UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE EDUCAÇÃO FÍSICA, FISIOTERAPIA E DANÇA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DO MOVIMENTO HUMANO

Lucas Gonçalves Poli

ACOPLAMENTO DE SINAIS FISIOLÓGICOS E CINEMÁTICOS: UMA ANÁLISE DA FADIGA EM CORREDORES A PARTIR DE TEORIAS DA COMPLEXIDADE

Porto Alegre
2026

Lucas Gonçalves Poli

ACOPLAMENTO DE SINAIS FISIOLÓGICOS E CINEMÁTICOS: UMA ANÁLISE DA FADIGA EM CORREDORES A PARTIR DE TEORIAS DA COMPLEXIDADE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Movimento Humano da Escola de Educação Física, Fisioterapia e Dança da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências do Movimento Humano.

Orientador: Prof. Dr. Jerri Luiz Ribeiro

Porto Alegre

2026

CIP - Catalogação na Publicação

Poli, Lucas Gonçalves
Acoplamento de sinais fisiológicos e cinemáticos: uma análise da fadiga em corredores a partir de teorias da complexidade / Lucas Gonçalves Poli. -- 2026.
233 f.
Orientador: Jerri Luiz Ribeiro.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Educação Física, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Movimento Humano, Porto Alegre, BR-RS, 2026.

1. Fisiologia de redes do exercício . 2. Sistemas adaptativos complexos. 3. Dinâmica da coordenação. 4. Dinâmica ecológica. 5. Sinergias. I. Ribeiro, Jerri Luiz, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucas Gonçalves Poli

ACOPLAMENTO DE SINAIS FISIOLÓGICOS E CINEMÁTICOS: UMA ANÁLISE DA FADIGA EM CORREDORES A PARTIR DE TEORIAS DA COMPLEXIDADE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Movimento Humano da ESEFID/UFRGS.

Aprovada em: 27 de agosto de 2026.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Jerri Luiz Ribeiro — UFRGS (Orientador)

_____

Prof. Dr. Daniel Filipe de Jesus Carrilho — ULisboa

_____

Prof. Dr. Giovani dos Santos Cunha — UFRGS

_____

Prof. Dr. João Claudio Braga Pereira Machado — UFAM

A todos que correram comigo, inclusive quando eu não sabia que estava correndo.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Jerri Luiz Ribeiro, pela orientação e pela liberdade de perseguir uma pergunta que não cabia no formato usual da área.

Aos vinte e três corredores que aceitaram correr até a exaustão numa esteira de laboratório sem receber nada em troca além da curiosidade compartilhada. Sem eles não há dados, e sem dados não há dissertação.

Aos colegas do grupo de pesquisa da ESEFID e do grupo Complexidade e Comportamento Humano, pelas horas de coleta e pela leitura crítica.

À Escola de Educação Física, Fisioterapia e Dança da UFRGS e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Movimento Humano, pela estrutura e pelo espaço de formação.

Ao Comitê de Ética em Pesquisa da UFRGS, pelo parecer que tornou este trabalho possível.

Aos meus amigos e a minha família, pelo apoio ao longo dos dois anos, por serem minha plataforma de lançamento e meu porto de atracagem.

"Minha intenção não é substituir um conjunto de regras gerais por outro: minha intenção é, antes, convencer o leitor de que todas as metodologias, mesmo as mais óbvias, têm seus limites."

Paul Karl Feyerabend, Contra o Método, 1975.

"Não se realizam mudanças fundamentais sem uma certa dose de loucura. Nesse caso, ela nasce do inconformismo, da coragem de virar as costas para as velhas fórmulas, da coragem de inventar o futuro."

Thomas Isidore Noël Sankara, entrevista com o jornalista suíço Jean-Philippe Rapp, 1985.

"O poder da vida e da vontade pelo qual os animais movem seus corpos com força grande e duradoura... demonstra que deve haver outras leis de movimento (ainda não descobertas)."

Isaac Newton, Carta a Oldenburg, 1675

RESUMO

POLI, Lucas Gonçalves. Acoplamento de sinais fisiológicos e cinemáticos: uma análise da fadiga em corredores a partir de teorias da complexidade. 2026. 233 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Movimento Humano) — Escola de Educação Física, Fisioterapia e Dança, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2026.

Esta dissertação investiga o acoplamento entre sinais fisiológicos e cinemáticos durante a progressão da fadiga em corrida, a partir da teoria dos sistemas adaptativos complexos, da abordagem ecológica e da dinâmica da coordenação, tradições que compartilham os mesmos compromissos ontológicos e epistemológicos e permitem tratar a fadiga como reorganização do sistema corredor-tarefa, e não como falha de um subsistema isolado. Participaram 21 corredores recreativos válidos, de 23 coletados, num protocolo em esteira com velocidade individualizada por percepção subjetiva de esforço e cinco segmentos, o último até a exaustão. Registraram-se simultaneamente a eletromiografia do tibial anterior e do gastrocnêmio medial, a variabilidade da frequência cardíaca e a oscilação vertical do trocânter maior. A fase de cada sinal foi extraída em banda centrada na frequência da passada do próprio participante em cada segmento, e as razões entre osciladores foram fixadas pela mecânica da corrida: 1:1 entre os músculos e 2:1 entre cinemática e cada músculo. A coerência foi calculada em subjanelas de 90 segundos, e cada estimativa foi confrontada com piso de acaso por deslocamento circular. O termo de quebra de simetria do Modelo HKB Estendido foi estimado pela dinâmica temporal da fase. Os índices cardíacos entraram como descritores de estado, após ausência de acoplamento cardiolocomotor detectável em três formulações independentes. Do aquecimento ao esforço máximo, a coerência entre os dois músculos praticamente se manteve (0,97 para 0,96; d = 0,45), enquanto os pares entre músculo e movimento se degradaram: 0,82 para 0,54 (d = 1,10) e 0,95 para 0,73 (d = 0,86), caindo em 20 de 21 participantes. O termo de quebra de simetria foi estimado separadamente para cada um dos três pares, e cresceu do Aquecimento ao Esforço Máximo em 16 dos 21 participantes no par tibial-gastrocnêmio, em 17 no par cinemática-tibial e em 14 no par cinemática-gastrocnêmio, e a taxa de deriva da fase acelerou por um fator de 2,2. O padrão de ativação do tibial anterior se reorganizou: a razão entre a potência na frequência dobrada da passada e a potência na frequência da passada, que cresce quando o músculo passa a disparar duas vezes por passada, subiu de 0,82 para 1,09 em 19 de 21, e permaneceu estável no gastrocnêmio. O expoente de escala caiu em 16 de 21 e a entropia amostral em 17 de 21; o Ln

rMSSD não se alterou. A projeção multivariada por análise de componentes principais com núcleo (kernel PCA) ordenou os três estados na primeira componente ($\rho = 0{,}87$), com trajetória crescente em 20 dos 21 corredores. A fadiga, neste protocolo, não se expressou como perda uniforme de acoplamento, mas como dissociação seletiva, ou seja, a sinergia entre os músculos se preserva enquanto a conversão dessa atividade em movimento se degrada. A dissertação é apresentada no formato coletânea de seis artigos, que cobrem fundamentação teórica, *pipeline*, acoplamento, análise multivariada, análise univariada e perspectivas.

Palavras-chave: Fisiologia de redes do exercício; Sistemas adaptativos complexos; Dinâmica da coordenação; Dinâmica ecológica; Sinergias.

ABSTRACT

POLI, Lucas Gonçalves. Coupling of physiological and kinematic signals: an analysis of fatigue in runners from complexity theories. 2026. 233 p. Dissertation (Master in Human Movement Sciences) — School of Physical Education, Physiotherapy and Dance, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2026.

This dissertation investigates the coupling between physiological and kinematic signals during progressive fatigue in running, drawing on Complex Adaptive Systems Theory, the ecological approach, and Coordination Dynamics. The three traditions share the same ontological and epistemological commitments, which supports reading fatigue as a reorganization of the runner-task system rather than the failure of a single subsystem. Twenty-one valid recreational runners were analyzed, from 23 recorded, each completing a treadmill protocol whose speed was individualized by rating of perceived exertion, structured in five segments of standardized duration, the last carried to exhaustion. Electromyography of the tibialis anterior and medial gastrocnemius, heart-rate variability, and vertical oscillation of the greater trochanter were recorded simultaneously. Phase was extracted in a band centred on each participant's own stride frequency within each segment, and ratios between oscillators were fixed by the mechanics of running, defining three pairs: 1:1 between the muscles and 2:1 between kinematics and each muscle. Coherence was computed over 90-second subwindows, and every estimate was tested against a circular-shift chance floor. The symmetry-breaking term of the Extended HKB Model was estimated from the temporal dynamics of phase. Cardiac indices, including the short-term scaling exponent and sample entropy, entered as state descriptors, after no cardiolocomotor coupling was detectable in three independent formulations. From warm-up to maximum effort, coherence between the two muscles was largely preserved (0.97 to 0.96; d = 0.45), whereas the muscle-to-movement pairs degraded: 0.82 to 0.54 (d = 1.10) and 0.95 to 0.73 (d = 0.86), falling in 20 of 21 participants. The symmetry-breaking term grew in 16, 17, and 14 of the 21, and the drift rate of relative phase accelerated by a factor of 2.2. The activation pattern of the tibialis anterior reorganized, with the harmonic-to-fundamental power ratio rising from 0.82 to 1.09 in 19 of 21, while remaining stable in the gastrocnemius. The scaling exponent fell in 16 of 21 and sample entropy in 17 of 21; Ln rMSSD did not change. Multivariate projection by a kernel Principle Components Analysis (kernel PCA) ordered the three states along the first component (rho = 0.87), with an increasing trajectory in 20 of the 21 runners. Fatigue, under this protocol, did

not express itself as uniform loss of coupling but as selective dissociation, that is, the synergy between the muscles is preserved while the conversion of that activity into movement degrades. The dissertation is presented as a collection of six scientific articles, covering theoretical grounding, description of the computational pipeline, the main coupling analysis, multivariate analysis, comparative univariate analysis, and a perspectives essay.

Keywords: Network physiology of exercise; Complex adaptive systems; Coordination dynamics; Ecological dynamics; Synergies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Linhagens das ciências da complexidade e as que sustentam esta dissertação. 24
Figura 2 — Espaço de fases, atratores, repulsores e ciclo-limite 25
Figura 3 — Quatro conceitos transversais aos programas da complexidade 28
Figura 4 — Causalidade circular e o princípio de escravização 35
Figura 5 — Mutualidade organismo-ambiente e o acoplamento percepção-ação. 42
Figura 6 — Cadeia causal linear e causalidade circular 48
Figura 7 — Trajetórias individuais e média do grupo 49
Figura 8 — Confluência das três tradições e o núcleo de compromissos compartilhados 51
Figura 9 — Compromissos ontológicos e epistemológicos das duas rotas 53
Figura 10 — O sistema corredor-tarefa e a janela instrumentada 54
Figura 11 — A paisagem de potencial do modelo HKB estendido 56
Figura 12 — O termo de quebra de simetria Δω no potencial estendido 58
Figura 13 — Os três pares de acoplamento e suas razões 60
Figura 14 — Distribuição da fase relativa nos três pares motores 61
Figura 15 — As quatro rotas analíticas e o que cada uma responde 62
Artigo 1, Fig. 1. Construction of the review corpus. The two phases were not strictly sequential: citation tracking in the second phase repeatedly returned to the descriptor axes of the first. 72
Artigo 1, Fig. 2. The HKB potential landscape 75
Artigo 1, Fig. 3. A relative phase exists only at the ratio the mechanics imposes 82
Artigo 1, Fig. 4. The runner-task system and the instrumented window 85
Artigo 2, Figure 1. The runner–task system and the instrumented window 95
Artigo 2, Figure 2. Pipeline architecture 97
Artigo 3, Figure 1. Phase coherence across the five protocol segments (n = 21) 118
Artigo 3, Figure 2. Selective dissociation and its mechanism 119
Artigo 3, Figure 3. The first transition sits below the states that flank it 121
Artigo 3, Figure 4. Where the dissociation sits 123
Artigo 3, Figure 5. Three time scales and how they relate 124
Artigo 3, Figure 6. Magnitude holds while structure and coupling move 128
Artigo 4, Figure 1. Which projection reconstructs better depends on what is being projected 141
Artigo 4, Figure 2. What each component is made of 142
Artigo 4, Figure 3. The coupling axis orders the three states without any intensity variable in the matrix 143
Artigo 4, Figure 4. The same nine variables, projected twice 149

Artigo 4, Figure 5. How much of each variable is trajectory and how much is identity 150
Artigo 4, Figure 6. The group pattern is a property of individuals 151
Artigo 5, Figure 1. Within the cardiac family, magnitude holds while structure moves 163
Artigo 5, Figure 2. The redundancy is asymmetric 165
Artigo 5, Figure 3. Corrected beat-to-beat intervals for one participant, centered on the mean of each window 167
Artigo 5, Figure 4. Spearman correlations among all variables after within-participant normalization, grouped by family 168
Artigo 5, Figure 5. How much of each variable is state and how much is identity, over the 21 runners 172
Artigo 6, Figure 1. Power spectra of the three signal types for one participant during the moderate steady state, each normalized to its own maximum and plotted on a logarithmic frequency axis 181
Artigo 6, Figure 2. Frequency ratios estimated independently for each of the 183 participant-by-segment combinations by locating the dominant spectral peak of each signal and reducing the ratio to a small integer fraction. 183
Artigo 6, Figure 3. What the missing intercept does 184
Artigo 6, Figure 4. Four questions to put to any phase-coupling estimate in exercise science 188
Figura 16 — A fadiga não afrouxa o acoplamento de modo uniforme 194
Figura 17 — As quatro famílias de medida e a assimetria da redundância 196

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 — Mapa de artigos da coletânea: tipos, periódicos-alvo, base de dados e idioma 65

Artigo 1, Table 1. The three dominant families of fatigue explanation in exercise physiology 79

Artigo 1, Table 2. Traditional exercise physiology and network physiology of exercise compared 80

Artigo 2, Table 1. Characteristics of the 21 analyzed runners 96

Artigo 3, Table 1. Characteristics of the 21 analyzed runners and manipulation checks 113

Artigo 3, Table 2. Phase coherence by pair and segment 119

Artigo 3, Table 3. Potential parameters a and b by pair and stable state 120

Artigo 4, Table 1. Mean squared reconstruction error in the input space against the number of retained components, for the linear and kernel projections 141

Artigo 4, Table 2. Pairwise contrasts between the three stable states along the first component 143

Artigo 5, Table 1. The 21 analyzed runners, together with the subjective instruments applied before and after the session 161

Artigo 5, Table 2. Every variable ranked by how strongly it separates the three stable states, with its family and the Friedman p value. 164

Artigo 5, Table 3. Relation between each isolated marker and the collective coupling dimension, both normalized within participant 165

Artigo 6, Table 1. The five claims of the first analysis beside what the corrected analysis supports 186

Tabela 2 — Prestação de contas dos objetivos específicos 197

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT — Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA — Análise de Variância

CEP — Comitê de Ética em Pesquisa

DFA — Análise de flutuações destendenciadas (*Detrended Fluctuation Analysi*s)

EMG — Eletromiografia de superfície

ESEFID — Escola de Educação Física, Fisioterapia e Dança

FC — Frequência cardíaca

GM — Músculo Gastrocnêmio Medial

HKB — Modelo Haken-Kelso-Bunz

KPCA — Análise de componentes principais com kernel (não linear)

WLS — Mínimos Quadrados Ponderados (*Weighted Least Squares*)

PPGCMH — Programa de Pós-Graduação em Ciências do Movimento Humano

PSE — Percepção Subjetiva de Esforço (Escala Borg)

RBF — Função de base radial (kernel)

RMSSD — Raiz quadrada da média dos quadrados das diferenças dos intervalos RR

SAC — Sistema Adaptativo Complexo

SDNN — Desvio padrão dos intervalos RR normais

TA — Músculo Tibial Anterior

TSD — Teoria dos Sistemas Dinâmicos

TCLE — Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

UFRGS — Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VFC — Variabilidade da frequência cardíaca

V(φ) — Potencial de Haken-Kelso-Bunz: $V(\varphi) = -a\cdot\cos(\varphi) - b\cdot\cos(2\varphi)$

LAPEX — Laboratório de Pesquisa do Exercício

EVA — Escala visual analógica

CSAI-2 — *Competitive State Anxiety Inventory*-2

POMS — Perfil de Estados de Humor (*Profile of Mood States*)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL 21

1.1 Contextualização e Problema de Pesquisa 21

1.2 O Programa Reducionista e sua Construção Histórica 21

1.3 Teorias da Complexidade e Teoria dos Sistemas Dinâmicos 23

1.3.1 A Herança Matemática: Poincaré, o Espaço de Fases e a Não Linearidade 24

1.3.2 A Termodinâmica do Não-Equilíbrio e as Estruturas Dissipativas 26

1.3.3 A Teoria Geral dos Sistemas 27

1.3.4 Conceitos que Atravessam os Campos 28

1.3.5 Fractalidade e Invariância de Escala 30

1.4 Sistemas Adaptativos Complexos 31

1.5 Sinergética e Dinâmica da Coordenação 34

1.5.1 Sinergética 34

1.5.2 Dinâmica da Coordenação 36

1.6 Psicologia Ecológica e Dinâmica Ecológica 38

1.6.1 Dinâmica Ecológica 42

1.7 Fisiologia de Redes e Fisiologia de Redes do Exercício 45

1.8 Compromissos Ontológicos e Epistemológicos Compartilhados 47

1.9 O Modelo Haken-Kelso-Bunz e o Formalismo da Fase Relativa 55

1.9.1 As Quatro Rotas Analíticas e a Divisão de Trabalho entre Elas 61

1.10 Questão Norteadora, Objetivos e Hipóteses 62

1.11 Estrutura da Dissertação 64

ARTIGO 1 67

ABSTRACT 69

INTRODUCTION 70

METHOD 71

COMPLEX ADAPTIVE SYSTEMS AND THE REORGANIZATION OF HUMAN MOVEMENT 72

THE HAKEN–KELSO–BUNZ MODEL: FROM BIMANUAL COORDINATION TO EXTENDED APPLICATIONS 74

FATIGUE RECONSIDERED: FROM CATASTROPHE AND CENTRAL GOVERNANCE TO COORDINATIVE REORGANIZATION 77

The Catastrophic Model and the Central-Governor Model 77

The Psychobiological Model and Mental Fatigue 78

From a Fragmented to a Relational Reading 79

OBSERVING THE SYSTEM: THE CONDITION ON PAIRING, A WORKED EXAMPLE, AND FIVE PROTOCOL SEGMENTS 81

DISCUSSION 85
CONCLUSION 86
REFERENCES 87
ARTIGO 2 91
1. Introduction 92
2. Materials and Methods 93
2.1. Experimental Protocol and Participants 93
2.2. Pipeline Architecture 96
2.3. Electromyography: Acquisition and Processing 98
2.4. Heart-Rate Variability: Acquisition and Processing 99
2.5. Kinematics: Acquisition and Optical Tracking 100
2.6. Extended HKB Parameter Estimation 101
2.7. Technical Exclusion Criteria 103
3. Results 103
3.1. End-to-End Execution (H1) 103
3.2. Physiological Plausibility of Pilot Metrics (H2) 103
3.3. Predictability of Technical Failures (H3) 104
3.4. Extension to Additional Participants 104
4. Discussion 105
5. Conclusions 106
Funding 106
Institutional Review Board Statement 106
Conflicts of Interest 106
References 106
ARTIGO 3 109
Abstract 110
1 Introduction 110
2 Materials and Methods 113
2.1 Participants 113
2.2 Protocol and Signal Acquisition 114
2.3 Pairing, Band, Window and Coupling Estimation 115
2.4 Physiological and Kinematic Indices 116
2.5 Statistical Analysis 117
3 Results 117
3.1 Descriptive Response Across Segments 117
3.2 Coupling Dissociates Rather Than Declining Uniformly 118
3.3 Growing Symmetry Breaking Accompanies the Decline in Coherence 119

3.4 The First Transition as a Window of Instability 120
3.5 Multivariate View and Sensitivity 121
4 Discussion 121
4.1 What Holds and What Gives Way 121
4.2 Detuning as the Mechanism 123
4.3 A Change of Activation Mode Accompanies the Preserved Synergy 124
4.4 Transitions as Objects of Analysis 125
4.5 The Absent Cardiolocomotor Coupling Is a Result 126
4.6 What the Estimates Can and Cannot Support 127
4.7 What Follows for Practice and for the Wider Programme 127
4.8 Limitations and Directions 129
5 Conclusion 130
Funding 130
References 130
ARTIGO 4 134
Abstract 135
1 Introduction 135
1.1 Theme, Question, and Rationale 137
1.2 Objectives and Hypotheses 137
2 Materials and Methods 138
2.1 Participants and Protocol 138
2.2 Variables and Observation Matrix 139
2.3 Kernel Principal Component Analysis (kernel PCA) 140
2.4 Separability, Trajectories, and Statistics 140
3 Results 140
3.1 Whether the Nonlinear Projection Helps Depends on What Is Projected 141
3.2 Two Nearly Orthogonal Axes: Coupling and Cardiac Structure 142
3.3 The States Order Along the First Component, and the Ordering Holds Out of Sample 143
3.4 Individual Trajectories Carry the Group Pattern 144
4 Discussion 144
4.1 Concentration Rather Than Compression 144
4.2 A Coupling Dimension That Is Not the Protocol in Disguise 145
4.3 What the Pairwise and the Multivariate Analyses Each Establish 147
4.4 The Cardiac Descriptors Occupy a Dimension of Their Own 147
4.5 What Normalizing Within the Individual Changed, and Why 148
4.6 A Methodological Result About Kernel Methods in This Setting 151

4.7 Limitations and Directions 152
5 Conclusion 152
Funding 153
References 153
ARTIGO 5 156
Abstract 157
1 Introduction 157
1.1 Theme, Question, and Rationale 158
1.2 Objectives and Hypotheses 159
2 Materials and Methods 159
2.1 Participants, Protocol, and Signals 159
2.2 Isolated Markers 161
2.3 The Coupling Dimension 162
2.4 Statistical Analysis 162
3 Results 162
3.1 The Cardiac Family Splits Along Magnitude and Structure 162
3.2 How Strongly Each Marker Separates the Three States 163
3.3 A Claim from the Earlier Version That Does Not Survive 164
3.4 The Redundancy Is Substantial and Asymmetric 164
3.5 The Subjective Markers Are Independent of Both 166
4 Discussion 166
4.1 The Index Most Used Is the One That Did Not Move 166
4.2 The Values Land Where an Independent Literature Says They Should 167
4.3 Structure Is Not a Second Kind of Magnitude 168
4.4 A Refuted Argument and What Replaces It 169
4.5 What the Asymmetry Licenses and What It Does Not 169
4.6 What a Combined Monitoring Set Would Look Like 170
4.7 What a Partly Negative Answer Is Worth 170
4.8 Individual Measurement and the Limits of Pooling 171
4.9 Limitations 173
5 Conclusion 173
Funding 174
References 174
ARTIGO 6 177
Abstract 178
1 Introduction 178
1.1 Theme, Guiding Question, and Rationale 179

1.2 Objective and Theses 179
2 Materials and Methods 180
2.1 Participants, Protocol and Signals 180
2.2 The First Pipeline and the Claims It Produced 180
3 Failure Mode One: A Band That Does Not Contain the Rhythm 180
4 Failure Mode Two: A Ratio Read From the Spectrum Rather Than From the Mechanics 182
5 Failure Mode Three: A Fit Whose Free Parameter Was Not Free 183
6 Failure Mode Four: Comparing Windows of Unequal Length 185
7 What the Audit Left Standing 186
8 Recommended Checks 187
9 Limitations of This Audit 189
10 A Research Agenda 189
11 Conclusion 190
Funding 191
References 191
2 CONSIDERAÇÕES FINAIS INTEGRADORAS 193
2.1 Síntese dos Achados 193
2.2 Prestação de Contas dos Objetivos 197
2.3 O Que o Reexame Metodológico Alterou 198
2.4 Limitações do Estudo 199
2.5 Perspectivas Futuras 201
2.6 Conclusões Gerais: a Fadiga como Fenômeno de Acoplamento entre Escalas 202
REFERÊNCIAS GERAIS 204
APÊNDICE A — TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TCLE) 212
APÊNDICE B — INSTRUMENTOS PSICOMÉTRICOS UTILIZADOS 213
APÊNDICE C — DOCUMENTAÇÃO DO PIPELINE COMPUTACIONAL 214
APÊNDICE D — CARACTERIZAÇÃO DOS PARTICIPANTES 215
ANEXO A — PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP/UFRGS 216
ANEXO B — TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO 224
ANEXO C — ESCALA VISUAL ANALÓGICA DE DOR (EVA-100 mm) 228
ANEXO D — PERFIL DE ESTADOS DE HUMOR (POMS) 230
ANEXO E — INVENTÁRIO DE ANSIEDADE ESTADO COMPETITIVA (CSAI-2) 231
ANEXO F — ESCALA DE PERCEPÇÃO SUBJETIVA DE ESFORÇO DE BORG (6–20) 233

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Contextualização e Problema de Pesquisa

A fadiga induzida pelo exercício progressivo em corredores representa um dos fenômenos mais estudados nas ciências do esporte, porém sua compreensão ainda é predominantemente ancorada em perspectivas reducionistas que, por exemplo, isolam variáveis fisiológicas ou biomecânicas e as analisam separadamente. No entanto, este tipo de abordagem negligencia a natureza fundamentalmente sistêmica e interdependente dos processos que sustentam a corrida humana (Kelso, 1995; Davids; Glazier, 2010).

