional crítico. Em um segundo nível, argumenta-se que os campos físicos específicos (gravitacional, eletromagnético etc.) podem ser interpretados como teorias efetivas cujos parâmetros são funções do estado local do CDR. A análise de um caso-modelo de atualização evidencia que a matéria não é substância, mas um padrão estável de recorrências disposicionais inscritas no campo. Compara-se o CDR às teorias de campo padrão, evidenciando convergências formais e rupturas ontológicas, incluindo a ausência de tempo fundamental, a natureza não física do campo e o papel da história relacional na emergência do real. Conclui-se que o CDR constitui um arcabouço ontológico-matemático capaz de explicar a emergência da matéria, do tempo, das propriedades físicas e da estabilidade dos sistemas, inaugurando uma perspectiva relacional pós-substancialista para a física e para a filosofia da natureza.

Palavras-chave: Ontologia Relacional. Teoria Quântica de Campos. Emergência da Matéria. Hipótese da Disponibilidade Relacional.

ABSTRACT

The Relational Availability Hypothesis (RAH) proposes that relations ontologically precede the existence of matter and that physical reality emerges from relational processes capable of reaching critical states of actualization. This article develops the initial mathematical formulation of the Relational Availability Field (RAF), conceived as a fundamental, scalar, and timeless

¹ Doutor em Ensino de Ciências e Educação Matemática, Universidade do Estado de São Paulo (UNESP), Londrina, Paraná, Brasil. E-mail: jayme.marrone@ifpr.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5773-0598>

ontological field, endowed with variable relational density, memory, and habit. From a set of axioms, the construction of the Lagrangian, and the derivation of the field's master equation, it shows how primary physical properties, such as mass, charge, and spin, can be understood as emergent effects of overcoming a critical relational threshold. At a second level, it argues that specific physical fields (gravitational, electromagnetic, etc.) can be interpreted as effective theories whose parameters are functions of the local state of the RAF. The analysis of a model case of actualization shows that matter is not substance, but a stable pattern of dispositional recurrences inscribed in the field. This paper compares the Relational Availability Hypothesis (RAH) to standard field theories, highlighting formal convergences and ontological ruptures, including the absence of fundamental time, the non-physical nature of the field, and the role of relational history in the emergence of reality. It concludes that the RAH constitutes an ontological-mathematical framework capable of explaining the emergence of matter, time, physical properties, and the stability of systems, inaugurating a post-substantialist relational perspective for physics and the philosophy of nature.

Keywords: Relational Ontology. Quantum Field Theory. Emergence of Matter. Relational Availability Hypothesis.

RESUMEN

La Hipótesis de Disponibilidad Relacional (HAR) propone que las relaciones ontológicamente preceden a la existencia de la materia y que la realidad física emerge de procesos relacionales capaces de alcanzar estados críticos de actualización. Este artículo desarrolla la formulación matemática inicial del Campo de Disponibilidad Relacional (CAR), concebido como un campo ontológico fundamental, escalar y atemporal, dotado de densidad relacional, memoria y hábito variables. A partir de un conjunto de axiomas, la construcción del lagrangiano y la derivación de la ecuación maestra del campo, se muestra cómo las propiedades físicas primarias, como la masa, la carga y el espín, pueden entenderse como efectos emergentes de la superación de un umbral relacional crítico. En un segundo nivel, se argumenta que campos físicos específicos (gravitacional, electromagnético, etc.) pueden interpretarse como teorías efectivas cuyos parámetros son funciones del estado local del CAR. El análisis de un caso modelo de actualización muestra que la materia no es sustancia, sino un patrón estable de recurrencias disposicionales inscritas en el campo. Este artículo compara la Hipótesis de Disponibilidad Relacional (HAR) con las teorías de campos estándar, destacando las convergencias formales y las rupturas ontológicas, incluyendo la ausencia del tiempo fundamental, la naturaleza no física del campo y el papel de la historia relacional en el surgimiento de la realidad. Concluye que la HAR constituye un marco ontológico-matemático capaz de explicar el surgimiento de la materia, el tiempo, las propiedades físicas y la estabilidad de los sistemas, inaugurando una perspectiva relacional postsubstancialista para la física y la filosofía de la naturaleza.

Palabras clave: Ontología Relacional. Teoría cuántica de Campos. Emergencia de la Materia. Hipótesis de Disponibilidad Relacional.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

A compreensão contemporânea da realidade física encontra-se em um momento de profunda revisão conceitual. A crise do substancialismo clássico, segundo o qual a matéria seria composta de entidades dotadas de propriedades intrínsecas que posteriormente se relacionariam entre si, revelou limites explicativos que se acentuam à medida que avançam a mecânica quântica, a cosmologia e as ontologias relacionais. Diversas teorias científicas e filosóficas sugerem que a noção tradicional de “coisa” não é suficiente para explicar a emergência de propriedades físicas, a formação de sistemas complexos ou a própria experiência temporal. Nesse cenário, ganha relevância a hipótese de que **as relações não são derivadas da matéria, mas sua condição de possibilidade**. É nesse horizonte que se insere a **Hipótese da Disponibilidade Relacional (HDR)** e sua formalização matemática por meio do **Campo de Disponibilidade Relacional (CDR)**.

A HDR parte de uma inversão ontológica fundamental: as relações não decorrem da existência da matéria, mas **a matéria emerge das relações**, como eventos de atualização dentro de um tecido relacional mais básico. Assim, aquilo que tradicionalmente chamamos “existência” não corresponde a uma permanência substancial, mas a uma **ruptura momentânea** em um campo subjacente que contém potencialidades relacionais distribuídas de maneira não uniforme. O CDR é concebido, portanto, como um campo escalar, contínuo, dotado de **densidade relacional variável** e independente do tempo. O tempo, por sua vez, não é pressuposto como dimensão fundamental, mas entendido como **efeito emergente das sucessivas atualizações** que ocorrem nesse campo, micro eventos discretos que, ao acumularem-se, produzem a sensação fenomenológica de fluxo temporal. Ideia que se aproxima do que Friedrich Nietzsche propõe quando rejeita uma existência estática, imutável ou transcendente e sugere a realidade como mudança e transformação constantes (o “devir” eterno).

Uma das premissas centrais desse modelo é que, em cada ponto do CDR, existe um **potencial relacional** cuja intensidade varia conforme a história de interações ocorridas naquele local. Essas interações deixam traços sob a forma de **memória relacional** e padrões de recorrência, que modulam a densidade local e condicionam a probabilidade de ocorrência de novas atualizações. Em regime subcrítico, o campo permanece em estado de disponibilidade, sem manifestação de propriedades físicas. Contudo, quando a densidade relacional ultrapassa um **limiar crítico** R_0 , ocorre a atualização: um evento no qual propriedades físicas, como por

exemplo massa ou carga elétrica, passam a manifestar-se em relação entre si ou para um observador, ou ambos. É essa dinâmica limiar que explica por que certas regiões do campo permanecem inobserváveis, enquanto outras se estabilizam como partículas, sistemas ou estruturas persistentes.

A formulação do CDR permite ainda reinterpretar a noção de inerência da matéria. A aparente permanência dos objetos não é consequência de uma substância autossuficiente, mas resultado da **recorrência disposicional** de atualizações sucessivas em uma mesma região do campo. Em outras palavras, aquilo que chamamos “objeto” é um padrão de estabilização relacional, cuja aparência de continuidade deriva da repetição suficientemente densa de eventos de atualização. Essa perspectiva se aproxima de certas teorias contemporâneas que enfatizam a primazia das relações, como interpretações relacionais da mecânica quântica, mas avança ao introduzir um mecanismo formal explícito: o campo de disponibilidade relacional e sua dinâmica de densidade, memória e limiar crítico.

O presente trabalho tem como objetivo **apresentar a formalização matemática** do CDR, definindo seus axiomas, seus operadores diferenciais, o potencial relacional e a equação fundamental que rege sua dinâmica. Além disso, busca-se demonstrar como essa estrutura permite modelar a emergência de propriedades físicas a partir da atualização do campo, por meio de um estudo de caso: a simulação de uma atualização correspondente ao surgimento de um objeto de massa m . Com isso, pretende-se oferecer um arcabouço teórico robusto e matematicamente bem definido que permita, em trabalhos futuros, explorar aplicações do CDR na física fundamental, na ontologia, na teoria da complexidade e até na análise de sistemas socio-relacionais.

A Ontologia da Hipótese da Disponibilidade Relacional (HDR) e o Campo de Disponibilidade Relacional (CDR)

A Hipótese da Disponibilidade Relacional (HDR) parte de uma ruptura ontológica decisiva com o paradigma substancialista que dominou a física clássica e boa parte da filosofia ocidental. De acordo com esse paradigma, o mundo seria composto por entidades portadoras de propriedades intrínsecas, que existem independentemente de suas relações. As relações, nesse modelo, seriam externas, secundárias e acidentais — ocorrendo entre coisas que já estão lá. A HDR inverte essa orientação: **a relação não é posterior à existência; ela é anterior, constitutiva**

e ontologicamente primária. A existência² material, tal como aparece aos sistemas capazes de observação, é resultado de atualizações dentro de um campo relacional mais fundamental. Esse campo, que denominamos Campo de Disponibilidade Relacional (CDR), não é composto por objetos, mas por **potencialidades de relação** distribuídas de maneira contínua.