Em contrapartida, a corrida também pode ser entendida a partir do quadro teórico dos sistemas adaptativos complexos, no qual o corredor e a tarefa que ele executa formam uma unidade, no qual subsistemas como o autonômico, neuromuscular e locomotor operam acoplados em tempo real, ajustando-se mutuamente às demandas crescentes do esforço e à informação disponível né quanto em curso da ação. A fadiga, nessa perspectiva, deixa de ser um simples declínio de desempenho e passa a ser uma reorganização dos padrões de coordenação desse sistema como um todo, isto é, ela representa uma transição de fase no seu espaço de estados (Kelso, 1995; Haken; Kelso; Bunz, 1985). Convém marcar desde já a distinção que percorre toda a dissertação, em que a reorganização é atribuída ao sistema corredor-tarefa, ao passo que os três subsistemas nomeados acima constituem a porção desse sistema que um protocolo em esteira pode instrumentar. Eles são a janela de observação, e não o inventário do fenômeno.

Apesar do arcabouço teórico disponível, poucos estudos investigaram empiricamente o acoplamento entre sinais de múltiplas modalidades (eletrofisiológica, autonômica e cinemática) durante a fadiga progressiva em corrida, utilizando modelos formais da Dinâmica da Coordenação. Esta dissertação preenche essa lacuna ao propor um *pipeline* integrado de análise multimodal que reúne quatro rotas analíticas complementares, descritas na seção 1.9.1. A fase relativa entre pares de sinais, a projeção multivariada dos estados de esforço, os índices estruturais da série de batimentos e os marcadores subjetivos de esforço. Para o quadro adotado na presente dissertação, nenhuma delas tem primazia sobre as demais, na medida em que o resultado central de cada artigo empírico depende de a pergunta ter sido dirigida à rota capaz de respondê-la.

1.2 O Programa Reducionista e sua Construção Histórica

A escolha de descrever a fadiga pelo acoplamento entre subsistemas, e não pelo estado de cada um deles, não é uma preferência de método, pois decorre de uma disputa antiga sobre o que conta como explicação de um fenômeno biológico. Recuperar essa disputa é um esforço necessário, pois a perspectiva clássica tradicionalmente empregada costuma ser apresentada como se fosse a única alternativa possível de se fazer ciência. No entanto, sob análise crítica, a formulação canônica do programa é cartesiana, em que a segunda das quatro regras de tal método recorre a divisão de cada uma das dificuldades examinadas em tantas parcelas quantas forem possíveis e necessárias, para então melhor resolvê-las. Já a terceira regra institui conduzir a abordagem de maneira ordenada, se iniciando pelos objetos mais simples e mais fáceis de conhecer, e então subir de pouco a pouco em direção ao conhecimento dos mais compostos (Descartes, 1637; Cottingham; Stoothoff; Murdoch, 1985). No entanto, é exatamente esta subida de regressão ao todo que é o ponto frágil. O método cartesiano garante a descida, isto é, sempre se pode partir um problema em pedaços menores, mas não garante que a soma das soluções parciais reconstitua a solução do todo, ou seja, essa garantia é uma suposição, e que raramente é enunciada.

Por outro lado, a mecânica newtoniana deu à tal suposição o seu caso exemplar e a sua legitimidade, ao formular que um sistema de corpos cujas posições e velocidades iniciais sejam conhecidas, apresenta uma trajetória futura determinada pelas forças que agem sobre eles, ao passo de que as forças se somam vetorialmente e a descrição do conjunto é obtida pela composição das descrições individuais. O tempo é reversível, o comportamento é proporcional à causa e a predição não tem limite de princípio, apenas de precisão. No entanto, ao campo dos corpos vivos, convém registrar que o próprio Newton reconheceu o limite de seu arranjo ao admitir que o "automovimento" (movimento intencionado) estava além do entendimento disponível (Kelso, 2013). Essa mesma dificuldade reapareceu posteriormente como o problema técnico dos três corpos, cujas interações locais produzem efeitos não lineares, os tornando sistemas simples, mas insolúveis por via analítica (Lansing, 2003).

O positivismo consolidou o arranjo Newtoniano como norma de cientificidade, e que assim como evidenciado pela Hierarquia Comteana das ciências, que ordena os campos da matemática à sociologia segundo a generalidade e a simplicidade dos seus objetos, estabelece que o conhecimento legítimo é o das leis que ligam fenômenos observáveis e que as ciências mais complexas devem ser fundadas sobre as mais simples. Essa ordem transforma a decomposição em critério de rigor e explicar passa a significar exibir o mecanismo elementar, e o que não se deixa reduzir a um mecanismo elementar passa a ser tratado como resíduo, ruído ou provisoriedade da técnica. Ainda assim, aplicado à biologia, o programa positivista

clássico produziu a fisiologia de órgãos, a bioquímica metabólica e, mais recentemente, as ciências ômicas, e sua produtividade é inegável e nenhuma parte desta dissertação as contesta (Balagué et al., 2022). O que se contesta, no entanto, é a suposição que o acompanha, a de que o comportamento do todo seja recuperável a partir da lista das suas partes.

A física do século XX abalou o quadro tradicional de se fazer ciência em seus próprios termos, ao mostrar que a matéria não se comporta como massa dura regida pela gravidade e pela mecânica newtoniana, mas que assim como na escala subatômica, o que determina o comportamento de uma partícula é a sua relação com as demais (Holden, 2005). Ao campo da biologia, Balagué e colaboradores (2022) descrevem a estratégia tradicional do campo da fisiologia como a decomposição de um sistema responsável por um fenômeno, em partes componentes, com a atribuição do todo ao comportamento dessas partes. Os autores também observam que, em um século de pesquisa sobre a etiologia da fadiga, se produziu conhecimento abundante sobre componentes isolados, sem responder a perguntas centrais, entre elas: quais são os limites do desempenho? por que o exercício termina quando termina? (Balagué et al., 2022; Noakes, 2012). Sendo assim, para a presente dissertação o contraste com o que se segue não é entre uma ciência velha e uma nova, mas entre duas respostas à pergunta sobre onde reside a organização de um sistema vivo.

1.3 Teorias da Complexidade e Teoria dos Sistemas Dinâmicos

As teorias da complexidade não formam um campo unificado que depois se ramificou, elas representam um conjunto de programas que apareceram em lugares distintos, em décadas distintas, respondendo a perguntas distintas, e que só em parte se encontraram. Haken e Portugali (2021) situam a emergência dos primeiros conjuntos da “complexidade moderna” nos anos 1960, referindo-se a sistemas abertos e complexos que exibem auto-organização, caos e fenômenos correlatos, e registram que, com a exceção da teoria da autopoiese de Maturana e Varela (1980), as teorias fundadoras foram desenvolvidas primeiro nas ciências materiais, em estreita ligação com a termodinâmica e com referência a fenômenos como a dinâmica de fluidos e o laser. O mapa das ciências da complexidade organizado por Castellani e Gerrits (2021) dá a medida dessa dispersão, ao dispor mais de cinquenta programas em cinco grandes correntes que se estendem da cibernética dos anos quarenta à ciência de redes e à modelagem baseada em agentes, com filiações que se cruzam sem hierarquia. A Figura 1 traz um breve recorte deste mapa, a partir das linhagens que se alinham ao tema desta dissertação.

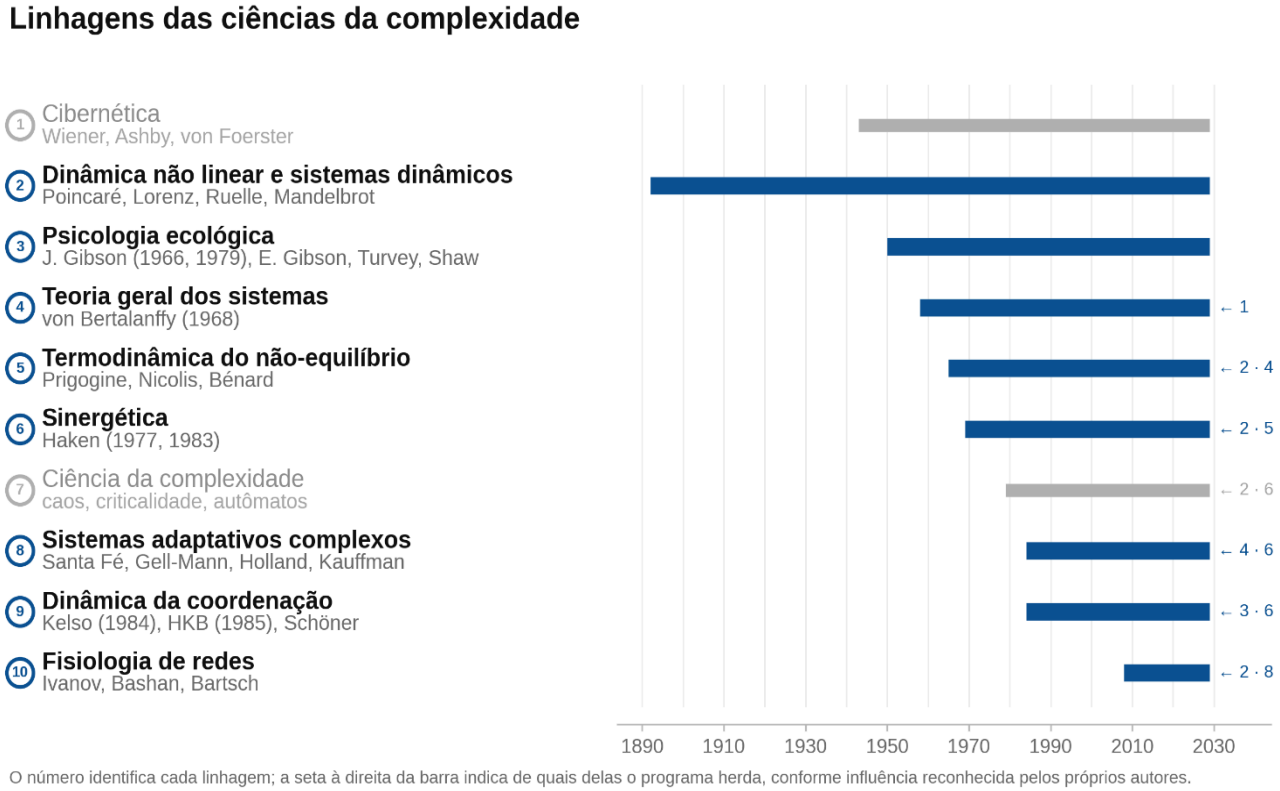


Figura 1 — Linhagens das ciências da complexidade e as que sustentam esta dissertação. O recorte segue a organização do mapa das ciências da complexidade, do qual se retêm as correntes com filiação direta ao problema aqui tratado. As faixas em destaque correspondem aos cinco programas mobilizados no texto. Fonte: elaborado pelo autor com base em Castellani e Gerrits (2021) e Haken e Portugali (2021).

1.3.1 A Herança Matemática: Poincaré, o Espaço de Fases e a Não Linearidade

O ferramental que a complexidade herda é matemático, e sua origem está no problema dos três corpos. Ao investigar a estabilidade do sistema solar no fim do século XIX, Henri Poincaré demonstrou que um sistema regido por equações inteiramente determinísticas pode ter soluções que não admitem forma fechada e cuja evolução é sensível às condições iniciais (Poincaré, 1892; Holmes, 1990). Por consequência, o determinismo físico deixa de implicar previsibilidade, e a maneira de estudar o comportamento de um sistema deixa de passar pela solução analítica de equações e passa a ser uma descrição geométrica.

Essa descrição geométrica exige a delimitação do espaço de estados, também chamado espaço de fases, em que cada variável necessária para especificar o estado instantâneo do sistema corresponde a um eixo, cada estado possível corresponde a um ponto, e a evolução no tempo corresponde a uma trajetória. O que a análise busca não é o valor de uma variável num instante, e sim o desenho do escoamento no espaço inteiro, isto é, para onde as trajetórias convergem, de onde divergem e o que separa umas das outras. As regiões das quais as trajetórias se afastam são chamadas repulsores e aquelas para as quais convergem são

chamadas atratores, ao passo que a fronteira entre bacias de atração distintas separa destinos qualitativamente diferentes. Contudo, também convém pontuar uma ressalva importante sobre os conceitos de atratores e suas relação ao movimento humano como emergente em um sistema complexo.

Especificamente em referência ao atrator pontual, pois ao descrever um sistema que repousa, não compreende o comportamento vivo em sua plena natureza e não-repouso. Em contrapartida, o que se observa em tarefas motoras é a estabilidade dinâmica, isto é, permanência funcional obtida por variação contínua, e não rigidez previsível em torno de um ponto. Ainda assim, o vocabulário geométrico permanece necessário, porque é ele que permite dizer o que a metaestabilidade não é, mas a descrição adequada ao movimento humano é a de um escoamento com regiões de permanência transitória, desenvolvida na seção 1.9. Uma classe de atratores interessa em especial ao estudo do movimento rítmico, o ciclo-limite, que é uma órbita fechada e isolada para a qual as trajetórias convergem independentemente das condições iniciais. O teorema de Poincaré e Bendixson estabelece a condição sob a qual ele deve existir, em que uma trajetória confinada a uma região fechada e limitada que não contenha pontos fixos necessariamente se aproxima de uma órbita fechada (Huys; Perdikis; Jirsa, 2014). A Figura 2 apresenta esses objetos.

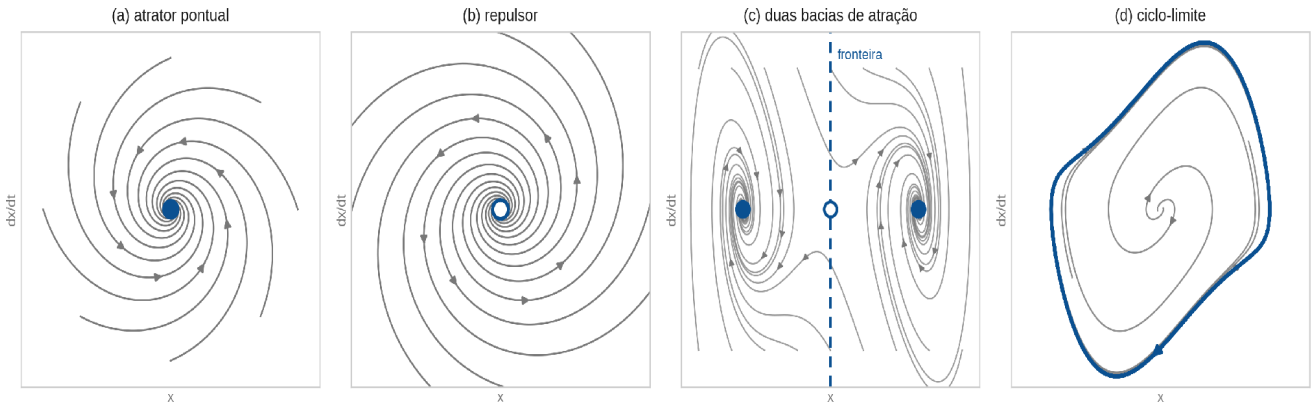


Figura 2 — Espaço de fases, atratores, repulsores e ciclo-limite. Em (a), um atrator pontual, para o qual as trajetórias vizinhas convergem. Em (b), um repulsor, do qual elas se afastam. Em (c), duas bacias de atração separadas por uma fronteira, com destinos qualitativamente distintos para condições iniciais próximas. Em (d), um ciclo-limite, órbita fechada e isolada para a qual as trajetórias convergem qualquer que seja o ponto de partida. Fonte: elaborado pelo autor com base em Huys, Perdikis e Jirsa (2014) e Kelso (2013).

A relevância biológica do ciclo-limite não é apenas formal, na medida em que os osciladores de ciclo-limite compensam as perdas dissipativas que ocorrem em todo o padrão de movimento, o que é a condição para que um ritmo se sustente sem que uma fonte externa o reponha a cada ciclo, e por isso são autossustentados, independentes das condições iniciais e

temporalmente estáveis (Kelso, 2022). A não linearidade, nesse caso, não está na órbita, que é fechada e regular, e sim na equação que a gera e no modo como dois desses osciladores se influenciam, especificamente, um acoplamento não linear faz com que a influência de um sobre o outro dependa da própria diferença de fase entre eles, e é dessa dependência que nascem modos coordenativos discretos e transições abruptas entre eles quando um parâmetro é variado de forma contínua (Zhang et al., 2019). Quando dois osciladores acoplados passam a compartilhar um mesmo ritmo, com suas frequências ajustadas mutuamente até guardarem uma razão fixa, se diz haver *entrainment*, (arrastamento ou sincronização por ajuste mútuo). Nos sistemas vivos esse acoplamento se dá por troca de informação e não por transmissão de forças mecânicas, e osciladores de ciclo-limite frouxamente acoplados aparecem em todas as escalas do organismo, de moléculas a segmentos corporais inteiros (Kelso, 2021).

A não linearidade é o que separa o quadro que analisa o movimento humano a partir de um espaço de fase, do anterior entendimento em um plano cartesiano, em que ao representar um sistema linear, tem efeitos proporcionais às causas, assim como as contribuições entre as partes se somam, de modo que conhecer seus comportamentos individuais já se é o suficiente. Num sistema não linear, no entanto, uma variação pequena de um parâmetro pode não produzir efeito algum durante um intervalo longo e depois, de uma hora para outra, produzir uma mudança qualitativa abrupta, carregando assim a implicação de que o comportamento do conjunto não é a soma dos comportamentos de suas partes. O ponto em que a mudança qualitativa ocorre é chamado de bifurcação, sendo uma transição descritiva da natureza do sistema, em razão do desaparecimento, surgimento ou mesmo a troca de estabilidade (trajetória) dos atratores. Foi essa combinação, de determinismo sem previsibilidade e de descrição geométrica em vez de fórmula, que tornou possível descrever formalmente o que a teoria geral dos sistemas só havia conseguido nomear.

1.3.2 A Termodinâmica do Não-Equilíbrio e as Estruturas Dissipativas

A segunda lei da termodinâmica estabelece que sistemas isolados evoluem para a desordem, e por décadas essa foi tomada como a descrição completa do funcionamento dos processos naturais. Ilya Prigogine, físico belga laureado com o Nobel de Química em 1977, mostrou que a descrição não vale para todos os sistemas, e que alguns tendem à ordem e não à desordem, constituindo uma das descobertas centrais para as ciências da complexidade (Holden, 2005). Prigogine partiu do trabalho de Henri Bénard, que observara que o aquecimento de uma camada fina de líquido produz a organização de estruturas novas, e

evidenciou que um sistema físico ou químico afastado do equilíbrio pode sobreviver e prosperar, ao passo que, mantido no equilíbrio, morre (Nicolis; Prigogine, 1977; Chan, 2001).

Prigogine nomeou estas configurações como estrutura dissipativa (Prigogine; Stengers, 1984), em que nelas a ordem não se conserva independentemente do fluxo de energia, mas ela existe em função do fluxo e desaparece quando o mesmo cessa. Um sistema desse tipo não é ordenado por ter atingido um estado de mínima energia, e sim por se manter longe do equilíbrio, em uma organização que consome continuamente aquilo que a sustenta. Morel e Ramanujam (1999) formulam a condição do ponto de vista da física, em que a auto-organização exige se situar fora do equilíbrio, assim como também exige a possibilidade dinâmica de emergirem novas unidades estáveis a partir da interação de componentes. Em pontos de bifurcação (ou também chamados de transição de fase), o sistema salta para um novo estado de organização, que é o que caracteriza, propriamente, a estrutura dissipativa (Holden, 2005). Posteriormente, através de novas evidências da literatura, alguns autores notaram uma consequência de tal concepção de sistemas vivos compreendidos dentro deste quadro, sendo decisiva para um melhor entendimento frente ao fenômeno do movimento humano, a consequência em questão e a de que nenhum projetista externo e nenhuma manipulação vinda de fonte centralizada de controle orgânico é capaz de dirigir a translação dos comportamentos a novos padrões (Morel; Ramanujam, 1999).

1.3.3 A Teoria Geral dos Sistemas

A objeção sistemática ao arranjo cartesiano dentro da própria biologia foi formulada por Ludwig von Bertalanffy, que propôs analisar um sistema como um todo, composto de subcomponentes que interagem sob constrangimentos e com condições de contorno próprias, o que o distingue de qualquer outro sistema (Von Bertalanffy, 1968; Hicks et al., 2026). A conexão com a termodinâmica do não-equilíbrio é direta, e é o que dá conteúdo físico à proposta. A tese central é que sistemas de naturezas muito diferentes (um ser humano, uma economia e um ecossistema, por exemplo), exibem propriedades formais em comum pelo simples fato de serem sistemas abertos com muitos componentes em interação, propriedades essas que não pertencem a nenhum componente em particular. Um sistema aberto troca matéria e energia com o entorno, e por isso pode manter uma organização estável sem estar em equilíbrio, estado para o qual Bertalanffy cunhou a expressão equilíbrio de fluxo, que inclui alta coordenação de atividades entre as partes (Haken; Portugali, 2021).

A generalidade da formulação é o seu diferencial, e não um defeito a ser corrigido, na medida em que Bertalanffy propôs uma orientação para o modo de recortar o objeto de

análise, aplicável a domínios que não compartilham mecanismo algum, e essa amplitude foi deliberada. No entanto, que a orientação da teoria geral dos sistemas não trazia, e não pretendia trazer, era um aparato matemático capaz de gerar predições verificáveis num domínio específico, o que explica por que sua influência foi mais conceitual que operacional durante décadas. O aparato veio de outros lugares, pelos caminhos descritos anteriormente e pelos que se seguem na presente dissertação, e o encontro entre a orientação e o formalismo é justamente o que torna possível o programa da mesma. A ênfase deslocada do repertório de partes para o padrão de relações é a contribuição duradoura da proposta, e é dela que parte a geração seguinte de conceituação e modelagem dos sistemas vivos (Holden, 2005).

1.3.4 Conceitos que Atravessam os Campos

Alguns conceitos que aparecem em todos os programas tratados adiante na dissertação, permeiam em certa instância também, todos aqueles tratados até então, mas com ênfases distintas a cada contexto. São eles a auto-organização, a emergência, a degenerescência e a pleiotropia, disposto ao longo da Figura 3.

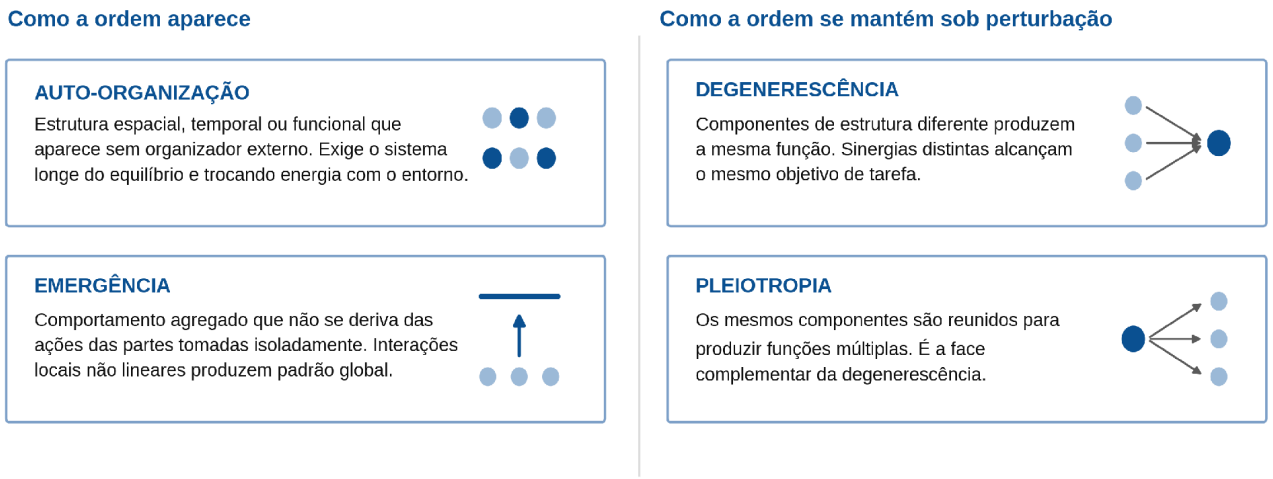


Figura 3 — Quatro conceitos transversais aos programas da complexidade. A auto-organização e a emergência dizem respeito a como a ordem aparece, e a degenerescência e a pleiotropia, a como ela se mantém sob perturbação. Os quatro reaparecem nas seções seguintes com formulações próprias de cada campo. Fonte: elaborado pelo autor com base em Holden (2005), Lansing (2003), Edelman e Gally (2001) e Balagué et al. (2020).