Relações como Fundamento Ontológico

A ontologia da HDR sustenta que o ser não é uma substância, mas uma **atualização de possibilidades relacionais**. Essa proposição implica que o mundo não é feito de partículas que se relacionam, mas de relações que podem, em certas condições, **estabilizar-se como partículas, sistemas ou eventos físicos**. Trata-se de estabilizações transitórias, produzidas quando determinadas regiões do campo atingem um limiar crítico de densidade relacional. Assim, a matéria não é um “dado”, mas o resultado de um processo de emergência dependente de relações prévias. A existência, nessa perspectiva, é sempre evento, nunca coisa.

Matéria como Atualização do Campo

No contexto da HDR, definimos **atualização** como uma ruptura local no tecido de disponibilidade relacional, por meio da qual propriedades físicas passam a manifestar-se em um ponto do campo. Essa ruptura não é espontânea nem arbitrária: ela ocorre quando a **densidade relacional local** excede um valor crítico R_0 . A matéria é, portanto, um efeito da dinâmica do campo: uma região que se torna atualizada apresenta massa, carga elétrica e demais propriedades porque atingiu condições relacionais suficientes para que essas propriedades emergissem. A inerência da matéria, a ideia de que uma partícula possui propriedades por si mesma, torna-se, nesse quadro, uma percepção derivada da **recorrência disposicional**, definidas como atualizações sucessivas semelhantes que criam a percepção de estabilidade.

² Para Charles S. Peirce, *existência* refere-se ao modo de ser que implica reação, factualidade e eficácia atual — o domínio da segundidade, no qual algo “faz diferença” aqui e agora. Já *realidade* designa aquilo que é independente do pensamento individual, associado à terceiridade, às leis, hábitos e generalidades que orientam o comportamento dos fenômenos. Assim, algo pode ser *real* (por exemplo, uma lei natural) sem necessariamente *existir* como evento atual. Essa distinção é central para o enquadramento da HDR, na medida em que a “atualização” corresponde à existência, enquanto o “campo de disponibilidade relacional” corresponde ao domínio das regularidades reais que tornam possíveis tais atualizações.

O CDR como Campo Escalar Independente do Tempo

O Campo de Disponibilidade Relacional é concebido como um **campo escalar contínuo**, $\phi(\mathbf{x})$, definido em todos os pontos do espaço. Esse campo é **atemporal**: sua ontologia não pressupõe a existência de uma linha temporal prévia, nem de uma coordenada temporal fundamental. A marcação temporal, tal como percebida em sistemas físicos clássicos e modernos, emerge apenas após a ocorrência de atualizações, as quais produzem **microtempos**, unidades mínimas de ordenação que, acumuladas, criam a impressão de fluxo temporal. Desse modo, o tempo não é uma dimensão do campo, mas um **efeito emergente das relações atualizadas**.

Densidade Relacional: Variação e Heterogeneidade

Cada ponto do CDR possui uma **densidade relacional** $\rho(\mathbf{x})$, que representa o grau de disponibilidade para atualização. Essa densidade é variável no espaço e depende do histórico de interações ocorridas naquela região do campo. Não se trata de um campo uniforme, ao contrário, a heterogeneidade de densidades permite explicar tanto as regiões altamente estáveis (onde a matéria se manifesta de forma recorrente) quanto regiões onde não há atualizações observáveis. A densidade relacional é o fator decisivo para determinar a probabilidade de emergência de propriedades físicas.

Memória Relacional e Hábito

A HDR introduz dois mecanismos fundamentais para compreender a evolução do campo: **memória relacional** e **hábito relacional**. A memória refere-se ao registro, no campo, das atualizações passadas, modificando o potencial relacional local e influenciando eventos futuros. O hábito, por sua vez, corresponde à tendência de recorrência: regiões que atualizaram no passado tendem a atualizar novamente, devido à herança disposicional deixada no campo. Esses mecanismos tornam o CDR não apenas um campo estático de potencialidades, mas um **campo dinâmico**, sensível à sua própria história.

Atualização como Fenômeno Limiar

A atualização ocorre quando a densidade relacional ultrapassa o limiar crítico R_0 . Esse processo é análogo, em termos formais, a transições de fase em sistemas físicos, mas com uma diferença conceitual fundamental: o “estado atualizado” não é uma nova fase de matéria, e sim a **emergência de propriedades físicas a partir do campo relacional**. O fenômeno limiar é o que permite que regiões subcríticas permaneçam invisíveis ao observador, enquanto regiões supercríticas se estabilizam como entidades materiais.

A ilusão da Inerência Material

A percepção humana e grande parte da física clássica, tende a interpretar a matéria como algo dotado de permanência intrínseca. A HDR, porém, mostra que essa permanência é aparente, ou seja, aquilo que chamamos “objeto” é um **padrão estável de recorrências** de atualização. A matéria persiste não porque possua ser, mas porque suas condições relacionais permanecem favoráveis à atualização repetitiva. Essa perspectiva dissolve a noção de substância e substitui-a por uma noção dinâmica de estabilidade relacional.

Potencial Relacional em Cada Ponto

Como cada ponto do CDR possui um potencial relacional $V(\phi)$, é esse potencial que condiciona se a região está em regime subcrítico ou supercrítico. Diferentes formas de potencial permitem modelar dinamicamente a emergência de estruturas, a formação de partículas e a estabilidade de sistemas. O potencial relacional é, portanto, o elemento fundamental para traduzir matematicamente a ontologia da HDR.

O CDR como Campo Ontológico Fundamental

As seções anteriores caracterizaram o CDR como um campo escalar atemporal, dotado de densidade relacional variável, memória e hábito. A partir dessa caracterização, é possível explicitar com maior precisão o seu estatuto ontológico: o CDR não é apenas mais um campo entre outros, mas um **campo ontológico fundamental**, anterior aos campos físicos descritos pela

física contemporânea.

Em vez de supor que propriedades físicas como massa, carga elétrica ou spin sejam dados primários, inerentes a partículas ou campos específicos, a HDR propõe que tais propriedades **emergem** quando determinadas regiões do CDR ultrapassam o limiar relacional crítico. Em termos ontológicos, isso significa que o CDR é o nível em que se decide **se** e **como** algo pode vir a possuir propriedades físicas: a matéria não precede a relação; é a própria estabilização relacional em regime supercrítico.

Essa perspectiva permite introduzir uma **hierarquia conceitual de níveis**:

- **Nível 0 – CDR (campo ontológico fundamental):** tecido contínuo de disponibilidades relacionais, dotado de densidade, memória e hábito, mas ainda sem propriedades físicas atualizadas.
- **Nível 1 – Propriedades físicas emergentes:** em regiões onde a densidade relacional ultrapassa o limiar crítico, surgem partículas dotadas de propriedades como massa, carga elétrica, spin, de acordo com a qualidade relacional específica, definidas como efeitos da superatualização do campo.
- **Nível 2 – Campos físicos específicos:** campos gravitacionais, eletromagnéticos e demais estruturas da física são interpretados como **campos efetivos** cujos parâmetros (massas efetivas, acoplamentos, cargas) dependem do estado local do CDR. Neste nível é possível associar dado campo ao elemento gerador.

Do ponto de vista formal, isso significa que a solução do CDR em uma dada região funciona como uma espécie de “vácuo ontológico”, a partir do qual se definem parâmetros físicos efetivos. Em linguagem matemática, pode-se escrever esquematicamente:

$$m_{ef} = f_m(\phi), q_{ef} = f_q(\phi), g_{ef} = f_g(\phi) \quad (1)$$

onde

m_{ef} , q_{ef} e g_{ef} representam, respectivamente, massa, carga e constantes de acoplamento efetivas de um campo físico específico, enquanto ϕ é o valor do CDR naquela região.

Desse modo, os campos físicos tratados pela teoria de campo padrão podem ser compreendidos como **expressões de segunda ordem** de uma estrutura ontológica mais básica, o CDR, que condiciona e regula a emergência de propriedades físicas e de suas interações.

Conceber o CDR como “campo-mãe” dos campos físicos não implica duplicar entidades ontológicas, mas, ao contrário, reduzir a multiplicidade aparente de propriedades a um fundamento relacional comum. O que a ontologia relacional proposta pela HDR acrescenta, portanto, não é um novo campo físico, mas um **nível anterior de descrição** no qual a própria possibilidade de haver massa, carga e campos específicos é resultado da organização do tecido de disponibilidade relacional.

CAMPO DE DISPONIBILIDADE RELACIONAL (CDR)

A formulação matemática do Campo de Disponibilidade Relacional (CDR) busca estabelecer um arcabouço formal que represente a ontologia proposta pela Hipótese da Disponibilidade Relacional (HDR). O objetivo não é apenas produzir uma analogia com as teorias de campo existentes, mas construir um formalismo coerente, capaz de descrever como propriedades físicas emergem a partir de dinâmicas relacionais. Esta seção apresenta os fundamentos do modelo matemático: a definição do campo, seus axiomas constitutivos, os operadores relevantes, a estrutura do potencial relacional e a equação geral que rege sua dinâmica.