A auto-organização designa o aparecimento de estrutura espacial, temporal ou funcional sem organizador externo, sendo uma propriedade inerente dos chamados Sistemas Adaptativos Complexos (SACs), fisicamente condicionados a de operar longe do equilíbrio, com possibilidade dinâmica de formar unidades estáveis novas pela agregação funcionalmente interativa entre componentes (Chan, 2001; Morel; Ramanujam, 1999).

Kauffman mostrou por simulação que a ordem de novas configurações pode emergir da desordem em processos auto-organizados, e usou o resultado para perguntar se a seleção natural darwiniana responde sozinha pelos padrões de ordem observados no mundo vivo, concluindo que o alcance da ordem espontânea é muito maior do que se supunha até então (Chan, 2001; Lansing, 2003).

A emergência designa que o comportamento do todo macroscópico não deriva diretamente das ações de suas partes microscópicas tomadas isoladamente, podendo ser entendida a partir de Lansing (2003), que descreve que em um sistema suficientemente complexo pode ser impraticável, ou mesmo impossível, conhecer o detalhe de cada interação local, na medida em que essas interações locais produzem efeitos não lineares, tornando um sistema indissolúvel. Sendo assim, é ao deslocar a atenção das forças causais sobre elementos individuais, para o comportamento do sistema como um todo, que se revelam padrões globais. Holland (1992) acrescenta que é justamente esse comportamento global que se quer entender e modificar ao se assumir uma posição complexa da biologia, mas que para isso é preciso compreender como ele emerge das interações entre as partes.

A degenerescência é a capacidade de componentes estruturalmente distintos produzirem a mesma função ou o mesmo resultado de desempenho, sendo ubíqua nos seres vivos e observável em múltiplos níveis de descrição, do genético ao social (Edelman; Gally, 2001; Seifert; Davids, 2017; Kelso, 2022). Consequentemente, em um sistema com muitos componentes, encontrar a configuração ótima é um problema computacionalmente intratável, e a biologia não enfrenta esse problema porque sinais de erro vindos de uma parte da sinergia são rapidamente compensados por outras (Kelso, 2013). Assim, a variabilidade observada no espaço de estados de alta dimensão dos sinais neurocomportamentais decorre da degenerescência, propriedade fundamental dos sistemas biológicos complexos e que potencializa a flexibilidade e robustez do organismo (Kelso, 2022).

A pleiotropia, ou multifuncionalidade, é a face complementar da degenerescência, caracterizando a propriedade dos mesmos componentes do sistema serem reunidos para produzir funções múltiplas (Balagué et al., 2020). O termo tem origem no campo de pesquisas em genética, onde designa o fato de um mesmo gene afetar mais de um traço, e o mesmo efeito em nível microscópico pode ser produzido por muitos fenômenos macroscópicos distintos (Balagué et al., 2022). Tomadas juntas, degenerescência e pleiotropia permitem com que um SAC alterne entre estados coordenativos diversos, e é essa alternância que constitui a estabilidade de um sistema vivo, não a preservação de um arranjo único e universal (Ivanov, 2021).

1.3.5 Fractalidade e Invariância de Escala

Sistemas fisiológicos não exibem uma escala característica única, e a estrutura das suas flutuações se repete quando a janela de observação é ampliada ou reduzida. O vocabulário capaz de descrever esse tipo de organização vem da geometria fractal, formulada por Benoit Mandelbrot em 1975 a partir do latim *fractus*, do verbo *frangere*, e que significa algo como quebrar. Assis e colaboradores (2008) definem um fractal como o objeto que apresenta invariância de forma à medida que a escala sob a qual é analisado se altera, mantendo sua estrutura apesar de tal variação.

Como propriedades que definem estes tipos de objetos se destaca a autossemelhança, identificada quando uma porção de uma figura ou de um contorno pode ser vista como réplica do todo em escalas menores. Assim como a complexidade infinita, que decorre do fato de o processo gerador ser recursivo, de modo que sucessivas ampliações levam indefinidamente a mais detalhe. A terceira é a dimensão, que um fractal não é necessariamente um número inteiro, e sim uma quantidade fracionária que representa o grau de ocupação da estrutura no espaço que a contém (Assis et al., 2008). Quando a variação de escala não é isotrópica, isto é, quando as proporções não se conservam igualmente em todas as direções, as estruturas são ditas como sendo autoafins, e é exatamente esse o caso das séries temporais fisiológicas, na medida em que o eixo do tempo e o eixo da amplitude não escalam do mesmo modo.

Estudos da literatura conceituaram a forma em que sistemas fisiológicos sob regulação neural exibem comportamento não estacionário, intermitente, invariante de escala e não linear, e sua dinâmica de saída muda transitoriamente conforme o estado fisiológico e as possíveis condições patológicas, em resposta a alterações nos mecanismos de controle subjacentes (Ivanov, 2021; Bartsch et al., 2015). Já outras investigações que examinaram a fisiologia básica pelo prisma da dinâmica de sistemas revelaram características invariantes de escala e universais entre sujeitos, abrangendo uma faixa larga de escalas temporais, o que indica a presença de mecanismos multiescala da regulação biológica (Ivanov, 2021). Nessa perspectiva, Balagué e colaboradores (2020) incluem a invariância de escala e a universalidade entre as propriedades de sistemas adaptativos complexos que a fisiologia do exercício ignora e deveria incorporar.

Como consequência prática para a presente dissertação, se entende que a estrutura de correlação de longo alcance de uma série de intervalos entre batimentos carrega informações sobre o estado regulatório que a magnitude da variabilidade não carrega, justificando a razão pela qual o expoente de escala de curto prazo obtido por análise de flutuações

destendenciadas (DFA) entra aqui como descritor de estado, ao lado da entropia amostral, e não como redundância dos índices de magnitude. A segunda implicação é de que a leitura da complexidade como compromisso entre ordem e desordem, caracterizada por séries correlacionadas em longo alcance, oferece o critério pelo qual uma queda do expoente de escala pode ser lida como perda de estrutura regulatória, e não simplesmente como aumento ou diminuição de variabilidade (Balagué et al., 2020).

Registre-se, por fim, que a hipótese da tensegridade multifractal, formulada por Turvey e Fonseca e motivada pelos fundamentos teóricos da abordagem ecológica, vem sendo introduzida na ciência do esporte e sustenta que as flutuações multifractais do movimento capturam propriedades funcionais que medidas de tendência central não capturam (Turvey; Fonseca, 2014; Araújo et al., 2025). É essa linha que dá conteúdo à afirmação, retomada na seção 1.6, de que o acoplamento percepção-ação se estende para além das escalas em que ele é intuitivo.

1.4 Sistemas Adaptativos Complexos

A teoria dos Sistemas Adaptativos Complexos (SACs) é um ramo particular da ciência da complexidade, e um modo de pensar sistemas de elementos em interação e como a ordem emerge deles a partir dessas interações (Onik; Fielt; Gable, 2017). O termo foi cunhado por Murray Gell-Mann em *The Quark and the Jaguar*, obra que recolhe o vocabulário da complexidade então disponível e lhe acrescenta a adaptação, propriedade originalmente das ciências da vida (Gell-Mann, 1994). Juntos a ele, Holland e Dooley estiveram entre os primeiros a levar pesquisadores de outras áreas a adotar a teoria para investigar fenômenos dinâmicos e não determinísticos, sendo a formulação de Holland de SACs como sistemas coerentes e únicos, emergentes no tempo a partir das interações de seus componentes, se adaptando e se organizando em/com um ambiente, a mais difundida (Holland, 1995; Dooley, 1997). O campo se institucionalizou a partir dos esforços do Instituto Santa Fé, fundado em 1984 no Novo México, EUA, e o trabalho ali conduzido é habitualmente apresentado como o estudo formal dos SACs (Chan, 2001). Trata-se de um movimento predominantemente estadunidense, distinto da tradição europeia de cibernética e teoria geral dos sistemas, distinguido pelo uso extensivo de simulação computacional como ferramenta de pesquisa e pela ênfase em sistemas menos integrados que os tratados pela tradição anterior, como mercados e ecossistemas (Morel; Ramanujam, 1999). Não há uma teoria única dos SACs, e o que se encontra na literatura é um conjunto de formulações que convergem em afirmar que

um SAC se compõe de agentes heterogêneos interconectados, de suas interações e do ambiente em que residem (Onik; Fielt; Gable, 2017).

Pesquisadores do campo investigam os processos pelos quais sistemas compostos de muitos componentes em interação mudam sua estrutura sob pressões externas ou internas, criando novidade, auto-organizando-se, evoluindo e adaptando-se a um ambiente em mudança (Chan, 2001). Holland (1992) identifica três características que os SACs compartilham. A primeira é a evolução, no sentido de que as partes se modificam ao longo do tempo tentando melhorar sua capacidade de sobreviver na interação com as partes vizinhas, e é essa capacidade de adaptar-se, ou aprender, que define o campo. A segunda é o comportamento agregado, em que o comportamento de uma dada escala de análise não se deriva simplesmente das ações das partes que a compõem. A terceira é a antecipação, e é aqui que a formulação do autor destoa da adotada nesta dissertação, pois segundo ele as partes desenvolvem regras que antecipam as consequências de certas respostas, e formam e usam modelos internos para antecipar o futuro, baseando ações presentes em resultados esperados, sendo esse, para o autor, o atributo que os distinguiria dos demais sistemas complexos.

Esse compromisso não é o adotado aqui, pois a noção de modelo interno, ou de esquema, situa a fonte da antecipação numa estrutura centralizada apenas no organismo, e é essa a mesma família de explicação que a psicologia ecológica recusa ao rejeitar o representacionismo, e que a dinâmica da coordenação recusa ao rejeitar o programa motor como fonte prescritiva da ordem do movimento. A alternativa adotada, desenvolvida na seção 1.6, é a de que a antecipação é prospectividade da ação, sustentada pela informação disponível no arranjo organismo-ambiente e específica ao que está por vir, sem necessidade de uma cópia do mundo interna ao organismo. A adaptação, portanto, é acolhida como categoria, e o mecanismo proposto para ela não é.

Um segundo ponto de Holland (1992) permanece integralmente, na medida em que caracteriza a forma pela qual um SAC não possui equação governante única nem regra que controle o conjunto de seus elementos, e sim muitas partes distribuídas e em interação, cada qual regida por suas próprias regras. Cada parte está imersa num entorno perpetuamente novo, porque esse entorno é o comportamento variável das demais partes, e por isso o comportamento agregado do sistema costuma estar longe do ótimo, se é que o ótimo pode sequer ser definido para o conjunto. Nesse quadro, as teorias tradicionais da física e da economia são de pouca ajuda, porque se concentram em estados finais ótimos, ao passo que um SAC nunca os atinge. Para esses sistemas, é o processo de vir a ser, e não os pontos finais jamais alcançados, o que se deve estudar (Holland, 1992).

Admitir a ausência de controle central tem consequência metodológica direta, pois não há uma célula que comande o embrião em desenvolvimento nem um neurônio mestre no cérebro, e o controle de um sistema complexo em constante evolução tende a ser altamente disperso no próprio sistema (Chan, 2001). Qualquer comportamento coerente do conjunto surge da competição e da cooperação entre os próprios elementos, e a coevolução descreve o modo como cada componente influencia os demais enquanto o ambiente, que os comporta, é por sua vez modificado por eles, num processo que não se estabiliza (Onik; Fielt; Gable, 2017). Daí decorre também a sensibilidade às condições iniciais, no sentido de que mudanças nas características de entrada não se correlacionam de forma linear com os resultados, o que impõe um limite de princípio à predição de longo prazo nesses sistemas (Chan, 2001).

A paisagem adaptativa, cuja origem está nos modelos probabilísticos de seleção natural formulados por Sewall Wright e Ronald Fisher nos anos trinta e que representam o conjunto das configurações possíveis de um sistema como uma superfície de picos e vales, com a altura correspondendo ao desempenho e a evolução do sistema como um percurso sobre essa superfície (Lansing, 2003). Kauffman retomou a formulação para perguntar se a seleção natural darwiniana responde sozinha pelos padrões de ordem observados no mundo vivo, e concluiu que o alcance da ordem espontânea é muito maior do que se supunha (Kauffman, 1993). Suas redes NK mostraram que o comportamento global de um sistema depende quase inteiramente do grau de conectividade entre os elementos, e não das regras específicas que os governam, de modo que redes muito conectadas se tornam caóticas e redes muito esparsas se decompõem em subsistemas isolados que congelam ou repetem padrões simples (Lansing, 2003). Este conceito importa aqui porque o Artigo 4 da coletânea constrói, por projeção multivariada, uma superfície análoga para os estados de esforço.

A segunda é a de que um SAC funciona melhor quando combina ordem e desordem em medida funcionalmente apropriada, condição a que a literatura se refere como instabilidade limitada, ou borda do caos, e que designa a região entre o sistema simples demais, estático, e o sistema ativo o bastante para se tornar caótico, região em que ele pode desenvolver atividade produtiva (Onik; Fielt; Gable, 2017). Langton mostrou que uma rede congelada ou caótica não transmite informação e por isso não pode se adaptar, ao passo que uma rede próxima dessa fronteira armazena e transmite informação ao mesmo tempo (Langton, 1990). O regime metaestável descrito na seção 1.9 é a formulação que a dinâmica da coordenação dá a essa mesma ideia, com a diferença de dispor de um formalismo que a torna mensurável.

Cabe ressaltar um alerta de Holland, para quem reconhecer um sistema adaptativo complexo envolve uma mudança de percepção, e para quem a estratégia mais frutífera talvez seja a interdisciplinaridade, na esperança de extrair características comuns a domínios distintos (Lansing, 2003). O mesmo autor observa que a intervenção humana modifica extensamente as interações ecológicas do fenômeno analisado, com noções apenas vagas sobre os efeitos de longo prazo. Esse alerta ecoa entre pesquisadores da ecologia e reaparece nesta dissertação sob outra forma, a de que intervir sobre um subsistema fisiológico sem descrever a rede da qual ele participa produz o mesmo tipo de cegueira.

1.5 Sinergética e Dinâmica da Coordenação

1.5.1 Sinergética

A sinergética foi formulada por Hermann Haken nos anos setenta, sob forte influência dos estudos da termodinâmica do não-equilíbrio, e se define como o campo interdisciplinar que busca princípios gerais subjacentes à auto-organização em sistemas complexos abertos (Haken, 1977, 1983). O nome significa ciência da cooperação, e o objeto são sistemas compostos de múltiplos indivíduos, partes ou elementos que interagem entre si e trocam energia, matéria ou informação com o entorno, capazes de produzir estruturas espaciais, temporais ou funcionais sem organizador centralizado (Haken; Portugali, 2021).

O estudo de Haken sobre o comportamento do laser é o caso a partir do qual a sinergética foi formulada, pois ao contrário de uma lâmpada comum, no laser ocorre um ato típico de auto-organização, em que os elétrons individuais dos átomos correlacionam seus movimentos e geram uma onda luminosa coerente e ordenada, sem que nada nem ninguém informe ao sistema como se comportar de tal modo (Haken, 1983). Ao lado do laser, a sinergética se organiza em torno dos paradigmas da formação de padrões, do reconhecimento de padrões e, posteriormente, o do movimento dos dedos, este último conduzido por Kelso (1984) e modelado por Haken, Kelso e Bunz (1985), do que resultou na sintetização do modelo HKB.

O paradigma da formação de padrões parte da instabilidade de Bénard, de 1900, em que uma camada fina de líquido num recipiente circular é aquecida por baixo e resfriada por cima, de modo que a diferença de temperatura controla o comportamento macroscópico do sistema e pode ser caracterizada como parâmetro de controle. À medida que o parâmetro de controle cresce, o estado de repouso inicial se torna instável e o sistema se reorganiza. Logo acima do ponto de instabilidade, o sistema pode assumir configurações coletivas bastante

distintas, cujas amplitudes começam pequenas e independentes umas das outras. Quando crescem, passam a influenciar-se mutuamente, e em alguns casos competem até que uma suprima as demais, enquanto em outros coexistem e chegam a estabilizar-se reciprocamente (Haken; Portugali, 2021).

As amplitudes das configurações que crescem funcionam como parâmetros de ordem e descrevem a estrutura macroscópica do sistema, mas não apenas a descrevem, pois também governam o comportamento espaço-temporal das próprias partes. A configuração que se sobrepõe escraviza as muitas partes do sistema ao seu movimento específico, no que se caracteriza o princípio da escravização (Haken, 1977, 1983). O parâmetro de ordem tem, portanto, papel duplo, uma vez que descreve uma propriedade macroscópica do sistema e prescreve o comportamento das partes individuais, ao passo que as partes geram o próprio parâmetro de ordem por meio do seu comportamento coletivo. A esse arranjo de interações mútuas e bidirecionais dá-se o nome de causalidade circular, e a Figura 4 o representa (Haken; Portugali, 2021).

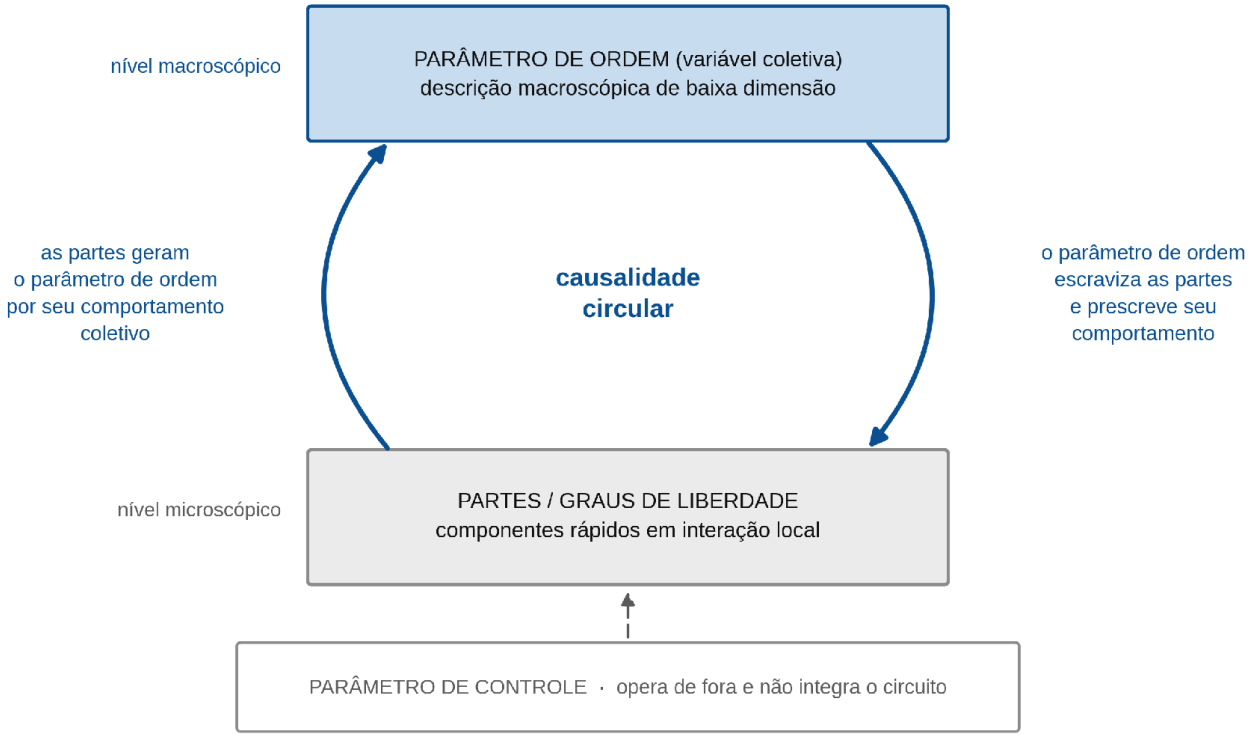


Figura 4 — Causalidade circular e o princípio de escravização. A interação local entre as partes gera um parâmetro de ordem que, uma vez existente, escraviza o comportamento dessas mesmas partes. Ao obedecer, as partes reforçam e reproduzem o parâmetro de ordem, e assim sucessivamente. O parâmetro de controle não integra o circuito e opera de fora, sobre a condição que torna o arranjo possível. Fonte: elaborado pelo autor com base em Haken e Portugali (2021) e Kelso (2013).

Essa formulação responde o porquê que uma descrição de baixa dimensão é legítima em alguns lugares e não em qualquer lugar, evidentemente observado ao aproximar dos pontos de instabilidade, em que um sistema muda qualitativamente o seu comportamento, fazendo com que o número de graus de liberdade funcionalmente relevantes se comprima drasticamente, e uma descrição de baixa dimensão possa, então, ser encontrada (Kelso, 2022). A razão disso é a separação de escalas temporais, em que os elementos individuais, com taxas de mudança mais rápidas, tornam-se escravizados às variáveis coletivas emergentes, mais lentas, e podem ser efetivamente eliminados da descrição, de modo que toda a informação necessária para descrever o comportamento do sistema repousa nas variáveis coletivas (Kelso, 2021). O parâmetro de ordem opera, nesse sentido, como instrumento de redução da dimensionalidade, uma vez que dispensa a descrição da ação de cada parte e permite tratar as interações entre poucas quantidades coletivas (Haken; Portugali, 2021).

Por fim, cabe destacar que as ações espontâneas de uma ou de poucas partes são tratadas como eventos de acaso e chamadas de flutuações, que em linhas gerais, não afetam as propriedades macroscópicas do sistema, mas desempenham papel decisivo nas situações em que a estrutura do sistema muda qualitativamente, isto é, quando o parâmetro de controle está próximo de um valor crítico (Haken, 1983). Flutuação, aqui, não é erro de medida nem oscilação em torno de um valor verdadeiro que a média revelaria, é a variação da própria variável coletiva ao longo do tempo, e o seu crescimento é assinatura da proximidade de uma transição, razão pela qual ela é objeto de análise nesta dissertação.

1.5.2 Dinâmica da Coordenação

A dinâmica da coordenação designa os conceitos, métodos e ferramentas usados para descrever, explicar e prever como padrões de coordenação se formam, se adaptam, persistem e mudam nos seres vivos (Kelso, 2013). Ela nasce da confluência entre a sinergética e o estudo contemporâneo do movimento humano, encontrando no experimento de coordenação bimanual conduzido por Kelso (1984), e na modelagem que Haken, Kelso e Bunz (1985) dele fizeram no ano seguinte, o marco inicial de sua constituição como campo de pesquisa.

À época do experimento, a teoria dominante sustentava que os movimentos eram controlados e coordenados por programas motores armazenados no sistema nervoso central, à maneira de um homúnculo, e a introdução dos conceitos sinergéticos de parâmetro de ordem, estabilidade, instabilidade e transição de fase, mudou o terreno do debate (Kelso, 2022). O experimento demonstrou que a mudança de padrão coordenativo ocorre de forma abrupta e espontânea quando a frequência do movimento é escalonada, com as assinaturas de uma

transição de não-equilíbrio (Kelso, 1984). No ano seguinte, Haken, Kelso e Bunz (1985) evidenciaram que essa auto-organização emergente pode ser descrita por uma equação de parâmetro de ordem que acomoda os achados experimentais e prevê efeitos novos. O campo trabalha com espaço de estados, atratores, estabilidade, bifurcações e osciladores de ciclo-limite não lineares, sendo estes últimos os elementos básicos da teoria, sejam eles moléculas, células, regiões cerebrais, partes do corpo ou organismos inteiros, desde que a descrição básica se dê em termos de fase, o que evidencia a influência conceitual, além da metodológica, da teoria dos sistemas dinâmicos (Kelso, 2021).

O conceito central herdado da sinergética é o de variável coletiva, ou parâmetro de ordem, que atravessa diferentes tipos de partes, processos e sistemas, dissolvendo divisões tradicionais e de certo modo arbitrárias, como a que separa o cognitivo do motor (Tognoli; Kelso, 2020). Para as formas rítmicas básicas de coordenação, dentro de uma mesma pessoa e entre pessoas, a dinâmica no nível macroscópico é capturada por uma única variável coletiva, a fase relativa entre os componentes que interagem (Kelso, 2022).

Na escala intraindividual, além do experimento bimanual original, transições de fase com aumento de flutuações críticas foram observadas na coordenação entre mão e pé ipsilaterais, entre os dois membros inferiores na postura ereta e na transição entre andar e correr, em que a variabilidade da fase relativa entre segmentos aumenta justamente na vizinhança da mudança de marcha (Carson et al., 1995; Harrison; Kinsella-Shaw; Dotov, 2021; Seay et al., 2006). Na escala interindividual, Schmidt, Carello e Turvey (1990) mostraram que duas pessoas balançando as pernas uma diante da outra, acopladas apenas pela visão, exibem os mesmos padrões em fase e antifase e a mesma transição abrupta quando a frequência é escalonada, resultado depois estendido a modelos de ação conjunta que incorporam a diversidade entre os participantes (Avitabile et al., 2016). Em escalas maiores, a mesma lógica relacional foi aplicada às relações de oposição em esportes coletivos, com a distância e o ângulo entre jogadores tratados como variáveis coletivas de um sistema de dois times (Gréhaigne; Bouthier; David, 1997).

Diferentemente do laser, na coordenação biológica o caminho que leva do nível microscópico às variáveis coletivas não é conhecido e não pode, ao menos até aqui, ser derivado de princípios primordiais como leis de conservação. Disso decorre um procedimento em três passos, em que é preciso identificar empiricamente os parâmetros de ordem e sua dinâmica de baixa dimensão, determinar os parâmetros de controle que movem o sistema pelos seus estados coordenativos e relacionar níveis diferentes por meio do estudo dos subsistemas individuais e do seu acoplamento (Kelso, 2013). A mudança qualitativa do

sistema sob análise é crucial a esse procedimento, pois permite distinguir com clareza um padrão coordenativo de outro e assim identificar quais variáveis coletivas reduzem a dimensionalidade dos estados coordenativos (Huys; Perdikis; Jirsa, 2014).

Para reforçar as decisões metodológicas assumidas nesta dissertação, vale ressaltar que há uma diferença decisiva entre variáveis dependentes e parâmetros de ordem, uma vez que estes não são arbitrários em relação ao sistema e são definidos de modo funcional e específico à tarefa em análise (Carson et al., 1995). Dependência de contexto, aqui, não implica subjetividade nem ausência de reprodutibilidade, e tampouco significa que cada contexto novo exija uma variável coletiva nova. Kelso (2022) descreve a estratégia como o esforço de dobrar juntos, na dinâmica da variável coletiva, todos os aspectos do fenômeno, de modo a abarcar a complexidade da coordenação biológica sem uma proliferação de divisões arbitrárias.

Reduzindo a dimensionalidade e simplificando o controle em um sistema complexo, as sinergias emergem como um conceito fundamental ao campo do movimento sob a perspectiva da dinâmica da coordenação, em que ao serem entidades funcionais, um conjunto de graus de liberdade relativamente independentes, podem ser temporariamente constrangidos a agir como unidade funcional única, como uma sinergia (Kelso, 2022). Sinergias resolvem problemas característicos dos sistemas complexos vivos, e um deles é a degenerescência, no sentido de que componentes distintos podem produzir a mesma função e sinergias distintas podem ser ativadas para atingir o mesmo objetivo de tarefa (Balagué et al., 2020). Outra característica marcante, e menos reconhecida, é a capacidade de recrutar e aniquilar espontaneamente, e ao mesmo tempo, os graus de liberdade necessários para cumprir objetivos e tarefas, mecanismo que estabiliza e desestabiliza continuamente os estados de coordenação (Kelso, 2022). Diferentemente da preservação de um arranjo fixo, é essa capacidade coordenativa dinâmica que a análise de acoplamento desta dissertação pretende indexar sob fadiga.

1.6 Psicologia Ecológica e Dinâmica Ecológica

A psicologia ecológica de James Gibson nasce de uma objeção à psicologia da percepção dominante entre os anos cinquenta e oitenta, e que em boa medida perdura até os dias atuais (Araújo et al., 2019; Huys; Perdikis; Jirsa, 2014). Contra a visão cognitivista daquele período, Gibson opôs-se à ideia de que a informação vinda do ambiente e que chega aos sentidos seja empobrecida ou ambígua, assim como se opôs à consequente concepção de

que a formação de perceptos significativos exigiria intervenções centralizadas e comandadas, seja por um homúnculo biológico, seja pelo próprio sistema nervoso (Gibson, 1979).

Gibson partiu de extensos estudos sobre a capacidade perceptiva de organismos, e de acordo com seu livro *The Senses Considered as Perceptual Systems*, um ser vivo percebe o seu entorno e a si mesmo, não a partir de um órgão sensorial isolado que recebe estímulos, mas através de um sistema perceptivo próprio, isto é, um arranjo de órgãos, músculos e ajustes posturais integrados mutuamente e que ativamente exploram as informações que os circundam (Gibson, 1966). Sendo assim, perceber é uma atividade do corpo inteiro, agindo sobre o ambiente e dentro dele para obter informações relevantes as funcionalidades exigidas pelo contexto de ação (Gibson, 1979). Dessa forma, a perspectiva ecológica, a ação está intimamente relacionada à percepção de um organismo, que ao mover-se é levado, de maneira perceptivamente controlada, a uma posição de contínuos ajustes aninhados de giro de cabeça, movimento dos olhos, acomodação do cristalino e posicionamento das mãos, por exemplo, que podem cumprir sua função como um ato coordenado com o ambiente (Gibson, 1966). Consequentemente, se sempre há mais estrutura ambiental a ser descoberta com mais explorações do indivíduo, então sempre há a possibilidade de perceber um mesmo contexto de formas diferentes (Araújo et al., 2025).

O que os sistemas perceptivos detectam são fluxos informacionais, e não estímulos, na medida em que as propriedades do entorno de um organismo estruturam campos de energia ambiente, de tal modo que a estrutura desses campos especifica, isto é, mantém relação unívoca com as propriedades ambientais que a geraram, e é a essa relação legal entre propriedades do ambiente e energia ambiente que Gibson deu o nome de especificação (Araújo; Davids; Hristovski, 2006; Gibson, 1979). Distribuições de energia ambiente são necessariamente específicas ao ambiente e as ações do organismo em relação a ele, na medida em que o indivíduo está ativamente engajado em transações dinâmicas com um ambiente funcionalmente definido a partir de suas capacidades perceptivas (Araújo; Davids; Hristovski, 2006). Assim, por exemplo, no ato de perceber, as mãos, os ouvidos e/ou os olhos exploram as fontes de estimulação disponível, vasculhando campos de energia estruturados que constituem um recurso ambiental a ser explorado por organismos ativos em seus contextos individuais (Gibson, 1966; Withagen; Chemero, 2009).

Gibson ainda sustentou que mudanças no fluxo energético do entorno (as variantes) e as não mudanças (as invariantes), são usadas pelo indivíduo para controlar seus movimentos em relação ao ambiente (Gibson, 1979). Mais especificamente, o autor sustenta que no fluxo informacional que circunda um organismo, algumas relações entre componentes permanecem

invariantes, e esses especificam, ou informam sobre os traços estáveis do ambiente. Por outro lado, as variantes especificam o movimento do observador em relação a estes traços estáveis. Sendo assim, entendendo que as invariantes só se definem em relação a variantes, segue-se que a contínua interação de um organismo com seu ambiente é necessária para revelar aquilo que é estável (Araújo et al., 2025). O mesmo par permite separar o que pertence ao ambiente do que pertence ao organismo, isto é, à medida que o indivíduo se move, é possível perceber quando o que muda é o seu próprio ponto de vista e quando é o seu entorno (Gibson, 1979). O fluxo óptico é um exemplo pertinente, mas não único, em que se define o padrão de movimento óptico produzido num ponto de observação em deslocamento durante a locomoção terrestre, no qual relações definidas sobre muitos movimentos locais elementares formam um padrão global de escoamento que contém um foco de expansão na direção do automovimento (Gibson, 1979; Warren, 2006).

As *affordances*, termo cunhado pelo próprio Gibson, são o que as invariantes especificam, na medida em que uma affordance é a combinação invariante de propriedades de substância e de superfície do ambiente tomada em referência a um organismo, e assim, as affordances são o ponto de partida para o estudo de como os humanos percebem, aprendem, decidem e agem (Turvey; Shaw; Reed; Mace, 1981; Araújo; Davids; Hristovski, 2006). As *affordances* delimitam aquilo que é hábil a um organismo em específico em um contexto específico, mas não se resumindo a fenômenos subjetivos do primeiro, nem a meras objetividades físicas do segundo (Turvey, 1992). Por exemplo, uma superfície é escalável para um dado organismo e não para outro, um espaço é atravessável nesta velocidade e não naquela, ou seja, perceber as coisas é perceber como se mover entre elas e o que fazer, ou não fazer, com elas (Gibson, 1979, Withagen; Chemero, 2009). Perceber uma affordance envolve detectar informação sobre o ambiente e também sobre as próprias capacidades de ação, que sintonizam o indivíduo a certas affordances e não a outras (Seifert; Davids, 2017). É por isso que capacidades de ação, ou efetividades, integram a definição de affordances, na medida em que uma mesma superfície oferece possibilidades diferentes a organismos com capacidades diferentes, e a mudança das capacidades ao longo do esforço muda o que o ambiente oferece sem que nada no ambiente tenha efetivamente mudado.

Neste quadro, o aprender a perceber não consiste em enriquecer uma entrada sensorial pobre com conhecimento acumulado, e sim em tornar-se progressivamente sensível a informação que sempre esteve disponível e não estava sendo detectada, processo descrito como educação da atenção e como diferenciação crescente entre as invariantes que, outrora, eram confundidas ou ignoradas (Gibson, E. J., 1969). Consequentemente, esta formulação

desloca o que se entende por aprender uma habilidade, ao conceituar que o que se altera com a prática não é primariamente um repertório de comandos armazenados, mas a sintonia do sistema perceptivo às variáveis informacionais que especificam o controle da ação. Estudos posteriores ligados a essa linha, indicam que o sistema perceptivo ativamente busca por variáveis informacionais, determinando se elas covariam com a ação bem-sucedida, e converge sobre variáveis de ordem superior que mantêm relações invariantes numa faixa ampla de condições, de modo que o indivíduo percorre trajetórias no espaço de informação que convergem para estabilidades informacionais (Warren, 2006). O paralelo com o vocabulário da seção 1.3 é exato, pois aqui também se conceitua um espaço de estados, trajetórias e atratores, agora definidos sobre a informação mútua entre um organismo e seu ambiente, em vez de sobre movimento individual.

O ciclo percepção-ação é o modo como esses elementos operam juntos, e não um corolário deles, funcionando conjuntamente como um sistema comportamental (Gibson, 1966; Araújo; Davids; Hristovski, 2006). O ciclo é o primeiro nível de análise do comportamento dirigido a objetivos, aquele em que os componentes, agente e ambiente, interagem no curso da detecção de informação e do controle da ação (Warren, 2006). O acoplamento é fechado nos dois sentidos, ou seja, durante a locomoção por exemplo, o ciclo da passada aplica força contra o solo, a força de reação impulsiona o corpo e o ponto de observação para a frente, e isso altera as direções egocêntricas de obstáculos e metas e gera um padrão de fluxo óptico no ponto de observação, padrão que por sua vez governa o ciclo do passo seguinte e em que tudo isso ocorre ao mesmo tempo, não como uma sequência de ações, mas como uma constante dinâmica de interações entre diferentes informações (Gibson, 1966; Turvey, 1992). Informação e controle são comensuráveis porque a variável informacional especifica o estado-objetivo do sistema e está definida nos mesmos termos que as variáveis de controle, e nada disso requer um modelo interno do mundo, tendo em vista que o papel do acoplamento percepção-ação é o de conservar a intenção rumo ao objetivo da tarefa, à medida que o indivíduo se orienta no ambiente, percebendo informações que especificam o controle da ação (Warren, 2006; Turvey, 2019). A Figura 5 dispõe o conjunto.



Figura 5 — Mutualidade organismo-ambiente e o acoplamento percepção-ação. Organismo e ambiente formam os dois polos de uma mesma unidade, e os termos centrais pertencem à relação entre eles, não a um ou a outro isoladamente. Percepção e ação percorrem o circuito em sentidos opostos ao mesmo tempo, e não em sequência, de modo que nenhum dos dois precede o outro e nenhum requer um modelo interno do mundo. Fonte: elaborado pelo autor com base em Gibson (1966, 1979), Warren (2006) e Araújo et al. (2025).

Para os fins da presente dissertação, duas consequências emergem da adoção de tal quadro, a primeira é que a ação é constrangida tanto por sua retrospectividade quanto por sua prospectividade, sendo um processo ecologicamente flexível, auto-organizado e emergente, que satisfaz constrangimentos que se impõem (Araújo et al., 2025). É essa prospectividade que substitui, aqui, a antecipação por modelo interno discutida na seção 1.4. A segunda é que o princípio do acoplamento percepção-ação se estende para além das escalas de análise em que ele é intuitivo ou óbvio, havendo evidência de que flutuações do movimento em grão muito fino sustentam a percepção de affordances, resultado que a hipótese da tensegridade multifractal articula ao arcabouço da física ecológica, sendo exatamente esta análise de escalas finas em que o acoplamento de fase opera (Turvey; Fonseca, 2014).

1.6.1 Dinâmica Ecológica

A psicologia ecológica é, antes de tudo, uma posição ontológica e epistemológica ao afirmar o que existe no fenômeno, a saber, o par irredutível animal-ambiente com informações que especificam suas possibilidades de ação, e também, ao afirmar como esse fenômeno pode ser conhecido, a saber, pela detecção de especificidade e não pela inferência

sobre dados empobrecidos. Por outro lado, a teoria dos sistemas dinâmicos é um conjunto de ferramentas matemáticas para descrever fenômenos que evoluem no tempo, e como tal é neutra quanto ao que existe, ou seja, as mesmas equações descrevem um pêndulo, uma reação química e uma população. Uma diz o que há e como se pode conhecê-lo, já a outra diz como escrever o que muda. Nenhuma das duas substitui a outra, e é por isso que a teoria dos sistemas dinâmicos, não sendo uma teoria do comportamento, precisa ser integrada a uma teoria compatível da área. É sobre estes dois pilares, em conjunto com outras articulações das ciências da complexidade e das teorias evolutivas, que se sustenta o quadro da Dinâmica Ecológica, voltado ao entendimento de processos da cognição, aprendizagem e desenvolvimento de habilidades (Seifert; Davids, 2017).

A dinâmica ecológica constitui o quadro que operacionaliza a posição ontológica da ecologia no estudo do desempenho, da aprendizagem e do desenvolvimento de habilidades, com unidade de análise, método e desenho experimental próprios, tratando atletas e equipes como SACs que evoluem em escalas temporais distintas (Araújo; Davids; Hristovski, 2006). A unidade de análise pertinente é a relação organismo-ambiente, e é por adotá-la que o quadro responde à fraqueza das abordagens tradicionais do desempenho proficiente, que se concentram separadamente no praticante ou no ambiente (Chow et al., 2011). Bernstein (1967) formulou o problema dos graus de liberdade, isto é, o de como um sistema com muito mais graus de liberdade do que os exigidos pela tarefa produz solução funcional, e propôs que o controle não incide sobre graus de liberdade individuais e sim sobre agrupamentos funcionais temporariamente constrangidos a operar como unidade. A organização em sistemas neurobiológicos é ao mesmo tempo facilitada e limitada por restrições que interagem e que dão forma à dinâmica dos comportamentos emergentes (Seifert; Davids, 2017). A relação entre praticante e ambiente se estabelece por vínculos rigidamente montados, de natureza física, e frouxamente montados, de natureza informacional, distinção que explica por que a mesma configuração corporal pode servir a funções diferentes conforme a informação disponível (Kugler; Turvey, 1987).

Disso decorre a definição de expertise adotada nesta dissertação, em que diferentemente de convergir para um gabarito de movimento, é conceituada como o continuo exercer da adaptação funcional do comportamento a um conjunto de restrições em interação, de modo a explorá-las ao máximo no alcance de objetivos de desempenho pretendidos (Seifert; Davids, 2017). Uma característica marcante do praticante experiente é a sintonia perceptiva a variáveis informacionais relevantes, no sentido de que eles podem melhor perceber *affordances* funcionalmente significativas, o que exige captar variáveis de diferentes

modalidades, háptica, cinestésica, auditiva e visual, que especifiquem diferentes propriedades funcionais do ambiente de desempenho (Araújo et al., 2025). Relevante, aqui, significa funcional, isto é, aquilo que permite ao praticante atingir um objetivo de tarefa com eficácia.

No estudo do movimento, essa articulação se organiza na tríade de restrições do organismo, da tarefa e do ambiente, proposta por Newell (1986). Restrições do organismo são propriedades estruturais e funcionais do próprio praticante, e no caso desta dissertação incluem a estatura e o comprimento dos segmentos, que fixam a geometria da passada, a capacidade aeróbia, que determina em que velocidade o esforço deixa de ser sustentável, e o estado de fadiga acumulada, que muda ao longo da própria sessão. Restrições ambientais são as condições em que a ação ocorre, entre elas a temperatura e a umidade da sala, a superfície e a rigidez da esteira, e a informação visual disponível, que numa esteira é diferente daquela em uma pista. Restrições da tarefa são as que decorrem do objetivo e das regras da atividade, e aqui compreendem a instrução de correr até a exaustão, a escala de percepção de esforço usada para regular a velocidade e a duração padronizada dos segmentos. Convém uma ressalva, pois Newell formulou a tríade fora da tradição ecológica, no interior do debate sobre controle motor, e nunca se identificou como pesquisador ecológico. A leitura contemporânea trata os três tipos de restrição como categorias aninhadas e mutuamente relacionadas em vez de listas independentes, e nela as restrições da tarefa aparecem como interseção entre as do organismo e as do ambiente, emergentes da interação entre ambas (Balagué et al., 2019). Essa releitura opera algo próximo de uma repatriação do conceito para uma perspectiva ecológica, na medida em que o subordina à mutualidade organismo-ambiente que Newell não assumia. Nesse quadro, padrões de comportamento emergem sob restrições em mútua interação, enquanto estados de organização menos funcionais são dissipados, e mudanças nas restrições podem levar o sistema a pontos de bifurcação, onde novas possibilidades emergem à medida que informação mais específica se torna disponível (Araújo; Davids; Hristovski, 2006). O desempenho pode então ser descrito como uma busca numa paisagem de affordances rumo ao objetivo da tarefa, e a decisão como transição na própria dinâmica percepção-ação, e não como plano mental hierarquicamente anterior à ação (Araújo et al., 2025).

A degenerescência do sistema neurobiológico é o que permite a atletas executar tipos diferentes de movimento, ou adotar um entre vários modos coexistentes de coordenação, para atingir o mesmo resultado funcional (Seifert; Davids, 2017). Não existe, portanto, um gabarito de movimento ao qual todos devessem convergir, uma vez que soluções funcionais relativamente singulares emergem da interação entre as restrições de cada sistema organismo-ambiente (Chow et al., 2011). Para esta dissertação, isso implica tratar a

variabilidade intraindividual como objeto de análise e não como erro, e é a razão pela qual o alvo explicativo é a trajetória de cada corredor e não a média do grupo.

A partir do desenho representativo, a dinâmica ecológica também influencia o desenho das situações de prática e de pesquisa, sendo o princípio segundo o qual ambientes experimentais e de aprendizagem devem preservar as restrições que de fato operam no contexto de desempenho, para que o que ali se observa possa ser vinculado aos comportamentos funcionais emergentes fora dele (Woods et al., 2020). Outra consequência é a preferência pela simplificação da tarefa em vez da decomposição em partes, uma vez que a decomposição rompe o acoplamento entre informação e movimento que constitui o objeto de análise (Seifert; Davids, 2017). Ambas incidem diretamente sobre o protocolo desta dissertação, cuja intensidade é graduada pela escala de percepção subjetiva de esforço (Borg, 1998), e que é conduzido em esteira, com a limitação de campo informacional que isso impõe, mas com a intensidade regulada pela percepção do próprio corredor em vez de imposta pelo experimentador, o que preserva ao menos a fonte de restrição que governa a sessão.

1.7 Fisiologia de Redes e Fisiologia de Redes do Exercício

A fisiologia de redes é um campo recente que emergiu para preencher uma lacuna deixada pela fisiologia tradicional e pela ciência de redes, e o faz ao se perguntar como os sistemas fisiológicos coordenam, sincronizam e integram suas dinâmicas para otimizar funções e manter a saúde (Ivanov; Liu; Bartsch, 2016). A formulação do campo se deve a Plamen Ch. Ivanov e colaboradores, no *Keck Laboratory for Network Physiology* da Universidade de Boston, e se apoia num conjunto de trabalhos que estabeleceram, primeiro, a estrutura das flutuações em sistemas fisiológicos isolados e, depois, os mecanismos de acoplamento entre sistemas distintos (Bashan et al., 2012; Bartsch et al., 2015; Ivanov, 2021). O horizonte declarado do campo é a construção de um primeiro atlas de interações dinâmicas entre órgãos, e mais adiante, a produção de um Fisioma Humano, um repositório de mapas de rede que representem os sistemas fisiológicos integrados (Ivanov, 2021).

Especificamente, a diferença em relação à ciência de redes aplicada à biologia está no que os vínculos representam, pois em redes moleculares ou metabólicas, um vínculo costuma representar uma relação estrutural estável, mas já na fisiologia de redes, os vínculos representam coordenação dinâmica entre sistemas e subsistemas diversos, com características transitórias (Bartsch et al., 2015). O programa se desdobra em duas frentes, a da conectividade estrutural e funcional das redes fisiológicas que sustentam cada sistema orgânico e seus subsistemas, e a de como o comportamento global a nível do organismo

(diferentes estados e funções fisiológicas), emerge das interações em rede entre sistemas orgânicos (Bashan et al., 2012; Ivanov; Liu; Bartsch, 2016). Portanto, a dinâmica global da rede do organismo em sua totalidade não pode ser expressa como soma dos comportamentos dos sistemas individuais, na medida em que pode ser fortemente influenciada por mudanças pequenas no comportamento de um de seus subsistemas ou na força relativa de suas interações com outros, mesmo quando a topologia da rede permanece inalterada (Ivanov, 2021). Sendo assim, comportamentos globais distintos podem emergir de mudanças temporais na forma funcional das interações fisiológicas, sem necessariamente haver uma reorganização da topologia da rede, o que coloca um problema metodológico explícito ao campo, o de desenvolver uma metodologia generalizada e adequada para quantificar formas complexas de acoplamento (Bashan et al., 2012). O programa desta dissertação é uma resposta parcial a esse chamado, e o Artigo 6 relata em detalhe o que aconteceu quando a resposta foi construída sem os controles que ela exigia.

A fisiologia de redes do exercício é o desdobramento do campo para o domínio do esforço, e sua formulação é devida a Balagué, Hristovski, Almarcha, Garcia-Retortillo e Ivanov (Balagué et al., 2020). O diagnóstico que a motiva é o mesmo da seção 1.2, agora dirigido ao campo específico da fisiologia do exercício, que organizou, principalmente, um século de pesquisa em torno da expressão “efeitos de”, o que por sua vez revela um modo de indagação com ferramentas de aquisição, técnicas de análise e métodos indutivos correspondentes, e que mesmo produzindo conhecimento abundante sobre componentes isolados, seguiu e ainda segue sem responder às perguntas centrais do campo, entre elas quais são os limites do desempenho e por que o exercício termina quando termina (Balagué et al., 2022; Noakes, 2012). Assim, a proposta da fisiologia de redes do exercício é a de substituir variáveis isoladas por variáveis coletivas macroscópicas, que se comportam como parâmetros de ordem integrando todos os níveis da rede e capturando a organização do sistema (Balagué et al., 2022).

Níveis superiores e inferiores da rede se relacionam por causalidade circular, no sentido de que os componentes microscópicos formam sinergias macroscópicas que, por sua vez, governam o comportamento dos próprios componentes (Haken; Portugali, 2021). Assim, o campo se ocupa não só da dinâmica aninhada das interações verticais, entre níveis de organização, mas também horizontais, entre órgãos e componentes de um mesmo nível (Ivanov; Liu; Bartsch, 2016). Propriedades reconhecidas dos sistemas adaptativos complexos, como sinergias, auto-organização, causalidade circular, interações dinâmicas não lineares, criticalidade, invariância de escala e universalidade, geralmente ignoradas na fisiologia do

exercício, são reconhecidas, integradas e enfatizadas no campo da fisiologia de redes do exercício, melhorando a compreensão dos fenômenos relacionados à prática esportiva e ao movimento humano, a partir de sinergias operando em escalas diversas e que continuamente são reorganizadas, permitindo a compensação recíproca de componentes e processos para satisfazer os objetivos da tarefa, invocando a propriedade de degenerescência dos SACs (Balagué et al., 2020; Edelman; Gally, 2001). Por sua vez, a pleiotropia do próprio exercício, no sentido de que um mesmo estímulo genericamente dosado produz efeitos fisiológicos múltiplos em populações heterogêneas, é a contrapartida dessa organização em rede (Garcia-Retortillo; Ivanov, 2025).