Nesta formulação empregaremos ferramentas formais típicas da teoria de campos — tais como campos escalares, potenciais, lagrangianas e equações variacionais. Essa escolha pode sugerir, à primeira vista, que o Campo de Disponibilidade Relacional (CDR) seria um campo físico adicional, coexistindo com os campos gravitacional, eletromagnético ou quânticos em geral. Essa interpretação, porém, seria equivocada.

O CDR **não é um campo físico**, mas um **campo ontológico fundamental**, situado em um nível mais profundo do que qualquer campo descrito pela física contemporânea. Ele não é definido sobre o espaço-tempo físico, mas sobre um **espaço relacional primordial**, anterior a qualquer métrica, causalidade ou coordenada. O CDR não transporta energia, não acopla forças, não possui mediadores e não obedece a simetrias internas ou externas de grupos de Lie. Seu estatuto não é físico, mas **constitutivo**: o CDR descreve o domínio das possibilidades relacionais a partir do qual a existência se atualiza.

Essa estrutura hierárquica oferece uma interpretação da formulação matemática em que o CDR será descrito como campo escalar, pois essa é a estratégia formal mais simples e geral de representar um campo fundamental. Entretanto, ao reposicionar seu estatuto ontológico, o formalismo ganha profundidade e o conceito do CDR deixa de ser apenas um modelo matemático

e se torna o **fundamento ontológico de onde emergem a matéria, suas propriedades e os campos físicos**.

Definição do Campo

Como admitido partimos de um **campo escalar atemporal**, definido sobre o espaço a priori tridimensional:

$$\phi: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^+. \quad (2)$$

Assumimos aqui $\mathbb{R}^3$ com “um domínio relacional X , que para fins formais pode ser tratado como $\mathbb{R}^3$ clássico quando se deseja introduzir operadores diferenciais”.

O valor $\phi(\mathbf{x})$ representa a **disponibilidade relacional** no ponto $\mathbf{x}$. Trata-se de uma grandeza ontológica e não física: o campo não transporta energia, não se propaga no tempo e não possui dinâmica temporal.

A estrutura temporal surge apenas após a ocorrência de atualizações, e, portanto, não faz parte da definição fundamental do campo.

Axiomas Fundamentais do CDR

Formulamos os seguintes **axiomas**, que definem o comportamento ontológico e matemático do campo:

Axioma 1 – Primazia das Relações

O valor $\phi(\mathbf{x})$ não deriva de propriedades físicas, mas das relações potenciais entre pontos do campo.

$$\phi(\mathbf{x}) = \phi_{\text{rel}}(\mathbf{x}). \quad (3)$$

Axioma 2 – Campo Atemporal

Não existe variável temporal fundamental. O campo é definido apenas em função de suas coordenadas espaciais.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \equiv 0 \quad (3.1)$$

A ausência de tempo não implica imobilidade ontológica: a reorganização do campo ocorre por recorrências relacionais, moduladas por memória e hábito, e não por uma variável temporal fundamental.

Axioma 3 – Densidade Relacional

Cada ponto possui densidade relacional:

$$\rho(\mathbf{x}) = f(\phi(\mathbf{x}), M(\mathbf{x}), H(\mathbf{x})), \quad (4)$$

onde

M representa **memória relacional** e H representa **hábito relacional**.

Axioma 4 – Atualização como Fenômeno Limiar

Existe um valor crítico R_0 tal que:

$$\rho(\mathbf{x}) \geq R_0 \Rightarrow \text{Atualização (emergência de existência)} \quad (5)$$

Axioma 5 – Memória e hábito modulam o campo

As funções M e H modificam localmente o potencial relacional:

$$\phi(\mathbf{x}) = \phi_0(\mathbf{x}) + \Delta M(\mathbf{x}) + \Delta H(\mathbf{x}). \quad (6)$$

Operadores Diferenciais e Estrutura Espacial

Apesar de o campo ser atemporal, ele possui **estrutura espacial contínua**. Assim, adotamos o operador laplaciano:

$$\nabla^2 \phi(\mathbf{x}) = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2}. \quad (7)$$

A função do laplaciano no CDR não é medir fluxo físico, mas detectar **gradientes relacionais**, ou seja, variações de disponibilidade entre regiões:

$\nabla^2 \phi = 0$ indica região homogênea, sem tendência a atualizar.

$\nabla^2 \phi \neq 0$ indica tensões relacionais, zonas de possível atualização.

Potencial Relacional

Definimos em cada ponto um **potencial relacional** $V(\phi)$, cuja forma determina o regime subcrítico ou supercrítico do campo. A forma mais simples e expressiva, análoga aos potenciais utilizados em transições de fase, é:

$$V(\phi) = \alpha(\phi^2 - \beta^2)^2, \quad (8)$$

onde:

- $\alpha > 0$: controla a rigidez do campo,
- $\beta > 0$: controla a posição dos mínimos do campo.

Essa forma tem duas vantagens conceituais:

1. Descreve dois regimes:
 - **subcrítico**: $|\phi| < \beta$,
 - **supercrítico**: $|\phi| \geq \beta$.
2. Permite interpretar o limiar R_0 como ponto de transição:

$$R_0 = \beta.$$

Termos de Memória e Hábito

O potencial relacional completo inclui termos adicionais associados às recorrências:

$$\mathcal{M}(\phi) = \mu M(\mathbf{x})\phi,$$

$$\mathcal{H}(\phi) = \eta H(\mathbf{x})\phi^2, \quad (9)$$

onde

μ e η são constantes de acoplamento.

Assim, o potencial total é:

$$V_{\text{total}}(\phi) = \alpha(\phi^2 - \beta^2)^2 + \mu M(\mathbf{x})\phi + \eta H(\mathbf{x})\phi^2. \quad (10)$$

Lagrangiana do Campo

Para estruturar matematicamente o campo, definimos a densidade lagrangiana:

$$\mathcal{L}(\phi) = \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2 - V_{\text{total}}(\phi). \quad (11)$$

Como esperado, **não há termo cinético temporal**, pois o campo é atemporal:

$$\frac{1}{2}\left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)^2 \equiv 0. \quad (11.1)$$

Equação Geral do CDR

Aplicando o princípio de mínima ação (Euler–Lagrange espacial), obtemos a equação fundamental:

$$\nabla^2 \phi(\mathbf{x}) = \frac{\partial V_{\text{total}}}{\partial \phi}. \quad (12)$$

Explicitamente:

$$\nabla^2 \phi = 4\alpha\phi(\phi^2 - \beta^2) + \mu M(\mathbf{x}) + 2\eta H(\mathbf{x})\phi. \quad (13)$$

Essa é a **equação mestra** do Campo de Disponibilidade Relacional.

Ela descreve:

- quais distribuições de densidade relacional são compatíveis com os padrões de memória e hábito;
- onde há tensões relacionais suficientes para produzir atualização;
- de que forma a memória e o hábito modulam a estrutura relacional emergente do campo.

Condição de Atualização

A atualização ocorre quando:

$$\phi(\mathbf{x}) \rightarrow \phi_{\text{crit}} = R_0 = \beta.$$

Em termos diferenciais:

$$\phi(\mathbf{x}) \geq \beta \Rightarrow \text{Evento de atualização (emergência de propriedades físicas)}.$$

Uma vez estabelecida a formulação matemática do Campo de Disponibilidade Relacional (CDR), é possível investigar como propriedades físicas específicas, como massa, emergem a partir do processo de atualização.

Mapeamentos Emergentes de Propriedades Físicas

Dado que as propriedades físicas emergem do CDR, definem-se funções gerais:

$$m_{ef}(\phi), q_{ef}(\phi), s_{ef}(\phi), g_{ef}(\phi).$$

Não se trata de mecanismos de acoplamento físico, mas de **parametrizações ontológicas** que indicam:

- quando o campo produz massa;
- quando produz carga;
- quando produz orientações estruturais (spin);
- quando produz constantes de acoplamento.

Essas funções não modificam a equação do CDR, apenas mapeiam seu estado para propriedades físicas.

Interpretação Ontológica da Formulação Matemática

Com essa estrutura, o CDR pode ser compreendido como um **campo-mãe** do qual todo o real físico deriva. A matemática descreve:

- como a densidade relacional se organiza;
- como padrões supercríticos produzem propriedades físicas;
- como essas propriedades inauguram campos físicos específicos;
- como o espaço-tempo surge como efeito coletivo da estabilidade das atualizações.

Assim, a formulação matemática do CDR mantém a simplicidade estrutural dos campos escalares, mas inaugura um **novo regime ontológico**, no qual a existência é efeito da organização relacional e a matéria é um padrão de estabilidade dentro de um campo mais fundamental.

Emergência das Propriedades Físicas no Campo de Disponibilidade Relacional

Neste tópico, mostraremos um exemplo de como algumas propriedades físicas usualmente atribuídas às partículas elementares (**massa, carga elétrica e spin**) podem ser reinterpretadas como **modos emergentes** de organização do Campo de Disponibilidade Relacional (CDR). A

estratégia é explicitar, para cada propriedade, (i) qual estrutura matemática do CDR está em jogo, (ii) qual simetria ou operador gera essa estrutura e (iii) como a grandeza física usual aparece como **quantidade conservada ou parâmetro efetivo** da dinâmica relacional.

Estrutura básica: campo relacional e lagrangiana

Partimos de um campo relacional escalar complexo

$$\phi(x) \in \mathbb{C},$$

definido em $\mathbb{R}^3$, cuja interpretação ontológica é a **disponibilidade relacional** em cada ponto. A dinâmica é dada por uma lagrangiana do tipo

$$\mathcal{L}_{\text{CDR}}[\phi] = \partial_\mu \phi^* \partial^\mu \phi - V(\phi^* \phi) + \mathcal{L}_{\text{int}}(\phi, \partial \phi), \quad (14)$$

onde

V é o potencial relacional e $\mathcal{L}_{\text{int}}$ contém termos de interação (inclusive com outros campos, se necessário).

A expansão de V em torno de um mínimo ϕ_0 de alta densidade relacional,

$$\phi(x) = \phi_0 + \eta(x), \quad (15)$$

será a chave para interpretar a **massa**; já as **simetrias globais e locais** de $\mathcal{L}_{\text{CDR}}$ permitirão definir **carga elétrica**, enquanto a estrutura de rotações (em um espaço interno relacional) dará origem ao **spin**.

Massa como Curvatura do Potencial Relacional

Considere o potencial relacional dependente apenas do módulo $\phi^* \phi$:

$$V(\phi^* \phi) = V(|\phi|^2). \quad (16)$$

Suponha que V possua um mínimo estável em $|\phi|^2 = |\phi_0|^2$, associado a um regime de **alta densidade relacional**. Expandindo V em torno desse mínimo:

$$\phi(x) = \phi_0 + \eta(x), \quad (17)$$

temos, ao nível quadrático,

$$V(\phi^* \phi) \simeq V(|\phi_0|^2) + \frac{1}{2} \frac{d^2 V}{d|\phi|^2} \Big|_{|\phi_0|^2} (\delta |\phi|^2)^2 + \dots, \quad (18)$$

onde

$\delta |\phi|^2 = |\phi|^2 - |\phi_0|^2$ é a flutuação do módulo em torno do valor de equilíbrio.

No regime linearizado, o termo relevante é o termo “massivo” da lagrangiana efetiva para η :

$$\mathcal{L}_{\text{efet}}[\eta] \simeq \partial_\mu \eta^* \partial^\mu \eta - \frac{1}{2} m_R^2 \eta^* \eta + \dots, \quad (19)$$

com

$$m_R^2 = 2 |\phi_0|^2 \frac{d^2 V}{d(|\phi|^2)^2} \Big|_{|\phi_0|^2}. \quad (20)$$

Chamamos m_R de **massa relacional efetiva**. Matematicamente, ela é a **curvatura do potencial** no ponto de equilíbrio relacional. Ontologicamente, corresponde ao grau de **rigidez da configuração relacional**: quanto mais “curvado” o potencial em torno de ϕ_0 , mais a configuração resiste a variações e, portanto, mais **inercial** é a atualização associada àquele modo. Consequentemente ratificamos a **definição (Massa relacional)** conforme acima em que, dada uma solução de equilíbrio ϕ_0 do CDR, a massa de um modo de flutuação η será definida por:

$$m_R^2 := 2 |\phi_0|^2 \frac{d^2 V}{d(|\phi|^2)^2} \Big|_{|\phi_0|^2}, \quad (20)$$

interpretando-se m_R como medida da **densidade relacional estável** associada àquela configuração. Assim, no CDR, a massa não é um atributo “colado” à partícula, mas o resultado da **estabilidade local do campo de disponibilidade relacional**.

Carga elétrica como assimetria relacional (simetria $U(1)$)

Para obter a analogia com a **carga elétrica**, introduzimos uma simetria global de fase no CDR:

$$\phi(x) \rightarrow e^{i\alpha} \phi(x), \alpha \in \mathbb{R}. \quad (21)$$

A lagrangiana $\mathcal{L}_{\text{CDR}}$ é invariante sob essa transformação se depender apenas de $\phi^* \phi$ e de derivadas covariantes adequadamente definidas. Pelo teorema de Noether, a simetria contínua $U(1)$ gera uma corrente conservada:

$$j_R^\mu = i(\phi^* \partial^\mu \phi - \phi \partial^\mu \phi^*), \quad (22)$$

com

$$\partial_\mu j_R^\mu = 0.$$

A carga relacional associada a essa simetria é

$$Q_R = \int_{\Sigma} j_R^0 d^3x, \quad (22.1)$$

onde

Σ é uma hipersuperfície espacial.

Definição (Carga relacional $U(1)$):

A quantidade Q_R é definida como a integral da densidade de corrente j_R^0 associada à simetria global de fase do CDR.

Interpretamos Q_R como medida de uma **assimetria relacional**: regiões onde a fase relacional é organizada de modo globalmente consistente geram um excesso (ou déficit) de fluxo relacional, que se manifesta como “fonte” ou “sumidouro” do campo. A identificação com a carga elétrica surge quando:

1. promovemos a simetria $U(1)$ a **simetria local**,
- (22.2)

$$\phi(x) \rightarrow e^{i\alpha(x)}\phi(x),$$

2. introduzimos um campo de conexão $A_\mu(x)$ (campo relacional de acoplamento), com derivada covariante
- (22.3)

$$D_\mu\phi = (\partial_\mu + iq_RA_\mu)\phi;$$

3. identificamos q_R como o **acoplamento relacional** análogo à carga elétrica.

Nesta leitura, a **carga elétrica usual** é reinterpretada como um caso particular da **carga relacional** Q_R , emergente de uma simetria de fase do CDR. O valor do acoplamento q_R mede o quanto uma atualização depende da assimetria do campo relacional ao redor.

Spin como Orientação Relacional (Simetria de Rotação)

Para o **spin**, consideraremos um campo relacional com estrutura interna vetorial³ ou espinorial. Por exemplo, um campo relacional vetorial

³ O CDR é definido, na ontologia da Hipótese da Disponibilidade Relacional, como um campo escalar $\phi(x)$ representando o grau de disponibilidade relacional em cada ponto. Contudo, a escalaridade ontológica não implica ausência de **estruturas internas fenomenológicas**. Há diversos precedentes na física em que um campo escalar fundamental descreve entidades com graus de liberdade internos emergentes: – o campo de Higgs é um escalar mas organiza-se como um doublet $SU(2)$; – átomos neutros são descritos por potenciais escalares, mas exibem momentos angulares internos; – modos coletivos em teoria efetiva transformam-se como vetores ou espinores mesmo emergindo de escalas mais fundamentais. De modo análogo, no CDR, embora $\phi(x)$ seja ontologicamente escalar, certas soluções estáveis podem adquirir **orientações relacionais** representáveis por uma variável interna $\vec{\xi}$, com transformação

$$\vec{\xi} \rightarrow R(\theta)\vec{\xi},$$

onde $R(\theta)$ é uma rotação em um espaço relacional interno. Essa estrutura adicional não altera o caráter escalar fundamental do CDR, mas fornece o aparato matemático necessário para definir os **operadores de spin relacionais** que emergem como modos excitados de orientação do tecido relacional.

$$\phi_i(x), i = 1, 2, 3,$$

que carrega uma **orientação relacional**. Sob rotações em um espaço relacional interno, temos:

$$\phi_i(x) \rightarrow R_{ij}(\boldsymbol{\theta}) \phi_j(x), \quad (23)$$

onde

$R_{ij}(\boldsymbol{\theta})$ é uma matriz de rotação parametrizada por $\boldsymbol{\theta}$.

Os geradores infinitesimais dessas rotações, $\hat{S}_k$, satisfazem a álgebra de Lie de $SO(3)$:

$$[\hat{S}_i, \hat{S}_j] = i\epsilon_{ijk} \hat{S}_k. \quad (23.1)$$

Em representação coordenatizada, podemos escrever um operador de “rotação relacional” atuando sobre o campo:

$$\hat{S}_k = -i \epsilon_{kij} \phi_i \frac{\partial}{\partial \phi_j}. \quad (23.1)$$

Definição (Spin relacional)

Chamamos **spin relacional** o conjunto de operadores $\hat{\mathbf{S}} = (\hat{S}_1, \hat{S}_2, \hat{S}_3)$ que implementam rotações em um espaço interno de orientações do CDR, satisfazendo:

$$[\hat{S}_i, \hat{S}_j] = i\epsilon_{ijk} \hat{S}_k. \quad (23.2)$$

Os autovalores de $\hat{\mathbf{S}}^2$ e de $\hat{S}_z$ determinam os **quantum numbers relacionais** de orientação. Quando se quantiza o CDR, esses autovalores reproduzem o espectro típico de spins $s = 0, \frac{1}{2}, 1, \dots$, agora interpretados como diferentes **padrões discretos de orientação do tecido relacional**, e não como rotação mecânica de um objeto.