Dessa forma, a fadiga passa a ser lida como evento de nível de rede e não como falha local, entendida como processo que leva a uma transição de fase no nível do organismo como um todo, isto é, ao desengajamento espontâneo da tarefa, através de um mecanismo circular que se espalha pelos mais variados níveis (Balagué et al., 2022). Em outras palavras, ao campo da fisiologia de redes do exercício, há uma necessidade declarada de adotar uma perspectiva que atravesse escalas para investigar os mecanismos regulatórios multiescala subjacentes à fisiologia de redes e sua relação com estados e funções fisiológicas (Ivanov, 2021). O trabalho empírico dessa tradição já demonstrou que interações cardio-musculares formam uma rede multiplex com heterogeneidade pronunciada, caracterizada por topologias e organizações hierárquicas distintas para diferentes sub-redes coração-músculo em resposta à fadiga acumulada, e que a coordenação cardiorrespiratória se reorganiza após treinamento e destreinamento de modo específico ao estímulo (Garcia-Retortillo; Ivanov, 2025; Balagué et al., 2016; Garcia-retortillo et al., 2017).

1.8 Compromissos Ontológicos e Epistemológicos Compartilhados

Antes de qualquer decisão sobre instrumentos, sinais ou modelos, uma pesquisa assume uma posição sobre o que existe no fenômeno que investiga e sobre o modo pelo qual esse fenômeno pode ser conhecido. Essas duas posições, a ontológica e a epistemológica, raramente são declaradas na fisiologia do exercício, o que não significa que estejam ausentes, pois operam de forma tácita, embutidas nos protocolos, nas variáveis eleitas e nos procedimentos estatísticos de rotina. A tese que sustenta este trabalho é a de que boa parte das dificuldades acumuladas no estudo da fadiga não decorre de instrumentação insuficiente nem de amostras pequenas, mas desses compromissos não examinados.

O programa dominante na fisiologia do exercício herdou da biologia do século XX uma estratégia explicativa que Balagué e colaboradores (2022) descrevem como a decomposição do sistema responsável por um fenômeno em partes componentes, atribuindo o fenômeno ao comportamento dessas partes. A dificuldade é estrutural, e não conjuntural, isto é, quando a explicação é organizada como cadeia causal linear, ela se encerra assim que um elo defeituoso é localizado, e o pesquisador é levado a perguntar qual componente falhou primeiro. Mas em organismos humanos entendidos como SACs a causalidade é circular, ou seja, os componentes formam sinergias que, por sua vez, governam o comportamento dos próprios componentes, de modo que não há elo inicial privilegiado (Balagué et al., 2022; Haken, 1983; Kelso, 1995). Mais ainda, nesses sistemas não existe um estado de referência com o qual a retroalimentação possa ser comparada, nem um lugar onde a operação de comparação seja realizada. É por isso que fenômenos como o desengajamento da tarefa induzido pela fadiga não se deixam explicar por vias de retroalimentação com pontos de ajuste, ao modo de um termostato, por exemplo (Balagué et al., 2022). A Figura 6 contrasta as duas formas de causalidade.

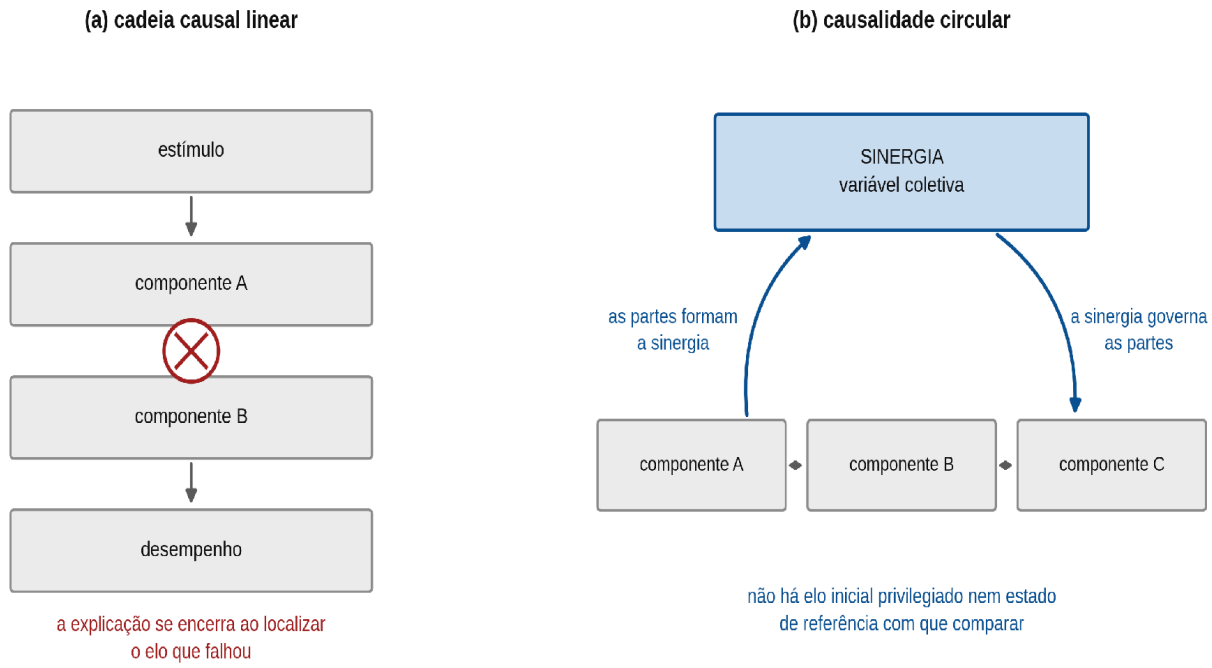


Figura 6 — Cadeia causal linear e causalidade circular. Na primeira, a explicação se encerra ao localizar o elo que falhou. Na segunda, os componentes formam sinergias que governam o comportamento dos componentes, sem elo inicial nem estado de referência. Fonte: elaborado pelo autor com base em Balagué et al. (2022), Haken (1983) e Kelso (1995).

A inferência estatística usual agrupa participantes e generaliza da população para o indivíduo, procedimento que pressupõe ergodicidade, contudo, ocorre que a correção dessa

suposição nunca foi explicitamente testada na fisiologia do exercício, e há razões teóricas para duvidar dela justamente nos processos que interessam aqui, uma vez que treinamento e fadiga são processos não estacionários e não lineares, residentes em sistemas de mesma natureza (Venhorst; Micklewright; Noakes, 2018). Sendo assim, para a presente dissertação, o objeto e o alvo explicativo são os processos intra-organísmicos, e a variabilidade intraindividual, e não a variabilidade entre pessoas. A Figura 7 ilustra a consequência prática: uma média de grupo pode descrever com fidelidade estatística um curso que nenhum participante efetivamente percorreu.

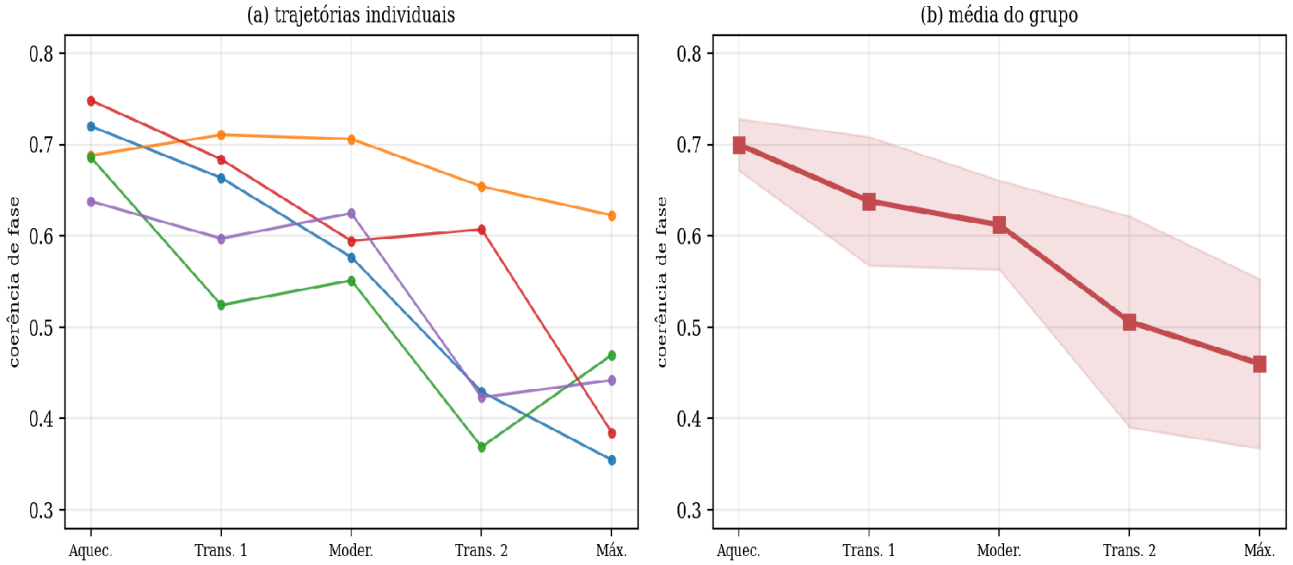


Figura 7 — Trajetórias individuais e média do grupo. Curvas ilustrativas de coerência de fase ao longo dos cinco segmentos do protocolo. Trajetórias qualitativamente distintas produzem uma média suave e monotônica que não corresponde ao percurso de nenhum participante. Fonte: elaborado pelo autor; argumento conforme Balagué et al. (2022).

A objeção poderia ser lida como preferência doutrinária, e por isso convém registrar que os próprios dados desta dissertação a sustentam. Mais especificamente, ao decompor a variância de cada variável medida na porção que muda dentro de um mesmo corredor ao longo do protocolo e na porção que apenas distingue um corredor de outro, a fração intraindividual vai de 0,20, na amplitude de oscilação vertical, a 0,68, na entropia amostral, situando-se em 0,54 nas coerências dos pares que envolvem cinemática, assim, cerca de metade do que se mede é trajetória, e a outra metade é identidade de quem corre. A consequência é operacional na medida em que a projeção multivariada aplicada aos valores absolutos separa pessoas, e só depois de normalizar cada variável dentro de cada participante ela passa a separar estados, com a correlação entre o primeiro componente do PCA kernel e a ordem dos três momentos subindo de 0,63 para 0,87. Voltando a Balagué e colaboradores

(2022), que observaram que a correção da suposição de ergodicidade jamais foi explicitamente testada na fisiologia do exercício, na presente dissertação ela foi, e não se sustentou.

A rota adotada nesta dissertação parte, principalmente, da articulação entre os compromissos de três campos científicos individuais, em que o primeiro recorte aqui assumido é o da teoria dos SACs, que fornece a categoria de adaptação e o compromisso com a ordem sem projetista, e que se distingue das demais correntes por tratar de organismos que aprendem e não apenas de componentes passivos sob um parâmetro externo (Gell-Mann, 1994; Holland, 1995). A esse recorte se soma a abordagem ecológica, advinda da psicologia da percepção, com a proposição de que animal e ambiente formam um par irredutível para a compreensão de seus comportamentos, em que a informação disponível especifica, e não representa mentalmente, as possibilidades de ação (Gibson, 1979; Turvey et al., 1981). A dinâmica da coordenação emergiu na neurociência do movimento, ao descrever padrões coordenativos como atratores de uma variável coletiva sujeita a transições de fase (Kelso, 1984; Haken; Kelso; Bunz, 1985). Compõem ainda o pano de fundo epistemológico desta posição o pensamento sobre a complexidade de Morin (2005) e a filosofia da emergência de Juarrero (1999, 2023), que sustentam a leitura de restrição como aquilo que possibilita, além de limitar.

O que permite a presente articulação não é uma semelhança de vocabulário entre as teorias e quadros, mas a coincidência de compromissos ontológicos e epistemológicos fundamentais, em que cada uma delas se constituiu opondo-se ao mesmo adversário dentro das individualidades de seus próprios campos de formulação. Especificamente, a sinergética e a termodinâmica do não-equilíbrio se formularam contra a redução do comportamento coletivo às propriedades das partes, a psicologia ecológica, contra o representacionismo que interpunha uma cópia interna entre o organismo e o mundo, e a dinâmica da coordenação, contra a noção de programa motor como fonte prescritiva da ordem do movimento. Três campos, três objeções, uma mesma natureza da recusa. A Figura 8 organiza essa confluência.

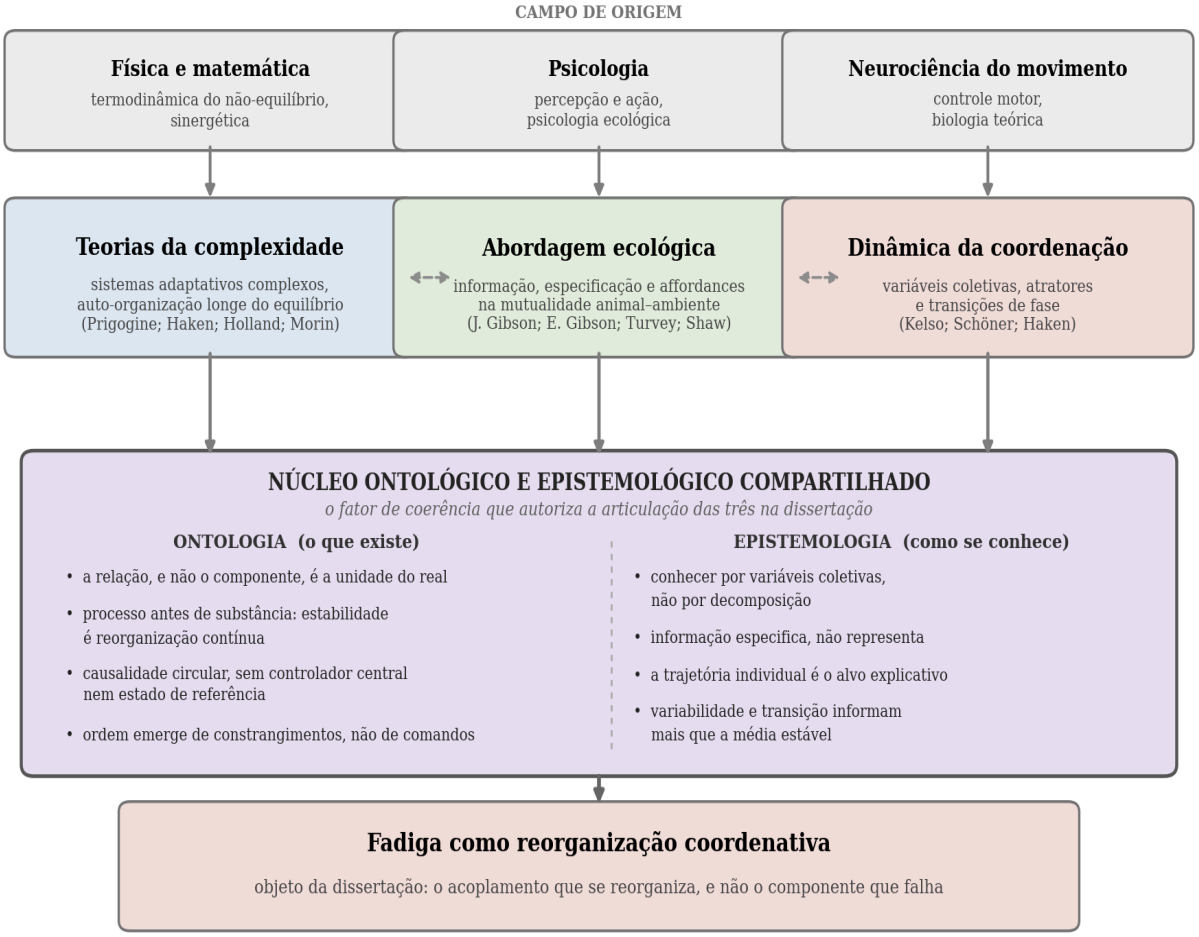


Figura 8 — Confluência das três tradições e o núcleo de compromissos compartilhados. Cada tradição provém de um campo distinto e se constituiu em oposição ao mesmo tipo de explicação dentro dele. A coincidência dos compromissos ontológicos e epistemológicos, e não a semelhança do vocabulário, é o que autoriza sua articulação. Fonte: elaborado pelo autor.

No plano ontológico, quatro compromissos são compartilhados. O primeiro é referente à unidade relevante de inferência, aqui entendida como a relação, e não o componente tomado isoladamente. Para a psicologia ecológica, essa unidade é a mutualidade organismo-ambiente, e as *affordances*, definidas na seção 1.6, são o ponto de partida para o estudo de como os humanos continuamente aprendem, decidem, percebem e agem (Araújo; Davids; Hristovski, 2006). Para a dinâmica da coordenação é a fase relativa entre componentes acoplados, e para a fisiologia de redes são os vínculos dinâmicos entre sistemas orgânicos (Bartsch et al., 2015; Haken, 1983). O segundo compromisso é a primazia do processo sobre a substância, em que a estabilidade de um sistema vivo não é sinônimo de imobilidade, mas de capacidade continuada de reorganização dentro de limites funcionais, razão pela qual a fisiologia de redes substitui a homeostase pela homeodinâmica (Ivanov, 2021). O terceiro é a causalidade

circular, que distribui o controle entre as escalas do mesmo sistema sem atribuir primazia a nenhuma delas, uma vez que os componentes formam sinergias que, por sua vez, governam o comportamento desses mesmos componentes, sem elo inicial privilegiado e sem estado de referência com o qual a retroalimentação pudesse ser comparada (Haken; Portugali, 2021; Balagué et al., 2022). O quarto é a compreensão de que a ordem emerge de restrições, e não de comandos representativos, sejam eles situados na mente, no cérebro ou no sistema nervoso central. Esse quarto compromisso tem formulação precisa na literatura dos sistemas adaptativos complexos, segundo a qual um sistema desse tipo não possui equação governante única nem controle central, e sua ordem resulta da interação entre muitas partes, cada uma sujeita às suas próprias regras (Holland, 1992). Para esta dissertação, a ideia se organiza a partir da tríade de restrições de Newell (1986) em sua leitura contemporânea, como categorias aninhadas e mutuamente relacionadas, em conjunto com a tipologia das fontes de liberdade e de restrição que distingue campos de força externos, de origem física, campos de força internos, de origem biológica, e campos de informação, de origem psicológica (Balagué et al., 2019; Shaw; Turvey, 1999).

No plano epistemológico, os compromissos compartilhados são igualmente quatro, sendo o primeiro a respeito de como se conhece um SAC, isto é, não por decomposição, mas por variáveis coletivas de baixa dimensionalidade que se comportam como parâmetros de ordem, integrando os níveis da rede e capturando a organização do sistema (Balagué et al., 2022; Haken, 1983; Kelso, 1995). A fase relativa do modelo HKB e as variáveis coletivas propostas pela fisiologia de redes fazem exatamente o mesmo movimento metodológico, e é essa identidade de função que permite tratá-las conjuntamente. O segundo compromisso concerne à informação, em que na perspectiva ecológica, as noções tradicionais de representação são subordinadas, e o peso recai sobre a especificação, isto é, sobre a especificidade da informação do ambiente e da percepção à tal, partindo do pressuposto que percepção e ação constituem um ciclo mútuo de interação, não uma sequência de entrada e saída (Araújo; Davids; Hristovski, 2006; Warren, 2006; Gibson, 1979). O terceiro é o já mencionado deslocamento do alvo inferencial da média do grupo para a trajetória individual. O quarto estabelece onde procurar, isto é, se a estabilidade é reorganização contínua, então as janelas de transição, e não os platôs estáveis, são os momentos de maior densidade informativa, pois é ali que as flutuações, entendidas aqui no sentido da sinergética como os desvios do valor médio de uma variável coletiva, e não como erro de medida, crescem e o sistema revela sua organização subjacente (Kelso, 1984; Schöner; Haken; Kelso, 1986). Essa

é a razão teórica, e não operacional, pela qual o protocolo desta dissertação trata os períodos de transição como objeto de análise e não como intervalo descartável entre medidas.

A Figura 9 sintetiza o contraste entre os dois conjuntos de compromissos aplicados ao mesmo fenômeno. Convém sublinhar que a diferença entre as colunas não é de grau de sofisticação técnica, nem de atualidade da literatura, mas sim, que sintetizam dois modos distintos de recortar o objeto.

Dois conjuntos de compromissos sobre o mesmo fenômeno

dimensão	rota tradicional	rota da dissertação
unidade de análise	o componente isolado	a relação entre subsistemas
natureza da estabilidade	homeostase em torno de um ponto fixo	homeodinâmica: reorganização contínua
forma de causalidade	cadeia linear, causa localizável	circular, entre níveis
origem da ordem	controlador central, programa	auto-organização sob constrangimentos
estatuto da variabilidade	ruído a ser reduzido	estrutura funcional, exploração
estratégia de conhecimento	decompor e isolar variáveis	acompanhar variáveis coletivas
papel da informação	estímulo a ser representado	especifica a relação sujeito-ambiente
alvo da inferência	a média do grupo (ergodicidade suposta)	a trajetória do indivíduo
leitura da fadiga	falha de um subsistema	transição entre padrões de coordenação

Figura 9 — Compromissos ontológicos e epistemológicos das duas rotas. A escolha entre as colunas não decorre dos dados, mas os precede, determinando o que conta como explicação satisfatória. Fonte: elaborado pelo autor.

Consequentemente, ao adotar tal posição, a fadiga deixa de ser lida como falha de um subsistema e passa a ser lida como reorganização das relações entre subsistemas, o que não se trata de negar os achados das tradições clássicas do campo (periférica, central e psicobiológica), que são sólidas dentro de seus próprios recortes, mas de notar que a limitação compartilhada por elas não é empírica e sim ontológica e epistemológica, em que todas, seguem procurando uma causa localizável no interior do organismo e tratando o indivíduo como unidade estável e agrupável. Uma segunda consequência é metodológica, em que se o

objeto de análise se torna a relação entre componentes, o instrumento precisa medir tal relação, e não o estado de cada componente individualizado. É isso que o modelo HKB estendido oferece, ao fornecer uma variável coletiva (a fase relativa) definida entre sinais heterogêneos e rastreável ao longo do tempo (Fuchs et al., 1996; Kelso, 2021).

Shaw e Turvey (1999) distinguem três fontes de liberdade e de constrangimento que atuam sobre um sistema em mutualidade com o seu entorno, são eles, os campos de força externos (de origem física), campos de força internos (de origem biológica) e os campos de informação (de origem psicológica) (Araújo; Davids; Hristovski, 2006). Os mesmos autores acrescentam que, para interagir de modo significativo com o ambiente, um sistema biológico de movimento precisa possuir interiores complexos, como um potencial metabólico capaz de cancelar, modular ou retardar sua reação imediata às forças externas (Shaw; Turvey, 1999). Os subsistemas autonômico, neuromuscular e locomotor investigados aqui são precisamente esses interiores, de forma que a inferência dos acoplamentos entre eles não é uma alternativa à leitura ecológica, mas sim um modo de observar a capacidade que a própria perspectiva ecológica espera que o organismo tenha. A Figura 10 situa os sinais registrados dentro desse arranjo, e evidencia por que o protocolo desta dissertação, guiado pela percepção de esforço, mantém as três fontes presentes na sessão de coleta.