Síntese: Propriedades como Modos Emergentes de Organização Relacional

Do ponto de vista do CDR, podemos sintetizar essas propriedades⁴ da seguinte forma:

- **Massa** emerge da **curvatura do potencial relacional** em torno de configurações de equilíbrio de alta densidade: é a medida de rigidez da atualização.
- **Carga elétrica** emerge como **carga de Noether** associada a uma simetria de fase $U(1)$ do CDR, interpretada como **assimetria global da fase relacional**.
- **Spin** emerge dos geradores de rotações em um espaço interno de orientações relacionais, sendo os autovalores desses operadores a versão relacional dos números quânticos de spin.

Com isso, o CDR oferece uma leitura unificada: o que no Modelo Padrão aparece como **atributos intrínsecos** de partículas pode ser reinterpretado como **expressões matemáticas de modos específicos de organização do campo de disponibilidade relacional**, definidos por sua densidade, assimetrias de fase, orientações e hiperconectividades internas. A utilização de uma lagrangiana e de uma equação de campo não implica que o CDR seja um campo dinâmico no sentido convencional. Trata-se, antes, de um **formalismo matemático mínimo** para expressar a organização interna do CDR, suas zonas de estabilidade e instabilidade e, sobretudo, seu limiar crítico de atualização. Assim, a matemática permanece estruturalmente idêntica à de um campo escalar, enquanto o **significado ontológico** de cada termo é profundamente distinto:

- ϕ não representa energia ou amplitude física, mas **densidade relacional fundamental**;
- $(\nabla\phi)^2$ não expressa propagação ou força, mas **variação estrutural da disponibilidade relacional**;
- $V(\phi)$ não é potencial energético, mas **potencial ontológico**, indicando fases de possibilidade, criticidade e emergência;
- a equação $\nabla^2\phi = V'(\phi)$ expressa não o dinamismo físico, mas **condições formais de estabilidade e atualização**.

Na próxima seção, apresentamos um teste conceitual e matemático que ilustra a formação de um objeto de massa m a partir do aumento local da densidade relacional, seguido da superação do limiar crítico R_0 . Não se trata ainda de uma teoria de partículas completa, mas de uma demonstração formal consistente com a ontologia da HDR e com as equações derivadas na seção anterior.

⁴ Por uma opção de publicação realizamos a apresentação apenas algumas propriedades físicas como exemplificação embora a dinâmica formal do CDR permite realizar a todas descritas no Modelo Padrão de Partículas.

ATUALIZAÇÃO DE UM OBJETO DE MASSA m

A finalidade aqui é demonstrar, de modo matematicamente explícito e conceitualmente coerente, como um objeto com massa m pode **emergir** do Campo de Disponibilidade Relacional (CDR). Essa demonstração funciona como uma *prova de conceito*: mostra que a definição ontológica da HDR, segundo a qual a matéria é evento, não substância, é compatível com uma formulação formal capaz de reproduzir propriedades físicas conhecidas.

Mostraremos (i) como a atualização ocorre matematicamente, (ii) como a massa é definida em termos do excesso crítico da disponibilidade relacional e (iii) como o objeto emergente retroage sobre o campo, produzindo uma modulação estrutural que lembra, em espírito, o comportamento de campos físicos como o gravitacional ou o eletrostático, embora com origem puramente relacional.

A massa como Intensidade da Superatualização

No CDR, a massa não é interpretada como uma propriedade intrínseca. A massa só aparece quando:

$$\phi(\mathbf{x}) \geq R_0 = \beta. \quad (24)$$

A atualização produz um evento dotado de propriedades físicas; entre elas, a massa. Para formalizar isso, definimos a massa como proporcional ao **excesso relacional crítico**, isto é, ao quanto a região ultrapassou o limiar:

$$m = \kappa(\phi(\mathbf{x}) - \beta)_+, \quad (25)$$

onde

$(\cdot)_+$ indica que valores negativos são desconsiderados (sem superação do limiar, não há massa).

Essa abordagem é compatível com três princípios da HDR:

1. **é inseparável do campo que a gerou**, pois depende da superação de R_0 .

Essa interpretação introduz uma diferença ontológica crucial em relação à física clássica

e até mesmo em relação ao Modelo Padrão: aqui, a massa não é “dada”, mas **emergente e relacional**.

Inserção do Termo de Fonte Relacional

Uma vez que o evento atualizado possua massa m , o objeto exerce um efeito retroativo sobre o campo. Em termos matemáticos, introduzimos na equação mestra um **termo de fonte relacional**:

$$S_m(\mathbf{x}) = \lambda m \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0), \quad (26)$$

onde:

- $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$ concentra o efeito em um ponto,
- λ expressa a força com que o objeto modifica o campo,
- m é o efeito crítico da atualização.

Diferentemente de um potencial físico clássico, este termo **não transporta energia**: ele modifica apenas a **disponibilidade relacional**, ajustando o campo na vizinhança do objeto.

A equação do CDR com fonte torna-se:

$$\nabla^2 \phi = 4\alpha \phi(\phi^2 - \beta^2) + \mu M(\mathbf{x}) + 2\eta H(\mathbf{x})\phi + \lambda m \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0). \quad (27)$$

A presença do termo de fonte introduz uma assimetria local que favorece novas atualizações próximas, um ponto essencial para explicar recorrência, hábito e persistência da matéria.

Para tornar a formalização mais precisa, definimos explicitamente o termo de fonte relacional como proporcional à massa emergente. Como a massa no CDR é dada pelo excesso relacional supercrítico,

$$m = \alpha \max(\phi(x_0) - \phi_c, 0), \quad (27.1)$$

o efeito retroativo da atualização sobre o campo pode ser modelado por um termo de fonte do tipo

$$S(x) = \beta m \delta(x - x_0), \quad (27.2)$$

onde β é uma constante ontológica que expressa a intensidade com que a atualização altera a disponibilidade relacional ao redor de x_0 . Assim, a equação mestra com fonte torna-se

$$-\Delta\phi + \frac{\partial V_{\text{total}}}{\partial\phi} = \beta m \delta(x - x_0). \quad (28)$$

Esse termo não representa energia ou força no sentido físico, mas uma **assimetria relacional** introduzida pelo evento de atualização. Ele cria um poço disposicional que favorece novas atualizações na vizinhança, explicando matematicamente a estabilidade e a persistência dos objetos no CDR. Dessa forma, a retroação da massa sobre o campo fica explicitamente vinculada à própria definição relacional de massa.

Cenário-Modelo: Região Subcrítica Quase Instável

Para ilustrar o mecanismo, consideremos uma região onde:

$$\phi_0(\mathbf{x}_0) = 0.9\beta.$$

Este é um ponto **subcrítico**, mas muito próximo do limiar. Agora introduzimos os efeitos cumulativos das funções de memória e hábito:

- Memória relacional:

$$\Delta M(\mathbf{x}_0) = 0.05\beta,$$

- Hábito relacional:

$$\Delta H(\mathbf{x}_0) = 0.07\beta.$$

Somando as contribuições:

$$\phi_{\text{total}}(\mathbf{x}_0) = 0.9\beta + 0.05\beta + 0.07\beta = 1.02\beta.$$

Logo:

$$\phi_{\text{total}} \geq \beta \Rightarrow \text{Atualização}$$

O excesso crítico é:

$$\Delta\phi_{\text{crit}} = 1.02\beta - \beta = 0.02\beta.$$

E a massa emergente é:

$$m = \kappa(0.02\beta).$$

Observações importantes:

- **O surgimento da massa é suave e contínuo**, não brusco.
- Regiões quase críticas são altamente sensíveis a pequenas variações de memória e hábito.
- O campo pode “lembrar” lugares onde a matéria emergiu anteriormente, facilitando recorrências.
- Do ponto de vista equivalente, pode-se representar o efeito acumulado de memória e hábito como um aumento efetivo da disponibilidade local $\phi_{\text{efetiva}}(x_0)$, uma vez que a deformação do potencial se traduz em um deslocamento do ponto de equilíbrio em direção ao regime supercrítico.

Reação do Campo após a Atualização

Após a atualização, o termo de fonte ativa-se:

$$S_m(\mathbf{x}) = \lambda\kappa(0.02\beta)\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0). \quad (29)$$

Substituindo-o na equação mestra:

$$\nabla^2\phi = 4\alpha\phi(\phi^2 - \beta^2) + \mu M + 2\eta H\phi + \lambda\kappa(0.02\beta)\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0). \quad (30)$$

Esse termo tem três efeitos principais:

Amplificação Local da Densidade Relacional

A densidade relacional aumenta em torno do ponto atualizado, criando um “poço” de disponibilidade.

Atratores Relacionais

Regiões próximas tornam-se mais propensas a atingir o limiar:

$$\phi(\mathbf{x}) \rightarrow \phi(\mathbf{x}) + \Delta\phi(\mathbf{x}), \quad (31)$$

com $\Delta\phi$ decaindo com a distância.

Estabilização Disposicional

Se novas atualizações ocorrerem, a massa tende a **permanecer**, não porque seja substancial, mas porque a recorrência reforça memória e hábito, fechando um ciclo de retroalimentação.

Interpretação Relacional da Massa e da “Persistência” da Matéria

A massa, aqui, desempenha três funções conceituais:

(a) Intensidade relacional

A massa é um índice quantitativo do quanto o campo ultrapassou o estado crítico.

(b) Fonte relacional (a origem dos atratores)

A massa retroage sobre o campo, influenciando regiões adjacentes.

(c) Estabilidade disposicional

A matéria persiste porque o campo “tende” a atualizar novamente naquele ponto, devido a:

- reforço de memória,
- hábito relacional,
- aumento do potencial relacional,
- novo incremento de ϕ .

Assim, a HDR explica a persistência da matéria sem recorrer a substâncias.

Expansão Conceitual: Ligação com Fenômenos Físicos

Embora ainda preliminar, o modelo sugere paralelos interessantes:

- O termo de fonte se comporta analogamente a fontes em equações de campo gravitacionais.
- A estabilidade da matéria lembra mecanismos de confinamento em teorias de gauge, mas aqui é puramente relacional.
- A dependência do excesso crítico ecoa a forma como o campo de Higgs atribui massa a férmions, embora o princípio relacional seja radicalmente distinto.

Essas analogias fortalecem a expectativa de que futuras versões do CDR possam articular-se com modelos físicos conhecidos.

Síntese Final da Seção

1. A massa emerge **apenas após** a atualização.
2. A atualização exige superar o limiar crítico $R_0 = \beta$.

3. A massa é proporcional ao excesso relacional acima desse limiar.
4. O objeto recém-atualizado modifica o campo ao redor por meio de um termo de fonte.
5. Essa modificação favorece novas atualizações locais, explicando a persistência.
6. A matéria, portanto, é um **padrão de recorrência relacional**, não uma entidade substancial.
7. O modelo matemático é compatível com a ontologia da HDR e abre caminho para aplicações físicas futuras.

A formulação matemática do Campo de Disponibilidade Relacional (CDR) permitiu transformar a ontologia da Hipótese da Disponibilidade Relacional (HDR) em um modelo formal coerente, dotado de estrutura interna sólida e de capacidade explicativa. A construção do campo como grandeza escalar atemporal $\phi(\mathbf{x})$, definida exclusivamente sobre o espaço e livre de qualquer dependência temporal fundamental, reforça a posição ontológica de que o tempo não é um dado primário do real, mas consequência emergente das atualizações. A ausência de um termo cinético temporal na lagrangiana do campo e a utilização do operador laplaciano como única medida de variação permitiram enfatizar que o CDR não é uma entidade física tradicional, mas um **campo ontológico**, cuja função é registrar e modular as potencialidades relacionais presentes em cada ponto.

A introdução da densidade relacional $\rho(\mathbf{x})$, derivada de funções de memória $M(\mathbf{x})$ e hábito $H(\mathbf{x})$, mostrou que o campo não é estático nem homogêneo. Ao contrário, ele é dotado de uma estrutura histórico-disposicional: regiões que sofreram atualizações passadas tornam-se mais propensas a novas atualizações. Essa dinâmica expressa matematicamente o que, na dimensão ontológica, corresponde à recorrência disposicional e à estabilização de padrões. A presença de termos de acoplamento (μ e η) revela como a história relacional altera localmente o potencial, modificando a geometria da disponibilidade e definindo a evolução ontológica do campo.

A formulação do potencial relacional $V_{\text{total}}(\phi)$ como combinação de um termo fundamental de dupla estabilidade $\alpha(\phi^2 - \beta^2)^2$ com correções derivadas de memória e hábito mostrou-se especialmente frutífera. Essa combinação permite descrever, de maneira matematicamente interessante, a existência de um **limiar crítico** $R_0 = \beta$, cuja superação conduz à atualização e à emergência de propriedades físicas. Ao mesmo tempo, evidenciou-se que o campo possui dois regimes de comportamento: o subcrítico, no qual não há manifestação física observável, e o supercrítico, no qual a atualização produz estabilidade disposicional e, por conseguinte, matéria.

A derivação da equação mestra do CDR,

$$\nabla^2 \phi = 4\alpha\phi(\phi^2 - \beta^2) + \mu M(\mathbf{x}) + 2\eta H(\mathbf{x})\phi + S_m(\mathbf{x}), \quad (32)$$

constitui o núcleo matemático da teoria. Essa equação sintetiza, em uma única estrutura, a dinâmica relacional, o papel da memória, a influência do hábito e a retroação causada por eventos de atualização (capturada pelo termo de fonte relacional). Diferentemente de equações de campo clássicas ou quânticas, essa equação não descreve propagação temporal, mas **configuração espacial de disponibilidade ontológica** — uma diferença conceitual que distingue radicalmente o CDR das teorias de campo físicas conhecidas.

Por fim, a simulação formal da emergência de um objeto de massa m demonstrou que a massa pode ser definida como o excesso relacional crítico acima do limiar, isto é:

$$m = \kappa(\phi - \beta)_+, \quad (33)$$

o que fornece um critério matemático direto para a emergência de propriedades físicas. O objeto atualizado, ao atuar como fonte relacional $S_m(\mathbf{x})$, modifica a geometria do campo ao redor, tornando a região mais suscetível a novas atualizações, mecanismo que explica, de maneira relacional e não substancial, a persistência e a estabilidade da matéria.

Assim, a parte matemática aqui desenvolvida cumpre três funções essenciais: (i) demonstra que a ontologia da HDR é compatível com um formalismo rigoroso; (ii) oferece mecanismos matemáticos capazes de descrever a emergência de propriedades físicas; e (iii) estabelece um arcabouço operacional que, em seções posteriores, poderá ser comparado às teorias de campo padrão e expandido para aplicações mais amplas. O CDR revela-se, portanto, não apenas como uma hipótese conceitual, mas como um **modelo matemático ontologicamente orientado**, capaz de fundamentar investigações futuras sobre emergência, estabilidade, relacionalidade e a própria estrutura da realidade física.

COMPARAÇÃO ESTRUTURAL ENTRE O CAMPO DE DISPONIBILIDADE RELACIONAL (CDR) E AS TEORIAS DE CAMPO PADRÃO (QFT)

O desenvolvimento formal do Campo de Disponibilidade Relacional (CDR) aproxima-se,

em sua estrutura, das teorias de campo utilizadas na física moderna, especialmente os modelos lagrangianos presentes na Teoria Quântica de Campos (Quantum Field Theory – QFT). Contudo, essa semelhança é apenas superficial: a arquitetura conceitual do CDR diverge radicalmente das teorias tradicionais, tanto no que diz respeito à ontologia subjacente quanto ao papel epistemológico das equações de campo. Esta seção examina sistematicamente convergências e divergências, situando o CDR como uma proposta ontológica que utiliza ferramentas matemáticas conhecidas, mas em uma *configuração inédita*, que rompe com pressupostos fundamentais da física.

Semelhanças Formais entre o CDR e as Teorias de Campo Físicas

Embora o CDR opere em um domínio ontológico distinto, ele compartilha algumas estruturas matemáticas com as teorias de campo padrão. Aqui é importante reforçar que o CDR não é parte do Modelo Padrão e não está em espaço-tempo físico, ele precede ambos. Entre as semelhanças, destacam-se:

O uso de uma Lagrangiana para Descrever a Dinâmica

O CDR utiliza uma densidade lagrangiana do tipo:

$$\mathcal{L}(\phi) = \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2 - V_{\text{total}}(\phi), \quad (34)$$

estrutura formal idêntica à presente em modelos de campo escalar relativísticos, como o campo de Higgs ou o modelo ϕ^4 .

O papel dos Potenciais

O potencial relacional:

$$V_{\text{total}}(\phi) = \alpha(\phi^2 - \beta^2)^2 + \mu M(\mathbf{x})\phi + \eta H(\mathbf{x})\phi^2, \quad (35)$$

possui forma polinomial com mínimos estáveis, característica típica de teorias de campos

com simetria quebrada ou transições de fase.

Termos de Fonte

A presença de um termo de fonte:

$$S_m(\mathbf{x}) = \lambda m \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0), \quad (36)$$

é comum na QFT e em equações clássicas de campo (eletromagnetismo, equações de Klein–Gordon com fonte etc.).

Equações Diferenciais Elípticas

O CDR utiliza:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial V_{\text{total}}}{\partial \phi} + S_m, \quad (37)$$

que é estruturalmente semelhante a equações de movimento estáticas em teorias de campo.

Essas semelhanças tornam o CDR formalmente reconhecível a físicos teóricos, facilitando sua leitura, modelagem e simulação. Ressalte-se que a analogia formal não implica qualquer equivalência física: o CDR permanece ontológico.

Rupturas Fundamentais entre o CDR e as Teorias de Campo Padrão

Apesar das semelhanças formais, o CDR rompe com princípios centrais das teorias de campo físicas. As diferenças são profundas e estruturais:

Ausência Total de Tempo Fundamental

Nas teorias de campo quânticas e relativísticas, o tempo é uma variável essencial. O termo cinético temporal do campo é parte indispensável da dinâmica:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)^2. \quad (38)$$

No CDR:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \equiv 0. \quad (38.1)$$

O CDR não possui tempo fundante, apenas espaço relacional contínuo.