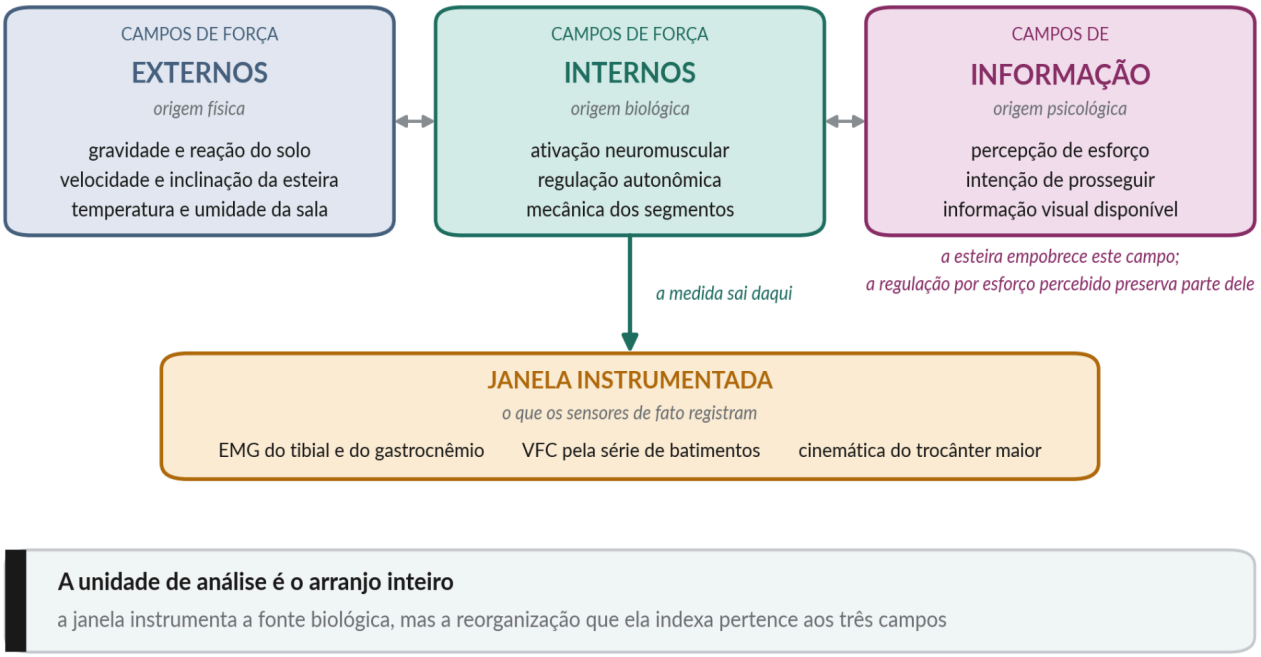


Figura 10 — O sistema corredor-tarefa e a janela instrumentada. As três fontes de constrangimento distinguidas por Shaw e Turvey (1999) tal como aparecem no protocolo desta dissertação. As estimativas de acoplamento são calculadas a partir da fonte biológica, enquanto a reorganização que elas indexam pertence ao arranjo inteiro. Fonte: elaborado pelo autor com base em Araújo, Davids e Hristovski (2006).

Vale registrar que essa posição não sustenta que a análise de componentes seja inútil, e sim que ela responde a uma pergunta diferente daquela formulada aqui. Assim como tampouco não se sustenta que a complexidade seja, por si só, uma explicação, pois nomear um sistema como complexo não explica coisa alguma. O compromisso assumido é o de adotar um formalismo que gere previsões verificáveis sobre como sinais fisiológicos e cinemáticos devem se comportar sob fadiga, caso a leitura relacional esteja correta. Como observaram Anderson (1999) e Chen e colaboradores (2007), a teoria dos sistemas complexos é menos uma teoria unificada do que uma perspectiva para teorizar e modelar sistemas dinâmicos, e é justamente por isso que sua aplicação exige um modelo específico e testável, e não somente uma mudança de vocabulário.

Por fim, essa posição explica a arquitetura da coletânea, em que os seis artigos que a compõem não são estudos independentes reunidos por afinidade temática, e sim desdobramentos sucessivos de um mesmo conjunto de compromissos. O Artigo 1 desenvolve a fundamentação teórica e o formalismo. O Artigo 2 descreve o *pipeline* computacional, isto é, os procedimentos pelos quais uma variável coletiva é extraída de sinais brutos heterogêneos. Os Artigos 3 e 4 aplicam o formalismo aos dados, no plano do acoplamento par a par e no plano multivariado, respectivamente. O Artigo 5 examina o que os marcadores isolados capturam e o que deixam escapar, oferecendo o contraste empírico direto entre as duas rotas da Figura 9. O Artigo 6 retoma as consequências da posição para pesquisas futuras. Em cada um deles, os compromissos aqui declarados são retomados no ponto em que orientam uma decisão concreta de análise ou de interpretação.

1.9 O Modelo Haken-Kelso-Bunz e o Formalismo da Fase Relativa

Entre as quatro rotas analíticas descritas adiante, a que exige mais detalhamento formal é a da fase relativa, e é dela que trata esta seção. O modelo HKB foi proposto por Haken, Kelso e Bunz (1985) para descrever as transições de fase observadas na coordenação bimanual rítmica. Ele trata dois componentes oscilatórios como um único sistema e comprime o estado desse sistema a uma variável coletiva, a fase relativa φ, cuja dinâmica é governada por um potencial:

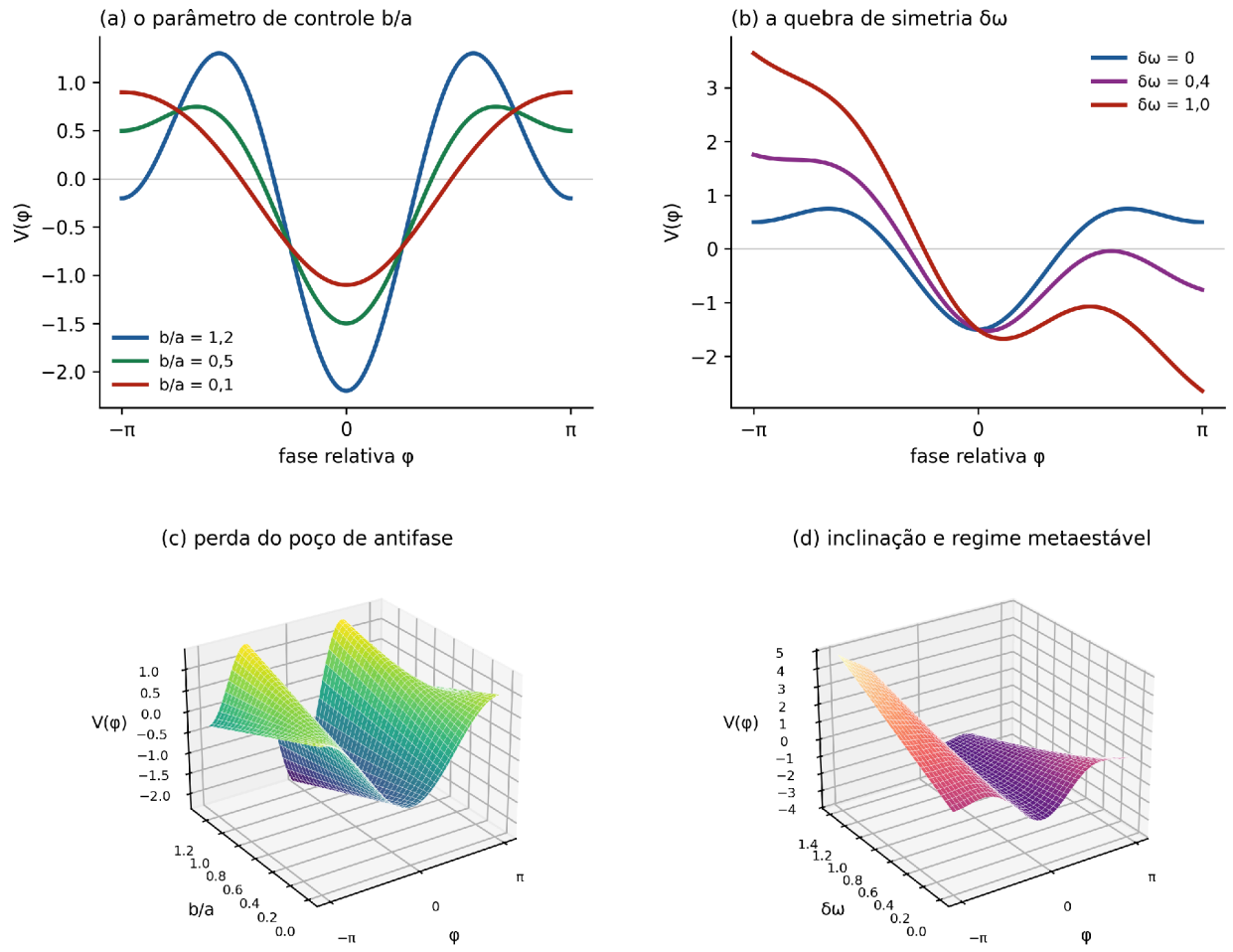


Figura 11 — A paisagem de potencial do modelo HKB estendido. Os painéis usam valores canônicos do modelo e não os parâmetros ajustados aos dados, porque nenhuma das rotas de estimação empregadas recupera a escala absoluta de a e de b, conforme estabelecido no Artigo 3. Em (a), a redução de b/a esvazia o poço de antifase e depois o de em-fase. Em (b), o termo δω inclina o potencial e desloca os mínimos, e quando a inclinação supera a profundidade dos poços não resta estado a ser alcançado, apenas tendências de atração remanescentes, que é o regime metaestável. Os painéis (c) e (d) mostram as mesmas duas operações como superfícies contínuas. Fonte: elaborada pelo autor.

$$V(\varphi) = -a \cdot \cos(\varphi) - b \cdot \cos(2\varphi) \qquad (1)$$

Os parâmetros a e b determinam a profundidade dos poços que correspondem aos dois padrões estáveis, em fase ($\varphi = 0$) e antifase ($\varphi = \pm\pi$), e a razão b/a governa qual deles sobrevive, quando ela diminui, o poço de antifase se desfaz e o sistema salta para o padrão em fase. Foi essa a previsão que os experimentos originais confirmaram ao aumentar a frequência do movimento, com as assinaturas esperadas de uma transição longe do equilíbrio, entre elas o aumento das flutuações e o alongamento do tempo de relaxamento do sinal nas proximidades do ponto crítico (Kelso, 1984; Schöner; Haken; Kelso, 1986).

A formulação acima, porém, carrega uma suposição que raramente se cumpre, isto é, as equações do modelo original são simétricas sob reflexão dos dois componentes, o que

equivale a supor que eles sejam idênticos, e essa é uma condição incomum nos sistemas vivos entendidos como complexos, onde as simetrias estão sendo quebradas o tempo todo (Kelso, 2013). Por exemplo, os músculos do tibial anterior e do gastrocnêmio medial não são osciladores idênticos, e tampouco o deslocamento de um segmento corporal. A extensão do modelo, proposta por Kelso, DelColle e Schöner (1990) e formalizada em desenvolvimentos posteriores (Fuchs et al., 1996; Zhang et al., 2019), incorpora essa assimetria por meio de um termo adicional:

$$V(\varphi) = -\delta\omega \cdot \varphi - a \cdot \cos(\varphi) - b \cdot \cos(2\varphi) \qquad (2)$$

O termo δω mede a diferença entre as frequências naturais dos dois componentes, deslocando os atratores para longe da fase e da antifase exatas (0° e 180° exatos, respectivamente) e vai encolhendo a bacia de atração até que o poço mais fraco, o de antifase, e depois o mais forte, o de fase, desapareçam, abrindo um regime metaestável que conserva tendências atratoras sem que nenhum estado seja efetivamente alcançado (Tognoli; Kelso, 2020; Kelso, 2022). A Figura 12 mostra esse encadeamento. É no jogo entre o acoplamento (expresso pela razão b/a), e o termo de quebra de simetria que a metaestabilidade se produz, e é essa versão do modelo que prevê a alternância fluida e convivência mútua entre cooperação e competição dos componentes ao longo do tempo, sem que nenhuma necessariamente se sobressaia sobre a outra, assim como também, sem que seja preciso postular um comando que a organize (Kelso, 2013).

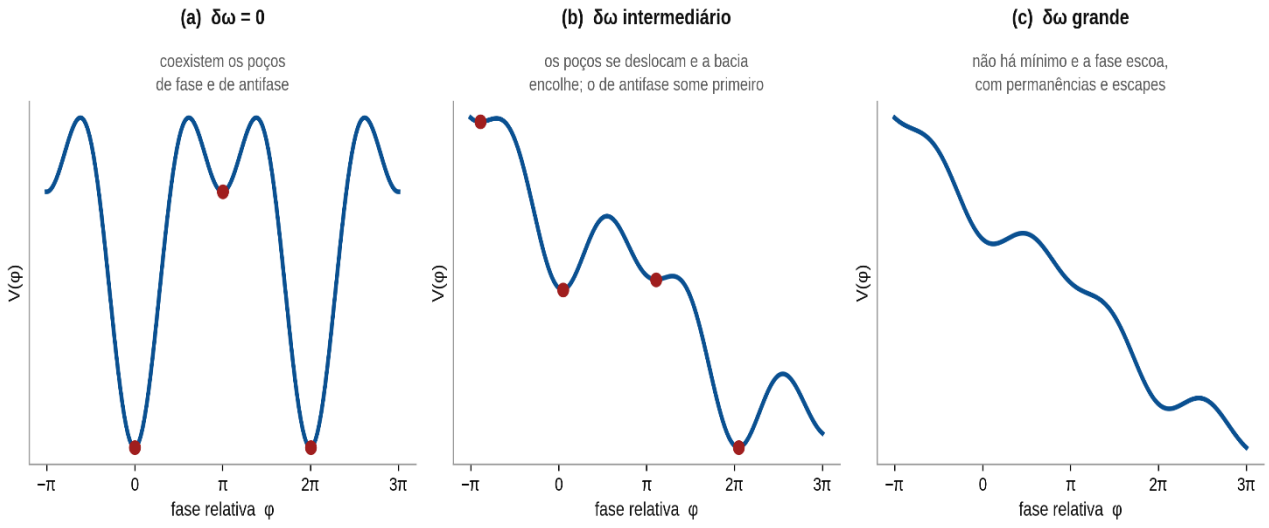


Figura 12 — O termo de quebra de simetria δω no potencial estendido, em que os pontos vermelhos marcam os mínimos do potencial, isto é, os estados mais estáveis de coordenação. Em (a), com δω nulo, coexistem os poços de fase e de

antifase. Em (b), os poços se deslocam e a bacia encolhe, com o de antifase desaparecendo primeiro. Em (c), não há mais o mínimo e a fase escoa, com permanências e escapes sucessivos. Fonte: elaborado pelo autor com base em Kelso, DelColle e Schöner (1990), Jeka, Kelso e Kiemel (1995) e Kelso (2013).

Quando $\delta\omega$ cresce o bastante, a fase relativa deixa de permanecer confinada e passa a crescer ou decrescer de forma contínua. Essas soluções de escoamento indicam perda de arrastamento entre os osciladores, isto é, o fim do regime em que um impõe seu ritmo ao outro, e são a assinatura da simetria quebrada (Carson et al., 1995). Jeka, Kelso e Kiemel (1995) descrevem o mesmo desfecho pelo lado do potencial, em que à medida que o poço assimétrico se torna raso, a fase relativa passa a rolar continuamente pela função, sem assumir valor de equilíbrio. O ponto é decisivo para o desenho desta dissertação, porque oferece uma previsão verificável, isto é, se a fadiga desfaz o ajuste mútuo entre os osciladores, $\delta\omega$ deve crescer e a fase deve escorrer a taxas cada vez maiores.

Entre o regime de travamento completo e o de escoamento livre existe um regime intermediário que a dinâmica coordenativa denomina metaestável, em que não há atratores no sentido estrito, e sim regiões do espaço de fases em que a fase relativa permanece por um tempo antes de escapar, alternando episódios de aproximação transitória entre os componentes e episódios de liberação dessa tendência (Kelso, 2012; Kelso, 2021). É um regime em que cooperação e autonomia coexistem em vez de se excluírem, e é o regime que a extensão do modelo HKB torna descritível, uma vez que ele só aparece quando $\delta\omega$ é diferente de zero. Consequentemente, para o presente trabalho, um sistema que se desloca em direção ao regime de metaestabilidade não necessariamente perde organização, mas sim troca uma forma de organização por outra, sendo distinto da degradação propriamente dita.

Uma consequência metodológica a ser declarada desde já diz respeito ao termo $-\delta\omega \cdot \varphi$, que é linear em φ e, portanto, não é periódico. Em outras palavras, ao enrolar a fase no intervalo de um ciclo para montar sua distribuição, esse termo perde referência, e qualquer coeficiente estimado a partir do histograma depende de onde o ciclo foi cortado. Mais que isso, a relação entre densidade e potencial que autoriza ler a forma do poço na distribuição vale para sistemas em equilíbrio, e com $\delta\omega$ diferente de zero e acoplamento fraco não existe distribuição de equilíbrio a inverter. O $\delta\omega$ só é alcançável pela ordem temporal das amostras, que o histograma descarta, e nesta dissertação é estimado pelo primeiro coeficiente de Kramers-Moyal sobre a série da fase relativa. Os parâmetros a e b, por sua vez, entram como índices relativos entre momentos de um mesmo participante, e não como grandezas físicas, ao passo que verificações em sinais sintéticos com valores conhecidos mostraram que nenhum dos dois caminhos de estimativa recupera sua escala absoluta. O procedimento de validação

por sinais sintéticos com parâmetros conhecidos, e a razão pela qual o ajuste pela distribuição devolve razões entre parâmetros e intensidade de ruído em vez dos parâmetros em si, estão descritos no Artigo 2 e no Artigo 6, e seguem a prática consolidada de testar estimadores de acoplamento contra realizações de parâmetro conhecido antes de aplicá-los a dados empíricos (Schreiber; Schmitz, 2000; Theiler et al., 1992).

A coerência de fase, calculada como o módulo do vetor médio da distribuição de φ, ocupa lugar distinto, ao passo de que não depende de ajuste algum, lida diretamente da série, e mede quanto a fase relativa permanece concentrada (valores próximos de um indicam travamento, valores próximos de zero indicam independência). Por essa razão ela é a medida primária de força de acoplamento adotada aqui, e o δω a acompanha como a quantidade que informa por que o travamento se desfaz. O formalismo é aplicado entre dois osciladores que só compartilham uma fase relativa bem definida quando suas frequências guardam uma razão inteira, e essa razão, na corrida, não é uma escolha do pesquisador. O gastrocnêmio medial dispara uma vez por passada, já o trocânter maior sobe e desce duas vezes na mesma passada, uma por passo. Medida em cento e cinco segmentos dos vinte e um participantes, a razão entre a frequência da cinemática e a do gastrocnêmio foi de dois para um em todos eles, sem exceção. Os três pares analisados e suas razões aparecem na Figura 13. A variável coletiva assume, nesses casos, a forma da diferença de fase generalizada, apresentada na Equação 3, formulação consolidada no estudo da sincronização n:m entre osciladores de frequências distintas (Rosenblum; Pikovsky; Kurths, 1996; Tass et al., 1998; Pikovsky; Rosenblum; Kurths, 2001) e aplicada a sinais fisiológicos por Bartsch et al. (2007). O tratamento de componentes com frequências próprias distintas em acoplamento um para um, por sua vez, se dá pelo termo de quebra de simetria discutido acima (Jeka; Kelso; Kiemel, 1995; Fuchs et al., 1996; Zhang et al., 2019).

$$\varphi\{n,m\}(t) = n \cdot \varphi A(t) - m \cdot \varphi B(t) \tag{3}$$

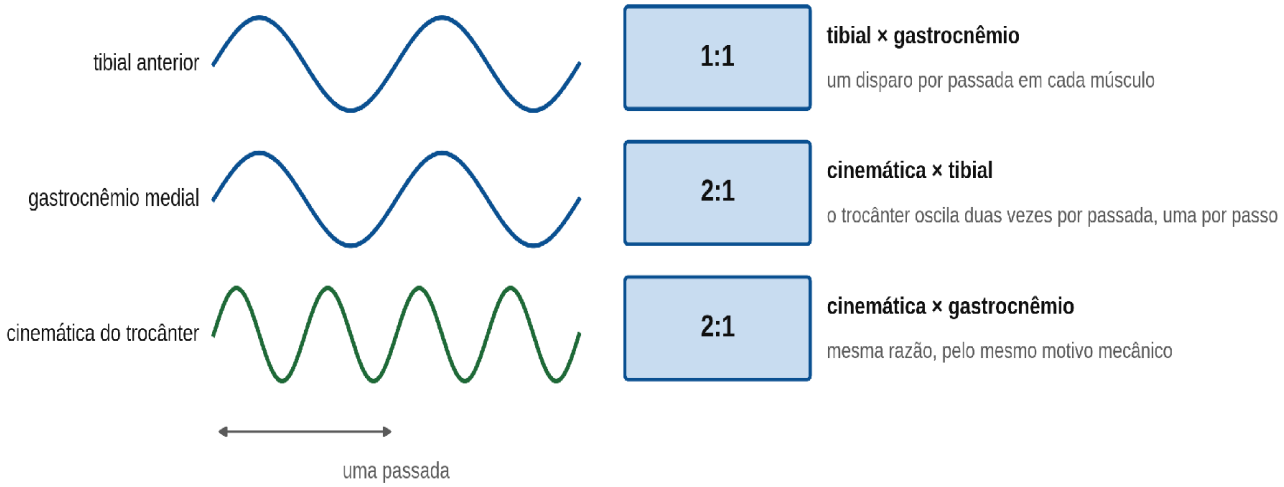


Figura 13 — Os três pares de acoplamento e suas razões. As razões decorrem de quantas vezes cada oscilador completa um ciclo por passada, e não de escolha do analista. A variabilidade da frequência cardíaca não compõe um par de fase e entra como descritor de estado. Fonte: elaborado pelo autor.

A variabilidade da frequência cardíaca não integra nenhum desses pares, isso por que a hipótese de acoplamento de fase cardiolocomotor foi testada em três formulações independentes, com a série interpolada, com a série de batimentos em razão de um para um e com busca de razões n:m, e reprovada nas três pelo teste de superfície. O resultado é coerente com o que se sabe sobre a organização em rede dos sistemas fisiológicos, na qual interações entre órgãos se estabelecem em escalas temporais próprias, fazendo com que nem toda dupla de sinais se acople por fase (Bashan et al., 2012; Bartsch et al., 2015; Ivanov, 2021). Contudo, os índices cardíacos, calculados segundo os padrões de medida e interpretação estabelecidos pela Task Force (1996), permanecem no trabalho como descritores do estado do sistema, papel em que a frequência média, os índices no tempo, o expoente de escala de curto prazo e a entropia amostral podem ser lidos sem supor uma relação que os dados não sustentam.

Uma última observação delimita o alcance do que a coerência entre dois músculos informa, em que ao medir que ambos estão travados no mesmo ritmo da passada, evidencia se esse travamento decorre de interação direta entre eles ou de ambos estarem presos ao ciclo da marcha, já que somente os sinais registrados não os distinguem. Numa leitura relacional isso não constitui defeito, já que a variável coletiva é a própria fase relativa e a pergunta por qual componente causa qual pressupõe a decomposição que este trabalho recusa.

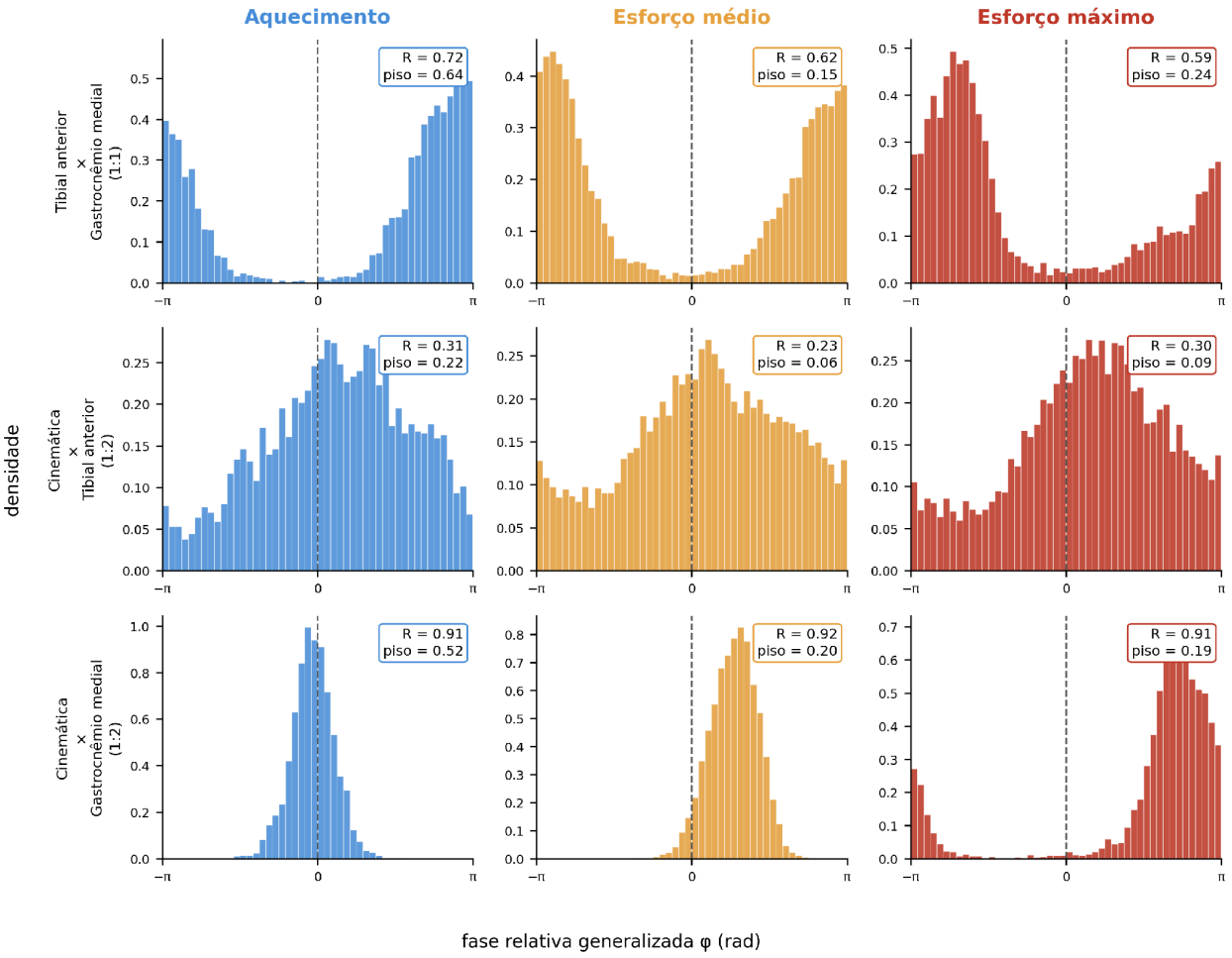


Figura 14 — Distribuição da fase relativa nos três pares motores. Cada painel traz a coerência observada e o piso de acaso obtido por deslocamento circular, com 200 realizações. O par entre os dois músculos concentra a fase próximo de π e o par entre cinemática e gastrocnêmio próximo de zero, ambos muito acima do piso, enquanto o par entre cinemática e tibial anterior distribui a fase de modo largo. Os valores são deste participante e não as medianas do grupo, reportadas no Artigo 3. Fonte: elaborada pelo autor a partir dos dados do participante P07, processados pela mesma cadeia descrita no Artigo 2 e auditada no Artigo 6.