Divergência

ontológica:

Na QFT, os campos existem no espaço-tempo.

No CDR, o espaço-tempo não é fundamental; apenas o campo é.

O tempo surge *após* as atualizações, como contagem de microeventos. Isso coloca o CDR mais próximo de ontologias relacionais radicais (como algumas versões da Mecânica Quântica Relacional), mas com definição matemática explícita.

O campo não é físico: é ontológico

Na física, campos transportam energia, obedecem a leis dinâmicas e se propagam.

No CDR:

- o campo não carrega energia,
- não se move,
- não colapsa,
- não evolui temporalmente.

O CDR não é um campo físico, mas um **campo de potencialidades ontológicas**, antecedente a qualquer estrutura física.

Emergência de Propriedades Físicas por Limiar

Na física, partículas são excitações quantizadas do campo (QFT), ou soluções estáveis de equações de campo clássicas.

No CDR:

- partículas (ou objetos) surgem quando

$$\phi \geq \beta = R_0 \quad (39)$$

— **superação do limiar relacional crítico.**

- massa não é propriedade intrínseca, mas excesso relacional:

$$m = \kappa(\phi - \beta)_+. \quad (40)$$

Essa é uma ruptura profunda: a QFT pressupõe massa, o CDR **explica** sua emergência.

Memória e Hábito como Termos de Campo

As teorias de campo não possuem memória: são Markovianas.⁵
No CDR, memória e hábito são termos fundamentais do potencial:

$$\mathcal{M}(\phi) = \mu M(\mathbf{x})\phi, \mathcal{H}(\phi) = \eta H(\mathbf{x})\phi^2. \quad (41)$$

Esses termos introduzem **história**, algo inexistente nas teorias físicas:

- o campo aprende,
- registra,
- acumula,
- modifica-se com a recorrência.

Essa característica aproxima o CDR de modelos de complexidade e longe do mecanicismo clássico.

⁵ **As teorias de campo convencionais são Markovianas:** a evolução temporal do campo é determinada unicamente pelo estado presente (ϕ, π) , sem dependência explícita da trajetória passada. As equações de movimento de um campo — sejam clássicas ou quânticas — têm a forma $\partial_t \phi = F(\phi, \pi)$, o que caracteriza uma dinâmica sem memória causal. **No CDR, ocorre o oposto:** a atualização depende da **história acumulada do próprio campo**. A densidade relacional resulta da recorrência de interações, a memória expressa a persistência dessas relações ao longo do tempo, e o hábito representa o reforço estatístico de padrões relacionais. Esses elementos entram diretamente no potencial relacional, de modo que a dinâmica do CDR é explicitamente **não-Markoviana**: o estado atual não basta para determinar o próximo; é necessária a trajetória relacional acumulada.

Ontologia não Substancialista

A QFT é substancialista em sua formulação canônica: campos quânticos são entidades existentes independente de relação.

A HDR afirma:

- nada existe sem relação;
- tudo que existe é atualização relacional;
- matéria é um estado recorrente de superatualização;
- inerência é ilusão disposicional.

Este é um dos pontos mais inovadores do CDR.

Convergência Parcial com a Mecânica Quântica Relacional (Rovelli)

O CDR compartilha com Rovelli a ideia de que:

- propriedades não existem sem interação;
- estado não é substancial;
- relações produzem observáveis.

Mas diverge em três pontos:

1. Rovelli mantém dependência temporal.
2. Rovelli mantém estrutura quântica padrão (operadores, estados, Hilbert).
3. A HDR prevê **um campo relacional pré-físico**, inexistente em Rovelli.

Assim, o CDR sugere uma ampliação da MQR ao oferecer **uma camada ontológica subjacente**, com potencial e equação própria.

O que o CDR Acrescenta às Teorias de Campo

O CDR permite:

- **Explicar a emergência de propriedades físicas.** Não apenas descrevê-las.
- **Fundar o tempo e a matéria em processos relacionais.** Não tomar ambos como dados.
- **Oferecer matemática conciliável com ontologia relacional.** Algo ainda inexistente na física moderna.
- **Abrir caminho para uma teoria de campo pós-substancialista.** O CDR é a primeira

formulação consistente desse tipo.

IMPLICAÇÕES ONTOLÓGICAS, EPISTEMOLÓGICAS E FÍSICAS DA FORMULAÇÃO DO CDR

A formalização matemática do Campo de Disponibilidade Relacional (CDR) representa mais do que a criação de uma estrutura teórica adicional no conjunto das ontologias científicas contemporâneas. Ela implica uma reconfiguração profunda das bases sobre as quais construímos a noção de realidade, de conhecimento e de matéria. Esta seção explora essas implicações sob três eixos interdependentes: ontológico, epistemológico e físico. Cada eixo ilumina um aspecto distinto do CDR, mostrando como essa proposta reorganiza pressupostos consolidados e abre novas possibilidades de investigação.

Implicações Ontológicas: o ser Como Atualização Relacional

A ontologia do CDR realiza uma ruptura decisiva com o substancialismo clássico e mesmo com certas interpretações ontológicas da física moderna. Três consequências principais emergem dessa perspectiva:

O Primado das Relações sobre os Relata

A formulação do CDR confirma matematicamente que:

- nada existe por si mesmo;
- o ser não é substância;
- toda existência é produto de um **evento de atualização**;
- a atualização depende exclusivamente de relações.

Assim, objetos, partículas, campos físicos e sistemas materiais são efeitos de estabilizações relacionais supercríticas, e não unidades ontológicas autossuficientes. Isso coloca a HDR em continuidade com tradições relacionais, mas com ineditismo: aqui, a relação é quantificável e formalizada.

A Inexistência de Propriedades Intrínsecas

A estrutura do CDR mostra que propriedades físicas **não são atributos permanentes**, mas efeitos emergentes do campo quando o limiar crítico $R_0 = \beta$ é ultrapassado. Não há, portanto, essência material; há padrões de recorrência disposicional.

A Matéria como Padrão de Estabilidade

A matéria é reinterpretada como:

- um estado recorrente de superatualização,
- mantido por memória e hábito,
- dependente do contexto relacional,
- não uma substância autônoma.

Essa visão corrige o equívoco ontológico da inerência e oferece um modelo matemático para explicar estabilidade, permanência e identidade. A ontologia da HDR é, portanto, dinâmica, disposicional e profundamente anti-substancialista.

Implicações Epistemológicas: o Conhecimento como Relação Atualizada

A formulação do CDR tem implicações epistemológicas igualmente profundas.

Não há Conhecimento sem Relação

Se nada existe sem relação, então nada é cognoscível sem uma atualização entre observador e sistema. O conhecimento não é revelação de uma essência oculta, mas **coemergência** entre o observador e o aspecto do campo que se torna atualizado na interação.

Isso aproxima epistemologia e ontologia: conhecer é gerar o evento que se conhece.

A Observação Deixa Traços no Campo

Como memória e hábito relacional modulam a densidade do campo, todo ato de observação:

- modifica a disponibilidade relacional,
- altera a probabilidade de futuras atualizações,
- produz efeitos que persistem.

Assim, não há observação neutra: há participação ontológica contínua.

Esse ponto ressoa fenômenos conhecidos da mecânica quântica (como dependência contextual da medição), mas o CDR oferece um mecanismo ontológico explícito para esse efeito.

O Observador é Parte do Fenômeno

O observador não é entidade externa; é um ponto do campo que realiza uma atualização. Conhecer é entrar no circuito relacional do real. Isso faz do CDR uma teoria intrinsecamente participativa.

Implicações Físicas: Emergência, Estrutura e Dinâmica do Real

A formulação matemática do CDR estabelece bases para uma nova compreensão da física.

Emergência Ontológica de Propriedades Físicas

O CDR mostra como propriedades físicas emergem de forma condicional:

- só existem em regime supercrítico,
- dependem da densidade relacional,
- surgem por limiar,
- são proporcionais ao excesso crítico.

Isso redefine massa, energia e localização como fenômenos emergentes, não dados fundamentais.

Fundamento para o Tempo

O tempo surge como **contagem de atualizações**. Não existe fluxo temporal no campo, mas:

Tempo = ordenação das atualizações.

Isso aproxima o CDR de certas formulações relacionais do tempo (como Rovelli), mas com inovação: aqui, o tempo é efeito da própria dinâmica do campo, não metáfora epistemológica ou reconstrução estatística.

Estrutura Espacial Dinâmica

Embora o campo seja contínuo, sua distribuição de potencial e densidade gera “geometrias relacionais” que:

- atraem atualizações,
- estabilizam regiões,
- produzem pseudo-potenciais,
- criam efeitos semelhantes à curvatura gravitacional.

Isso sugere que a gravidade pode ser reinterpretada como **gradiente relacional**, e não como curvatura espaço-temporal fundamental.

Persistência da Matéria como Padrão Dinâmico

Objetos persistem porque:

- atualizam recorrentemente,
- reforçam sua densidade relacional,
- alteram o campo ao redor,
- sustentam um ciclo memória → hábito → supercrítica.

Essa dinâmica substitui a noção de substância por uma noção física de estabilidade emergente.