1.9.1 As Quatro Rotas Analíticas e a Divisão de Trabalho entre Elas

Uma objeção precisa ser enfrentada antes que o desenho seja apresentado, porque ela atinge a coerência interna do trabalho. Se a posição adotada recusa a explicação por decomposição, por que a dissertação se organiza em torno de um modelo formal, e por que esse modelo é apresentado com mais detalhe que os demais procedimentos? Primeiramente, um modelo dinâmico não é um molde imposto ao fenômeno, e sim uma hipótese sobre a forma da dinâmica, que vale enquanto sobrevive ao teste. No caso específico do modelo HKB, ele prevê coisas específicas e testáveis, que dizem respeito à forma em que a fase relativa se comporta como variável coletiva, que os atratores se deslocam quando as frequências naturais divergem e que a estabilidade cai perto de uma transição. Esta coletânea

confirmou parte dessas previsões e derrubou outra parte, o que é precisamente a demonstração de que o modelo estava sendo usado como hipótese e não como moldura decorativa. Um formalismo que nunca pode falhar não descreve nada, e é essa a diferença entre aplicar um modelo e vestir um vocabulário.

Segundamente que, a análise de fase é uma entre quatro rotas adotadas para a presente dissertação, e nenhuma delas tem primazia explicativa do fenômeno sobre as demais. A Figura 15 dispõe das quatro e o que cada uma responde. A fase relativa localiza em que relação a organização cede, mas também é cega ao estado regulatório em que isso acontece. A projeção por componentes principais com kernel (PCA kernel) ordena os estados de esforço num espaço coletivo, mas não diz em qual relação a mudança ocorreu. Os índices estruturais da série de batimentos descrevem o estado da regulação autonômica, e nada dizem sobre a conversão de atividade muscular em movimento. Os marcadores subjetivos registram a fonte de restrição que cada indivíduo estava situado anteriormente à realização do teste, mas não se correlacionam com nenhuma das outras três. O achado mais nítido da coletânea, que a magnitude da variabilidade cardíaca se mantém enquanto a estrutura dela muda, não veio da análise de fase e não poderia ter vindo. O achado que localiza a dissociação entre o nível neural e o mecânico não veio dos índices estruturais e não poderia ter vindo. Sendo assim, tratar qualquer uma das rotas como "principal" a estrutura dos achados da presente dissertação seria descrever de forma incoerente o que o trabalho fez.

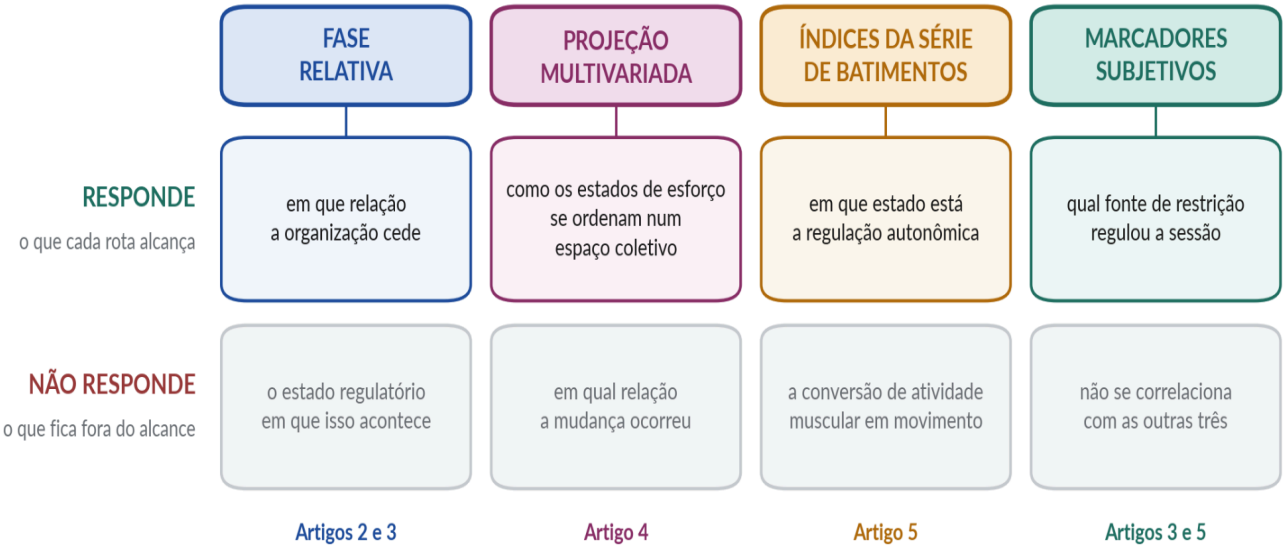


Figura 15 — As quatro rotas analíticas e o que cada uma responde. A divisão de trabalho entre elas organiza a coletânea, e o resultado central de cada artigo empírico depende de a pergunta ter sido dirigida à rota capaz de respondê-la.

1.10 Questão Norteadora, Objetivos e Hipóteses

O tema que organiza esta dissertação é a reorganização coordenativa do sistema corredor-tarefa sob esforço progressivo, examinada pelo acoplamento entre sinais de modalidades distintas. Dele decorre a questão norteadora: como se reorganiza, ao longo da progressão da fadiga em corrida, o acoplamento de fase entre a atividade dos músculos da perna e o deslocamento do segmento que essa atividade movimenta?

A primeira justificativa para a presente dissertação é de perspectiva teórica, compreendendo que em um século de investigação sobre a etiologia da fadiga, se produziu conhecimento abundante sobre componentes isolados, no entanto, sem responder por que o exercício termina quando termina, e a hipótese hoje mais defensável é a de que múltiplos processos e subsistemas partilham um papel distribuído nessa evolução, o que desloca a pergunta do componente para a relação entre componentes (Noakes, 2012; Enoka; Duchateau, 2016; Balagué et al., 2022; Venhorst; Micklewright; Noakes, 2018). A segunda é metodológica, ao passo que a Fisiologia de Redes vem demonstrando que estados e funções globais podem emergir de mudanças na forma funcional das interações fisiológicas sem que a topologia da rede se altere, o que exige uma metodologia capaz de quantificar o acoplamento, além da magnitude de variáveis (Bashan et al., 2012; Balagué et al., 2020). A terceira é empírica, entendendo que mesmo com o arcabouço formal estando disponível desde os anos oitenta, na formulação de Haken, Kelso e Bunz (1985) e, posteriormente, na sua extensão de Fuchs e colaboradores (1996), poucos foram os estudos que aplicaram tais modelos a sinais de múltiplas modalidades registrados simultaneamente durante fadiga progressiva em corrida, e menos ainda os que fizeram submetendo cada estimativa de acoplamento a teste de superfície.

O objetivo geral da dissertação foi o de analisar a reorganização do acoplamento de fase entre a atividade eletromiográfica do tibial anterior e do gastrocnêmio medial e a oscilação vertical do trocânter maior ao longo da progressão da fadiga em corredores recreativos, utilizando o Modelo HKB Estendido, situando essa reorganização no estado multivariado do sistema por análise de componentes principais com kernel. Os objetivos específicos, são o de a) estimar a coerência de fase dos três pares de acoplamento em cada um dos cinco segmentos do protocolo, com razões fixadas pela mecânica da corrida e cada estimativa confrontada com um piso de acaso obtido por deslocamento circular; b) estimar o termo de quebra de simetria $\delta\omega$ do modelo estendido pela dinâmica temporal da fase relativa, e verificar se ele cresce com o esforço; c) caracterizar o padrão de ativação do tibial anterior ao longo do protocolo pelo índice de bifasia, definido como a razão entre a potência do envelope do sinal na frequência dobrada da passada e a potência na própria frequência da

passada, e que cresce quando o músculo passa de um disparo por passada para dois, um a cada passo, tomando o gastrocnêmio medial como controle interno; d) descrever as trajetórias dos índices cardíacos e cinemáticos tomados isoladamente, incluindo o expoente de escala de curto prazo e a entropia amostral, e as comparar quanto ao poder de discriminar os estados do protocolo; e) projetar o estado multivariado de cada segmento em espaço de componentes principais com núcleo de base radial (RBF), com normalização dentro de cada participante, e verificar se a projeção ordena os estados fora da amostra usada para estimá-la; f) caracterizar as duas transições como janelas de instabilidade coordenativa, em análise descritiva complementar à comparação confirmatória entre os três estados estáveis.

A hipótese central é a de que a progressão da fadiga se expressa como reorganização do acoplamento entre os subsistemas instrumentados, e não como declínio uniforme de um marcador isolado, de modo que a coerência de fase e o termo de quebra de simetria devem variar sistematicamente entre os três estados estáveis. Dela decorrem três hipóteses derivadas. A primeira prevê que a coerência de fase diminua e que $\delta\omega$ aumente do Aquecimento ao Esforço Máximo, na direção que o modelo estendido associa à perda de arrastamento. A segunda prevê que as transições apresentem estimativas menos estáveis que os estados estáveis, conforme o alargamento das flutuações esperado nas proximidades de um ponto crítico. A terceira prevê que a projeção multivariada discrimine os estados do protocolo com maior nitidez do que qualquer variável isolada, o que constitui o contraste empírico direto entre as duas rotas discutidas na seção anterior. O que a análise encontrou a respeito dessa questão é reportado na seção 2.1 e na Tabela 2, e não aqui, para que a formulação prévia permaneça distinguível do resultado.

1.11 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é apresentada no formato coletânea de artigos, em conformidade com as diretrizes do Manual de Normalização da BIBESEFID/ESEFID/UFRGS (2023) e da NBR 14724/2011. Sendo composta por seis artigos científicos que, em conjunto, cobrem os aspectos teóricos, metodológicos e empíricos do programa de pesquisa:

- Artigo 1 — Revisão teórica integradora sobre fadiga como reorganização coordenativa, com a condição de definição da fase relativa como contribuição central. Periódico-alvo: *Nonlinear Dynamics*, *Psychology*, *and Life Sciences*;

- Artigo 2 — Descrição do *pipeline* computacional multimodal, dos critérios de processamento de cada modalidade e dos procedimentos de verificação adotados. Periódico-alvo: *Sensors* (MDPI);
- Artigo 3 — Análise empírica principal: acoplamento de fase dos três pares motores ao longo dos cinco segmentos, com razões fixadas pela mecânica, janelas de duração igual, teste de superfície e estimativa de $\delta\omega$ (n = 21). Periódico-alvo: *Frontiers in Physiology*;
- Artigo 4 — Análise multivariada por componentes principais com kernel: estados fisiológico-cinemáticos no espaço latente, com normalização intraindividual e validação cruzada (n = 21). Periódico-alvo: *Frontiers in Physiology*;
- Artigo 5 — Análise univariada comparativa: trajetórias dos índices cardíacos e cinemáticos como marcadores isolados de fadiga, incluindo os índices não lineares da série de batimentos. Periódico-alvo: *Frontiers in Physiology*;
- Artigo 6 — Reexame metodológico do *pipeline* de acoplamento: os quatro modos de falha identificados antes da submissão, o que sobreviveu à correção e as verificações que o campo deveria exigir. Periódico-alvo: *Frontiers in Network Physiology* (tipo Methods).

A Introdução Geral e as Considerações Finais Integradoras constituem, respectivamente, a base do Artigo 1 (revisão teórica) e do Artigo 6 (ensaio de perspectivas), ampliados e submetidos independentemente a periódicos científicos qualificados. As referências de cada artigo são apresentadas ao final do respectivo capítulo, nas normas do periódico-alvo. As referências gerais da dissertação, circunscritas às seções introdutória e conclusiva, são apresentadas ao final do documento.

Tabela 1 — Mapa de artigos da coletânea: tipos, periódicos-alvo, base de dados e idioma

Art.	Tipo	Periódico-Alvo	Dados	Idioma
1	Revisão Teórica	*Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*	Não	EN
2	Metodológico	*Sensors (*MDPI*)*	*Pipeline*	EN
3	Empírico Principal	*Frontiers in Physiology*	n = 21	EN
4	Multivariado	*Frontiers in Physiology*	n = 21	EN
5	Univariado	*Frontiers in Physiology*	n = 21	EN
6	Reexame metodológico	*Frontiers in Network Physiology*	Art. 3 a 5	EN

Nota. EN = inglês; PT = português. Os seis artigos usam a mesma base de vinte e um participantes, com exceção do Artigo 1, que é teórico, e do Artigo 2, que descreve o pipeline. Os periódicos-alvo foram definidos pela adequação de escopo e pelos limites de extensão de cada revista.

ARTIGO 1

Fadiga como Reorganização Coordenativa: O Modelo HKB Estendido Aplicado ao Acoplamento de Sinais Fisiológicos e Cinemáticos em Corrida

Fatigue as Coordinative Reorganization: The Extended HKB Model Applied to Physiological–Kinematic Coupling in Running

Periódico-alvo: Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences

Artigo de revisão teórica. Constrói o referencial que sustenta o uso do modelo HKB estendido para descrever a fadiga como reorganização coordenativa, e define as condições sob as quais uma medida de acoplamento tem leitura coordenativa.

Título em inglês: Fatigue as Coordinative Reorganization: The Extended HKB Model Applied to Physiological–Kinematic Coupling in Running

Fatigue as Coordinative Reorganization: The Extended Haken–Kelso–Bunz Model Applied to Neuromuscular and Locomotor Coupling in Running

Lucas Gonçalves Poli
Graduate Program in Human Movement Sciences (PPGCMH), School of Physical Education, Physiotherapy and Dance, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil

Jerri Luiz Ribeiro
Graduate Program in Human Movement Sciences (PPGCMH), School of Physical Education, Physiotherapy and Dance, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil

RUNNING HEAD: FATIGUE AS COORDINATIVE REORGANIZATION

Correspondence: Lucas Gonçalves Poli, PPGCMH/ESEFID, Federal University of Rio Grande do Sul, Rua Felizardo 750, Porto Alegre, RS 90690-200, Brazil. E-mail: lucaspoli7@gmail.com

Conteúdo suprimido nesta versão (texto parcial).
Manuscrito a ser submetido a periódico científico.
Texto integral disponível a partir de 30 de novembro de 2028.

ARTIGO 2

Pipeline Integrado Multimodal para Análise HKB de Sinais Fisiológicos e Cinemáticos em Corrida: Descrição, Validação e Resultados Piloto

An Open-Source Multimodal Pipeline for Extended HKB Analysis of Physiological–Kinematic Coupling in Running: Description, Validation, and Pilot Results

Periódico-alvo: Sensors (MDPI)

Artigo metodológico. Descreve e valida o pipeline computacional aberto que adquire, sincroniza e analisa conjuntamente variabilidade da frequência cardíaca, eletromiografia de superfície e cinemática dos membros inferiores durante corrida em esteira.

Título em inglês: An Open-Source Multimodal Pipeline for Extended HKB Analysis of Physiological–Kinematic Coupling in Running: Description, Validation, and Pilot Results

An Open-Source Multimodal Pipeline for Extended Haken–Kelso–Bunz Analysis of Physiological–Kinematic Coupling in Running: Description, Validation, and Pilot Results

Lucas Gonçalves Poli
Graduate Program in Human Movement Sciences (PPGCMH), School of Physical Education, Physiotherapy and Dance, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre 90690-200, Brazil; lucaspoli7@gmail.com.

Jerri Luiz Ribeiro
Graduate Program in Human Movement Sciences (PPGCMH), School of Physical Education, Physiotherapy and Dance, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre 90690-200, Brazil; jerri.ribeiro@ufrgs.br.

Ana Tereza Oliveira
Graduate Program in Human Movement Sciences (PPGCMH), School of Physical Education, Physiotherapy and Dance, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre 90690-200, Brazil;

Douglas Zanella Sbrissa
Graduate Program in Human Movement Sciences (PPGCMH), School of Physical Education, Physiotherapy and Dance, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre 90690-200, Brazil;

Conteúdo suprimido nesta versão (texto parcial).

Manuscrito a ser submetido a periódico científico.

Texto integral disponível a partir de 30 de novembro de 2028.

ARTIGO 3

A Fadiga como Reorganização Coordenativa: Acoplamento Haken-Kelso-Bunz Estendido de Sinais Autonômicos, Neuromusculares e Cinemáticos ao Longo de um Protocolo de Corrida Guiado pela Percepção de Esforço

Fatigue as Coordinative Reorganization: Extended Haken-Kelso-Bunz Coupling of Autonomic, Neuromuscular, and Locomotor Signals Across a Perceptually Guided Running Protocol

Periódico-alvo: Frontiers in Physiology

Artigo empírico principal. Estima os parâmetros do modelo HKB estendido para os três pares motores cujas razões de frequência decorrem da mecânica da passada, e mostra que o acoplamento não decai de modo uniforme sob fadiga, mas se dissocia.

Título em inglês: Fatigue as Coordinative Reorganization: Extended Haken-Kelso-Bunz Coupling of Autonomic, Neuromuscular, and Locomotor Signals Across a Perceptually Guided Running Protocol

Quadro 1 — Plano de inferência do Artigo 3: pares de acoplamento, razões de frequência fixadas pela mecânica da passada, correção para múltiplas comparações e estatística primária.

Par	Razão n:m	Correção (Holm, 1979)	n	Inferência primária
Tibial × Gastrocnêmio	1:1	Holm: 0,0167 / 0,025 / 0,05	21	η^2p observado + IC 95%
Cinemática × Tibial	2:1	sobre a família dos três pares	21	η^2p observado + IC 95%
Cinemática × Gastrocnêmio	1:2	(mesma família)	21	η^2p observado + IC 95%

Selective Dissociation of Intermuscular and Muscle-to-Movement Coupling under Progressive Fatigue in Running: an Extended Haken-Kelso-Bunz Analysis

Lucas Goncalves Poli and Jerri Luiz Ribeiro

Graduate Program in Human Movement Sciences (PPGCMH), School of Physical Education, Physiotherapy and Dance, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil

Conteúdo suprimido nesta versão (texto parcial).

Manuscrito a ser submetido a periódico científico.

Texto integral disponível a partir de 30 de novembro de 2028.

ARTIGO 4

Um Eixo de Acoplamento Distinto da Intensidade: Análise de Componentes Principais por Kernel do Espaço de Estados Fisiológico-Cinemático durante a Fadiga em Corrida

A Coupling Axis Distinct From Intensity: Kernel Principal Component Analysis of the Physiological-Kinematic State Space During Running Fatigue

Periódico-alvo: Frontiers in Physiology

Artigo empírico multivariado. Projeta nove variáveis de estado por análise de componentes principais com kernel e recupera um eixo de acoplamento que ordena os três estados de esforço sem que nenhuma variável de intensidade entre na matriz.

Título em inglês: A Coupling Axis Distinct From Intensity: Kernel Principal Component Analysis of the Physiological-Kinematic State Space During Running Fatigue

Quadro 2 — Composição da matriz de observação do Artigo 4: origem das variáveis de estado, variáveis por origem e quantidade.

Origem	Variáveis	Qtd.
Acoplamento	Coerência dos três pares motores	3
VFC — magnitude	Ln rMSSD, Ln SDNN	2
VFC — estrutura	DFA α1, entropia amostral	2
EMG	Índice de bifasia do tibial anterior	1
Cinemática	Amplitude de oscilação vertical	1
Protocolo (fora da projeção)	FC média, frequência de passada	2

A Coupling Axis Independent of Imposed Intensity: Kernel Principal Component Analysis of the Physiological-Kinematic State Space During Running Fatigue

Lucas Goncalves Poli and Jerri Luiz Ribeiro

Graduate Program in Human Movement Sciences (PPGCMH), School of Physical Education, Physiotherapy and Dance, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil

Conteúdo suprimido nesta versão (texto parcial).

Manuscrito a ser submetido a periódico científico.

Texto integral disponível a partir de 30 de novembro de 2028.

ARTIGO 5

O Que os Marcadores Isolados Medem, e o Que Escapa a Eles: Variabilidade da Frequência Cardíaca e Cinemática da Corrida frente a uma Dimensão Coletiva de Acoplamento durante a Fadiga

What Isolated Markers Measure, and What They Miss: Heart-Rate Variability and Running Kinematics Against a Collective Coupling Dimension During Fatigue

Periódico-alvo: Frontiers in Physiology

Artigo empírico complementar. Compara os marcadores isolados de uso corrente com a dimensão coletiva de acoplamento, e identifica quais índices de variabilidade cardíaca acompanham a reorganização e quais não a acompanham.

Título em inglês: What Isolated Markers Measure, and What They Miss: Heart-Rate Variability and Running Kinematics Against a Collective Coupling Dimension During Fatigue

Magnitude Holds While Structure Moves: Which Heart-Rate-Variability Indices Track Coordinative Reorganization During Running Fatigue

Lucas Goncalves Poli and Jerri Luiz Ribeiro

Graduate Program in Human Movement Sciences (PPGCMH), School of Physical Education, Physiotherapy and Dance, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil

Conteúdo suprimido nesta versão (texto parcial).

Manuscrito a ser submetido a periódico científico.

Texto integral disponível a partir de 30 de novembro de 2028.

ARTIGO 6

Estimativas de Acoplamento sem Piso de Acaso: Quatro Modos de Falha na Análise de Fase de Sinais Fisiológicos Multimodais

Coupling Estimates Without a Chance Floor: Four Failure Modes in Phase Analysis of Multimodal Physiological Signals

Periódico-alvo: Frontiers in Network Physiology

Reexame metodológico. Documenta os quatro modos de falha identificados na auditoria do pipeline de acoplamento, conduzida antes da submissão, e formula as verificações correspondentes como perguntas dirigíveis a qualquer estimativa de fase.

Título em inglês: Coupling Estimates Without a Chance Floor: Four Failure Modes in Phase Analysis of Multimodal Physiological Signals

Coupling Estimates Without a Chance Floor: Four Failure Modes in Phase Analysis of Multimodal Physiological Signals

Lucas Gonçalves Poli and Jerri Luiz Ribeiro
Graduate Program in Human Movement Sciences (PPGCMH), School of Physical Education, Physiotherapy and Dance, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil
Correspondence: Lucas Gonçalves Poli, lucaspoli7@gmail.com

Conteúdo suprimido nesta versão (texto parcial).

Manuscrito a ser submetido a periódico científico.

Texto integral disponível a partir de 30 de novembro de 2028.

2 CONSIDERAÇÕES FINAIS INTEGRADORAS

As Considerações Finais Integradoras articulam os achados dos seis artigos sob a mesma posição ontológica e epistemológica declarada na Introdução Geral, e sintetizam o que a coletânea estabeleceu, distinguindo o que foi confirmado do que foi contrariado. Também, elas prestam contas dos objetivos específicos, incluindo aqueles que não se sustentaram. Por fim, elas registram o que o reexame metodológico alterou, uma vez que a análise aqui apresentada não é a primeira que este trabalho produziu.

2.1 Síntese dos Achados

O programa partiu da pergunta se a fadiga em corrida é mais bem descrita como reorganização do acoplamento entre subsistemas do que como declínio de qualquer subsistema tomado isoladamente. A resposta é afirmativa, com um alcance mais restrito do que a formulação inicial da pergunta supunha.

O Artigo 1 estabeleceu o referencial e o Artigo 2 tornou a pergunta operacional, na medida em que o *pipeline* permitiu estimar o acoplamento entre sinais de naturezas distintas numa base temporal comum, com as decisões de filtragem, segmentação, razão de frequências e estimação declaradas e justificadas uma a uma. Isso importa mais do que uma seção de método costuma importar, porque a seção 2.3 mostra que foram exatamente essas decisões que determinaram o que a primeira rodada de análises encontrou.