Potencial Conexão com Teorias de Emergência e Complexidade

A presença de memória e hábito torna o CDR compatível com áreas como:

- sistemas complexos,
- auto-organização,

- emergência de padrões,
- dinâmica de fases críticas,
- física estatística não markoviana.

Assim, o CDR pode ser ponte entre física fundamental e ciências da complexidade.

CONCLUSÃO

A formulação do Campo de Disponibilidade Relacional (CDR), desenvolvida a partir da Hipótese da Disponibilidade Relacional (HDR), permitiu estabelecer um modelo ontológico e matemático capaz de explicar a emergência da matéria, do tempo e da estabilidade dos sistemas físicos a partir de relações e não de substâncias. A inversão ontológica proposta, segundo a qual as relações precedem a existência de propriedades físicas, encontrou, no formalismo do CDR, uma estrutura rigorosa que transforma essa premissa filosófica em um arcabouço analítico e operacional.

A definição do CDR como campo escalar atemporal $\phi(\mathbf{x})$, dotado de densidade relacional variável, permitiu integrar a ontologia relacional em uma linguagem matemática adequada, capaz de dialogar com teorias de campo contemporâneas sem se reduzir a elas. O caráter atemporal do campo reforça a tese de que o tempo não é uma dimensão fundamental do real, mas um resultado emergente das atualizações que ocorrem dentro do tecido de disponibilidade. Cada atualização cria um microtempo; a sequência desses microtempos, acumulados, constitui aquilo que percebemos como fluxo temporal. Assim, a temporalidade deriva da dinâmica relacional, e não o contrário.

A construção da lagrangiana do campo e do potencial total $V_{\text{total}}(\phi)$ possibilitou descrever de forma matemática dois regimes fundamentais: o regime subcrítico, no qual o campo não manifesta propriedades físicas, e o regime supercrítico, no qual ocorre a atualização, evento que dá origem à matéria. A introdução das funções de memória e hábito permitiu explicar como o campo registra, herda e intensifica padrões de recorrência, fornecendo base formal para entender a persistência e a estabilidade dos objetos materiais sem recorrer a substâncias intrínsecas. A equação mestra do CDR sintetiza esses elementos em um único formalismo, incorporando a dinâmica relacional, os efeitos históricos do campo e a retroação causada pela emergência de propriedades físicas.

O estudo da atualização de um objeto de massa m demonstrou, de forma concreta, que a

massa pode ser interpretada como o excesso relacional acima do limiar crítico, e não como propriedade intrínseca de um corpo. A massa, assim, não preexiste à atualização: ela emerge como intensidade da superação do limiar, atuando em seguida como fonte relacional capaz de modificar o campo ao redor. Esse mecanismo fornece uma explicação relacional para a persistência dos objetos, baseada em ciclos de realimentação entre memória, hábito e densidade relacional.

Ao comparar o CDR com as teorias de campo padrão (QFT), percebe-se que, embora compartilhe certas estruturas formais, como a lagrangiana, o uso de potenciais e a presença de termos de fonte, o CDR difere profundamente em sua fundação ontológica. As teorias de campo físicas pressupõem o espaço-tempo e tratam campos como entidades que transportam energia e evoluem temporalmente. O CDR, ao contrário, opera em um domínio pré-físico, onde o tempo não existe e a matéria é fenômeno emergente, não fundamento. Essa diferença não é apenas técnica, mas conceitual: o CDR inaugura uma ontologia pós-substancialista, que permite reavaliar noções fundamentais de existência, conhecimento, materialidade e interação.

O conjunto de resultados apresentados neste artigo aponta para a viabilidade e a fecundidade da HDR como hipótese ontológica e científica. O CDR não apenas formaliza a ideia de que a relação antecede o ser, mas demonstra matematicamente como o ser pode surgir, persistir e se estabilizar. Mostra também que a realidade física é inseparável de sua história relacional, e que a estabilidade do mundo é resultado de padrões de recorrência, não de substâncias permanentes.

O presente trabalho abre caminho para investigações futuras em múltiplas direções: desde a expansão do formalismo do CDR para modelos mais complexos, até sua eventual integração com pressupostos da física quântica, da teoria da complexidade, da cosmologia e da filosofia do tempo. Trata-se de um primeiro passo em direção a uma abordagem relacional integrada, na qual ontologia, matemática e física convergem para explicar como o real emerge, se atualiza e se estabiliza.

Assim, a partir da ontologia relacional proposta pela HDR, o CDR oferece não apenas um modelo matemático consistente, mas um quadro conceitual amplo capaz de repensar a estrutura fundamental da realidade. Se a matéria é evento e o tempo é consequência, então o fundamento último do real não está nas coisas, mas nas relações. E é precisamente esse fundamento que o CDR formaliza: um tecido relacional de potencialidades que, ao atualizar-se, faz surgir aquilo que chamamos mundo.

REFERÊNCIAS

Aqui descrevo as obras mais importantes que inspiraram esse artigo

BARAD, Karen. **Meeting the Universe Halfway: Quantum Physics and the Entanglement of Matter and Meaning**. Durham: Duke University Press, 2007.

BELL, John S. **Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

BUNGE, Mario. **Ontology I: The Furniture of the World**. Dordrecht: Reidel, 1977.

FEYNMAN, Richard P.; LEIGHTON, Robert B.; SANDS, Matthew. **The Feynman Lectures on Physics. Vol. III: Quantum Mechanics**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1965.

GREENE, Brian. **The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory**. New York: W. W. Norton, 1999.

GRIFFITHS, David J. **Introduction to Quantum Mechanics. 2. ed.** Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005.

HIGGS, Peter W. **Broken symmetries and the masses of gauge bosons**. Physical Review Letters, v. 13, n. 16, p. 508–509, 1964.

KLEINERT, Hagen. **Path Integrals in Quantum Mechanics, Statistics, Polymer Physics, and Financial Markets. 5. ed.** Singapore: World Scientific, 2009.

KOBAYASHI, Makoto; MASKAWA, Toshihide. **CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction**. Progress of Theoretical Physics, v. 49, n. 2, p. 652–657, 1973.

KUHN, Thomas S. **A Estrutura das Revoluções Científicas. 9. ed.** São Paulo: Perspectiva, 2018.

MALDACEA, Juan B.; PASTORE, Saúl. **Phase Transitions and Critical Phenomena**. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

MARGENAU, Henry. **The Nature of Physical Reality**. New York: McGraw-Hill, 1950.

MARRONE JÚNIOR, Jayme. **Aprender em Relação: Ontologia, Pertencimento e Complexidade no Processo Educativo**. Revista Caderno Pedagógico, v. 17, n. 1, p. 1–25, 2025. <https://doi.org/10.54033/cadpedv22n8-030>

MARRONE JR., Jayme. **Hipótese da disponibilidade relacional: as relações como origem da matéria**. São Paulo: Editora Dialética, 2023.
https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=pt-BR&user=Ma4HzOcAAAAJ&citation_for_view=Ma4HzOcAAAAJ:W7OEmFMylHYC

MARRONE JÚNIOR, Jayme. **Ontologia relacional e emergência da matéria: a hipótese da disponibilidade relacional**. (2025). REVISTA DELOS, 18(67), e5177.
<https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n67-138>

- MARRONE JÚNIOR, Jayme. **A ontologia relacional da existência e a força dos laços sociais: um diálogo entre a hipótese da disponibilidade relacional e a teoria de Mark Granovetter**. (2025). CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES, 18(6), e18947. <https://doi.org/10.55905/revconv.18n.6-300>
- MORIN, Edgar. **Introdução ao pensamento complexo**. 5. ed. Porto Alegre: Sulina, 2011.
- NORET, Pierre; ROVELLI, Carlo. **Relational Quantum Mechanics: A Review. Foundations of Physics**, v. 48, p. 440–462, 2018.
- NOVELLO, Mário. **Do big bang ao universo eterno**. 2. ed. Rio de Janeiro: Zahar, 2013.
- PEIRCE, Charles Sanders. **The Essential Peirce: Selected Philosophical Writings. Vol. 1** (1867–1893). Bloomington: Indiana University Press, 1992.
- PRIGOGINE, Ilya. **O fim das certezas: tempo, caos e as leis da natureza**. São Paulo: Unesp, 1996.
- PRIGOGINE, Ilya; STENGERS, Isabelle. **A Nova Aliança: Metamorfose da Ciência**. Brasília: Editora UnB, 1984.
- ROVELLI, Carlo. **The Order of Time**. New York: Riverhead Books, 2018.
- ROVELLI, Carlo. **Relational Quantum Mechanics**. International Journal of Theoretical Physics, v. 35, n. 8, p. 1637–1678, 1996.
- SARTRE, Jean-Paul. **O Ser e o Nada**. Petrópolis: Vozes, 2023.
- SCHRÖDINGER, Erwin. **Science and Humanism: Physics in Our Time**. Cambridge: Cambridge University Press, 1952.
- TONG, David. **Quantum Field Theory**. Lecture Notes, University of Cambridge, 2017. Disponível em: <https://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/qft.html>.
- WEINBERG, Steven. **The Quantum Theory of Fields. Vol. I: Foundations**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.