A dissociação seletiva é o achado central, em que o Artigo 3 mostra que o acoplamento não afrouxa de modo uniforme sob fadiga. A coerência de fase entre o tibial anterior e o gastrocnêmio medial se mantém praticamente constante do Aquecimento ao Esforço Máximo, movendo-se de 0,97 para 0,96, com queda em 17 dos 21 participantes e efeito padronizado de 0,45. No mesmo intervalo, a coerência entre cada músculo e o deslocamento vertical do trocânter se degrada de 0,82 para 0,54 e de 0,95 para 0,73, com queda em 20 dos 21 participantes nos dois casos. A sinergia entre os dois músculos é preservada, e o que cede é a conversão dela em movimento. Os dois níveis pertencem ao mesmo sistema e se comportam de maneira oposta, e nenhum marcador de domínio único poderia registrar essa diferença.

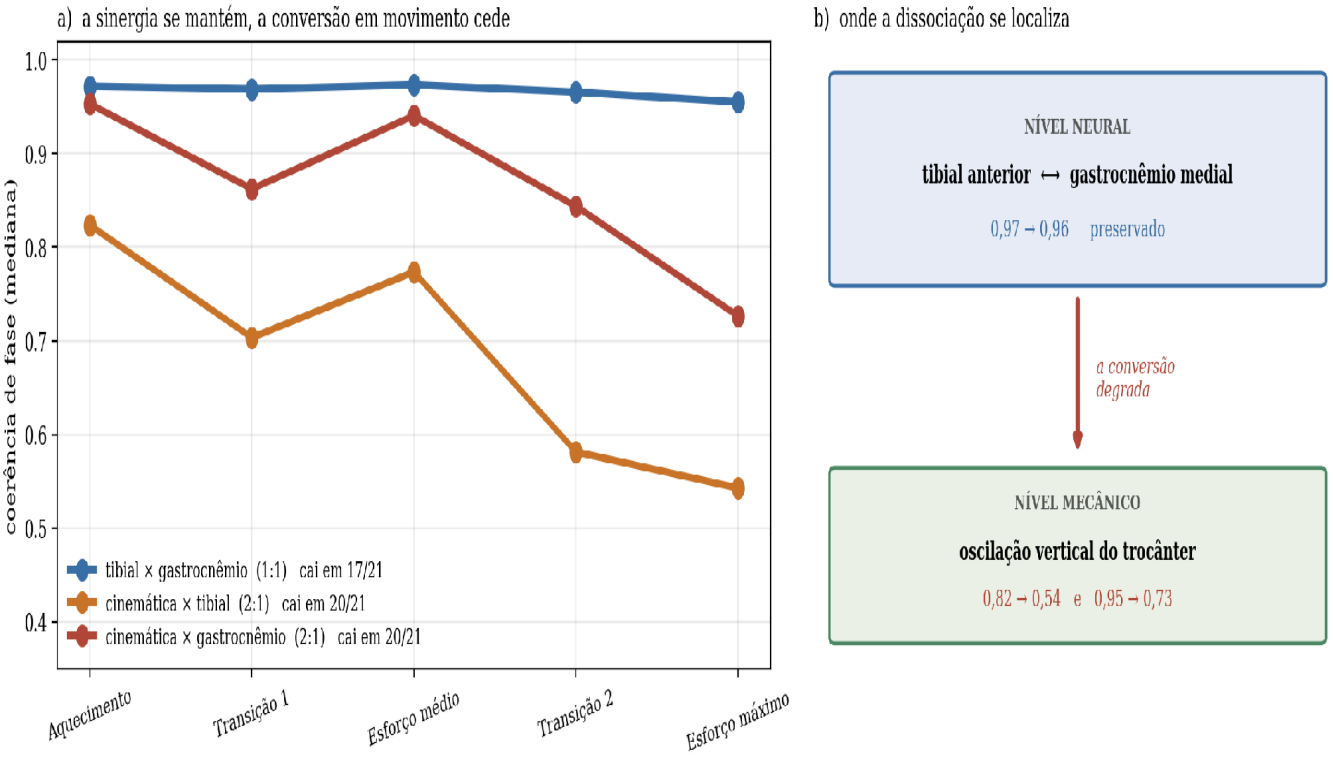


Figura 16 — A fadiga não afrouxa o acoplamento de modo uniforme. Em (a), a coerência mediana dos três pares ao longo dos cinco segmentos do protocolo, com o número de participantes em que cada par cai do Aquecimento ao Esforço Máximo. Em (b), onde a dissociação se localiza: a relação preservada e a que cede pertencem a níveis distintos do mesmo sistema.

O termo de quebra de simetria $\delta\omega$, que representa a diferença entre as frequências naturais dos dois osciladores e é próximo de zero no início, cresce do Aquecimento ao Esforço Máximo em 16, 17 e 14 dos 21 participantes. As contagens expressam em quantos participantes a direção da mudança individual acompanhou a do grupo, e não a magnitude dessa mudança. A confirmação vem da estimativa independente de que a taxa de deriva da fase relativa acelera por um fator de 2,2 do primeiro ao último terço do registro, que é o que a dessintonia crescente produz e o que um desvio instrumental constante não produziria. Vale registrar que essa verificação nasceu de uma hipótese alternativa que a análise descartou, a de que a deriva observada fosse artefato de descompasso entre relógios da câmera e do eletromiógrafo.

As transições se comportam como a teoria prevê, ao passo de que a Transição 1 fica abaixo de ambos os estados que a flanqueiam em 16 dos 21 participantes num par cinemático e em 20 dos 21 no outro. É a perda de estabilidade que a leitura de transição de fase associa à proximidade de um ponto crítico, e o registro dela num protocolo de campo, sem manipulação

experimental de um parâmetro de controle, é o que a coletânea tem de mais próximo de uma confirmação da moldura teórica que adotou.

A rota multivariada chega ao mesmo lugar por um caminho independente, por razão do Artigo 4, que projeta nove variáveis normalizadas dentro de cada participante e recupera três estados que se separam no plano latente, com silhueta de 0,31 e índice de Rand ajustado de 0,59 contra os rótulos verdadeiros. O primeiro componente ordena os estados com ρ = 0,81 e sobe em 20 dos 21 corredores, sem que qualquer variável de intensidade participe da matriz. A convergência entre as duas rotas merece registro porque elas compartilham dados, mas não método, isto é, uma estima fase par a par, enquanto a outra projeta amplitudes normalizadas num espaço não linear. A decisão que faz a análise funcionar é a normalização dentro do participante, em que sobre valores absolutos, o kernel não supera a projeção linear e a estrutura recuperada descreve diferenças entre pessoas e não trajetórias de estado.

O Artigo 5 estabelece um resultado sobre a escolha do índice, e não sobre a escolha do instrumento, em que quatro índices calculados da mesma série de batimentos, nas mesmas janelas e nos mesmos participantes, deram respostas opostas sobre se algo aconteceu. O Ln rMSSD, que é o índice mais recomendado no monitoramento aplicado, não se moveu, com um eta-quadrado parcial de 0,124, p de Friedman de 0,72, com queda em 12 dos 21 participantes e aumento em 9, proporção indistinguível da que se obteria ao sortear a direção da mudança ao acaso. Sendo assim, o Ln SDNN se moveu fracamente e na direção contrária à retirada vagal esperada. O expoente de escala de curto prazo caiu em 16 dos 21 e a entropia amostral em 17 dos 21, ambos com p abaixo de 0,005. Num protocolo levado à exaustão voluntária, a quantidade de variabilidade se manteve enquanto a organização dela mudou.

A mediana do grupo para o expoente de escala de curto prazo da DFA, calculada sobre a série de intervalos entre batimentos, é de 0,743 no Aquecimento, valor que a literatura de intensidade de exercício associa ao primeiro limiar, e cai para 0,558 no Esforço Máximo, com sete dos 21 participantes entrando na região anti correlacionada abaixo de 0,5. A comparação entre as famílias de medida corrige uma expectativa que a coletânea carregava desde o desenho, isto é, a dimensão coletiva de acoplamento explica 79% da frequência de passada e 72% da frequência cardíaca média, que são as duas grandezas que o protocolo impõe, e apenas 6 a 9% do expoente de escala, do Ln SDNN e do Ln rMSSD. Acrescentar uma medida de acoplamento a um conjunto que já registra frequência cardíaca e cadência adiciona pouco, porque as três acompanham a mesma progressão de esforço. A redundância é substancial numa direção e desprezível na outra, e é a assimetria, e não qualquer um dos dois números tomados em separado, que a análise estabelece.

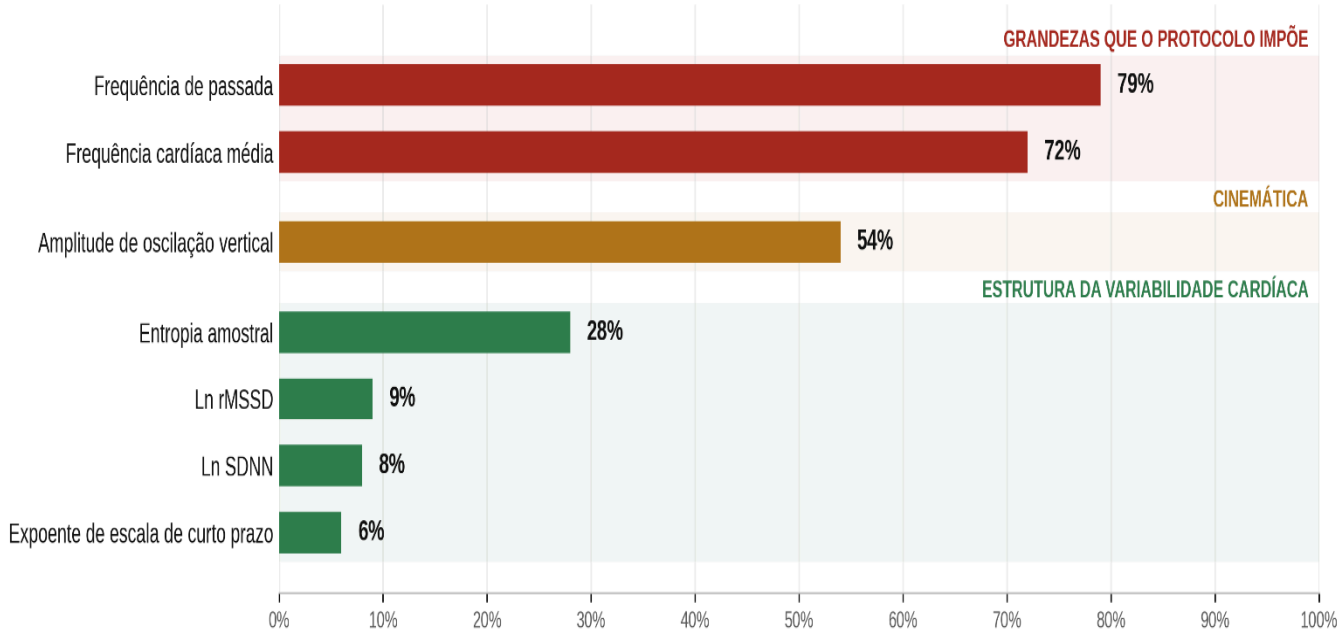


Figura 17 — As quatro famílias de medida e a assimetria da redundância. A dimensão coletiva de acoplamento é largamente redundante com as grandezas que o protocolo impõe e quase ortogonal aos índices que descrevem a estrutura da variabilidade cardíaca. A fadiga relatada sobe de forma consistente e não acompanha a mudança no acoplamento.

A quarta família fecha o quadro pelo lado que a moldura ecológica torna explícito, ao passo de que a fadiga subjetiva subiu de 2,95 para 7,90 na subescala do inventário de estados de humor, com $t(20) = 3,93$, $p = 0,0008$ e diferença padronizada intra participante de 0,86, enquanto o vigor não caiu. A mudança relatada não se correlacionou com a mudança no acoplamento, com ρ de 0,06 e p de 0,78. O desenho metodológico da presente dissertação age a partir da alteração do acoplamento percepção-ação, especificamente sobre quais informações o comportamento se acopla. Sendo uma restrição externa fixada pelo pesquisador, o corredor se regula em relação a partir da velocidade imposta pela esteira, que por sua vez, é delimitada por sua própria percepção de esforço, a regulando em relação à informação gerada pela sua própria atividade enquanto em curso. Como a fadiga relatada não acompanha nenhuma das outras três famílias, um esquema de monitoramento que registre

apenas variáveis fisiológicas deixa de fora justamente a informação que determinou o ritmo de cada participante ao longo da sessão, uma vez que foi a percepção de esforço, e não um critério externo, que fixou a passagem de um segmento para o outro.

2.2 Prestação de Contas dos Objetivos

Os objetivos específicos desta dissertação foram formulados antes da análise, e são aqui confrontados com o que os artigos entregaram, e seis dos sete se cumpriram. No entanto, um deles se cumpriu com resultado contrário ao esperado, e uma expectativa adicional não se sustentou.

Tabela 2 — Prestação de contas dos objetivos específicos

Objetivo	Artigo	Situação	O que foi entregue
a) coerência dos três pares nos cinco segmentos	**A3**	atingido	os três pares, com razões fixadas pela mecânica e piso de acaso por surrogado
b) estimar δω e verificar se cresce com o esforço	**A3**	atingido	cresce em 16, 17 e 14 dos 21; a deriva de fase acelera 2,2 vezes
c) padrão de ativação do tibial anterior	**A3**	atingido	índice de bifasia, com o gastrocnêmio medial como controle interno
d) trajetórias dos índices isolados	**A5**	atingido, com resultado contrário ao esperado	a magnitude não se move e a estrutura se move; Ln rMSSD com p = 0,72
e) projeção do estado multivariado	**A4**	atingido	os três estados se separam (silhueta 0,31; ARI 0,59) após normalização intraindividual
f) transições como janelas de instabilidade	**A3**	atingido	a Transição 1 fica abaixo de ambos os vizinhos em 16/21 e 20/21
Expectativa adicional: o acoplamento carrega informação que os marcadores convencionais não têm	**A5**	não se sustentou	redundância de 88% com o conjunto convencional; o que sobrevive é a assimetria

Nota. Cada objetivo foi formulado antes da análise corrigida e é aqui confrontado com o que os artigos entregaram. A coluna de situação distingue o que foi atingido, o que foi atingido com resultado contrário ao esperado e o que não se sustentou. Fonte: elaborado pelo autor.

No entanto, uma expectativa não se sustentou, esperávamos que a medida de acoplamento carregasse informação que o conjunto convencional de marcadores não tem. Com a análise corrigida, sete marcadores explicam 88% da dimensão coletiva, e os dois impostos pelo protocolo sozinhos explicam 79%. A alegação não se sustenta na forma em que foi feita, assim, o que a coletânea pode reivindicar depois dessa comparação é mais estreito do que o que ela reivindicava antes, isto é, a análise de acoplamento não vence o monitoramento convencional no terreno de detectar que o esforço está subindo. No entanto, a primeira faz

algo que a segunda não, que é dizer em que ponto da cadeia do músculo ao movimento a organização está cedendo.

Convém, no entanto, explicitar também, o que a análise de acoplamento faz e que nenhuma das outras rotas faz, uma vez que a assimetria da redundância poderia ser lida como argumento contra ela. A primeira é localizar, a medida em que os marcadores convencionais informam que o esforço subiu, e apenas a análise par a par informa que a relação entre os dois músculos se manteve enquanto a relação de cada um deles com o movimento cedeu, o que situa a reorganização num ponto específico da cadeia. A segunda é datar, ao passo de que a instabilidade da Transição 1 aparece numa janela do protocolo e não em outra, e nenhum marcador isolado marca esse instante. A terceira é fornecer o mecanismo a medida em que o crescimento de $\delta\omega$ não é uma descrição do que aconteceu, mas uma grandeza do modelo que prevê a perda de travamento e que pode ser verificada por uma segunda via independente, como de fato foi.

2.3 O Que o Reexame Metodológico Alterou

A análise apresentada nesta dissertação não é a primeira que este trabalho produziu, pois em uma primeira roda de análises concluída e aqui redigida, os autores conduziram um reexame sistemático das decisões do *pipeline* antes de submeter qualquer artigo, e os resultados daquela primeira rodada não sobreviveram a esse reexame. Quatro decisões do *pipeline* construíram os resultados da primeira rodada, e a primeira foi decisão da banda de análise, em que uma faixa fixa de 1,2 a 3,5 Hz, escolhida por conter as frequências de passada de corredores adultos, contém o ritmo dos sinais motores e não contém nada da série de batimentos, cuja variabilidade habita entre 0,04 e 0,4 Hz. Três dos seis pares então analisados eram estimativas de fase de ruído filtrado, no entanto um ruído não se correlaciona com nada, ou seja, a aparente independência em relação aos marcadores convencionais, e assumida forma de U evidenciada, nada mais foi do que um explícito erro metodológico. A segunda foi a razão das frequências, em que a fase relativa só é definida entre osciladores cujas frequências guardam razão inteira, e a primeira rodada calculou todos os pares em 1:1. No entanto, o gastrocnêmio guarda a razão de 1:2 com o quadril em 105 de 105 segmentos, e nunca 1:1, porque o trocânter completa uma oscilação por passo e, portanto, duas por passada. A razão é uma propriedade da mecânica da corrida e não parâmetro a ser estimado dos dados, e estimá-la dos picos espectrais reintroduz o problema sempre que um sinal é bifásico, como o tibial anterior é em 34 dos 105 segmentos. A terceira foi o ajuste do potencial, em que a relação de Boltzmann que liga a distribuição estacionária da fase relativa ao potencial carrega

uma constante de normalização, que ao se tomar logaritmos vira um termo aditivo e precisa aparecer na matriz de delineamento. A primeira implementação, no entanto, o omitiu. Em simulações de Langevin com resposta conhecida, a versão sem o termo constante devolve um coeficiente de magnitude comparável e sinal invertido, em 30 das 30 realizações. A correção trouxe uma segunda lição que consideramos a mais importante das duas, evidenciando que antes da correção o ajuste convergia em 96,2% dos segmentos, e depois em 45,4%. A taxa alta não era evidência de que o modelo descrevia os dados, e sim de que o critério de aceitação havia sido calibrado contra o estimador enviesado. Em outras palavras, se evidenciou que um procedimento que quase sempre converge não está testando nada. A quarta foi a duração das janelas, em que a coerência é enviesada para cima em registros curtos, algo a ser considerado tendo em vista que, por desenho, os cinco segmentos têm durações diferentes. Sendo assim, comparar o aquecimento de três minutos com o esforço moderado de dez constrói no contraste uma diferença sistemática que nada tem a ver com coordenação expressa no próprio teste. Por isso que estimar a coerência sobre sub janelas fixas de 90 segundos comprimiu os tamanhos de efeito dos pares cinemáticos em cerca de um terço. A direção do achado sobreviveu, mas um terço do efeito reportado ainda era artefato do relógio.

A qualidade do rastreamento óptico se degrada com a fadiga, com a confiança média caindo de 0,84 para 0,77, o que levantava a possibilidade de que a queda no acoplamento músculo-movimento fosse, na verdade, queda na visão que a câmera tem do movimento. A hipótese não se sustentou, na medida em que a correlação entre a mudança na confiança do rastreamento e a mudança na coerência é de −0,04 e −0,05 nos dois pares cinemáticos, e a queda da coerência foi inclusive mais acentuada no subgrupo cujo rastreamento se manteve estável. Separadamente, o registro cardíaco continua depois que a esteira era parada, enquanto o vídeo não, de modo que uma janela sem limite para o Esforço Máximo engole batimentos de recuperação, ou seja, limitar a janela cardíaca ao fim da corrida levou, por exemplo, o expoente de escala de um participante de 1,31 para 0,92 e fortaleceu o resultado de grupo. Nenhuma das alegações da primeira rodada foi publicada, pois o reexame ocorreu antes da submissão, e os artigos que compõem esta coletânea carregam apenas a análise corrigida. O que se apresenta aqui, portanto, não é a correção de uma literatura, e sim o registro de quão perto um conjunto de artefatos chegou de entrar nela.

2.4 Limitações do Estudo

A amostra de 21 participantes válidos resulta de 23 coletas, com exclusão de duas por corrupção do sinal do gastrocnêmio medial no Esforço Máximo, o que corresponde a 8,7% da amostra coletada, uma delas também com perda da série de batimentos. O tamanho é adequado para os efeitos observados nos pares cinemáticos, cujos tamanhos padronizados ficam entre 0,86 e 1,10, e é modesto para o par intermuscular, cujo efeito é de 0,45. Os tamanhos de efeito são reportados com intervalo de confiança em vez de análise de poder posterior, tanto porque o intervalo já carrega a informação que o cálculo de poder tentaria recuperar (Lakens, 2013) quanto porque o poder calculado a partir do efeito observado é função monótona do valor de p e nada acrescenta à leitura (Hoenig; Heisey, 2001).

Os três estados estáveis são três posições ao longo de um contínuo de esforço, amostradas uma vez cada por participante, de modo que nada aqui informa sobre como essas grandezas se comportam entre dias ou ao longo de um ciclo de treinamento, que é a escala de tempo em que o monitoramento aplicado opera. Os índices cardíacos foram calculados sobre janelas de 180, 600 e cerca de 200 segundos, o que é adequado para o expoente de escala e está próximo do limite inferior para a entropia amostral. A comparação de sensibilidade entre famílias é estruturalmente injusta com qualquer marcador que não acompanhe a intensidade imposta, já que o protocolo gradua intensidade que fora propriamente ritmada pela percepção de esforço, e que sobe junto com a frequência cardíaca. A dimensão coletiva compartilha quatro das suas nove variáveis de entrada com os índices cardíacos contra os quais é comparada, o que contamina por construção os números de redundância naquela direção, tratamos disso lendo a assimetria em vez de qualquer dos números isoladamente, e registrando que a construção compartilhada torna a ortogonalidade cardíaca um teto e não um piso.

Tudo aqui vem de uma sessão única de laboratório em esteira, tendo sua velocidade fixada e, naturalmente, retirando do corredor possíveis graus de liberdade que poderiam ser enfatizados em uma corrida ao ar livre, ou seja, parte do que aqui se observou pode ser propriedade do ergômetro. A análise corrigida não foi auditada por ninguém externo ao projeto, ou seja, as mesmas pessoas que deixaram passar quatro erros na primeira rodada construíram a segunda, e as verificações que aplicamos agora são as que sabemos aplicar. O código de análise e as matrizes derivadas foram depositados para que a segunda rodada pudesse ser examinada como a primeira não foi. Por fim, a decomposição da variância dessas grandezas mostra que a fração intra individual varia de 0,27 para a amplitude vertical a 0,78 para a entropia amostral, com sete das dez variáveis abaixo de 0,5. Sendo assim, cerca de metade do que se mede é trajetória e metade é identidade, nesse cenário o agrupar sob essas

condições pressupõe ergodicidade, suposição que, até onde sabemos, nunca foi explicitamente testada em campos científicos da fisiologia do exercício. É por isso que toda comparação nesta coletânea é reportada como contagem de participantes ao lado de uma mediana, e não como média com erro padrão.

2.5 Perspectivas Futuras

As direções futuras se organizam pelo que o *pipeline* corrigido já permite fazer, uma vez que a viabilidade técnica delimita o que pode ser proposto como continuidade. No plano metodológico, três extensões estão ao alcance imediato. O termo de quebra de simetria é hoje estimado como constante dentro de cada segmento, e deixá-lo variar no tempo testaria se a dessintonia se acumula de forma suave ou em degraus. A análise trata cada par separadamente e depois os projeta em conjunto, e uma formulação que estime a dinâmica multi-oscilador de uma vez respeitaria o fato de que os três pares não são independentes. E a bifasia do tibial anterior, que entrou neste projeto como parâmetro incômodo, merece tratamento como variável de coordenação por direito próprio, já que um músculo que alterna entre um e dois disparos por passada exibe uma mudança discreta de padrão que a moldura deveria descrever em vez de filtrar.

No plano do delineamento, um protocolo com a mesma instrumentação repetido em vários dias nos mesmos corredores estabeleceria se a dissociação seletiva é estado ou traço. Assim como uma corrida em pista ou ambiente usual de treinos dos corredores, estabelecendo o quanto do fenômeno observado pertence ao contexto específico de se correr em uma esteira. E um delineamento em que os índices cardíacos sejam medidos em repouso ao longo de dias testaria se a separação entre magnitude e estrutura, que foi o achado mais claro desta coletânea, se mantém na escala de tempo em que o monitoramento aplicado de fato acontece. Ainda assim, duas perguntas importam mais que as demais, mas nenhuma pode ser respondida por este delineamento, são elas: A posição de um corredor no eixo de acoplamento prevê algo prospectivamente, como tempo até a exaustão numa sessão posterior ou lesão ao longo de uma temporada? E os índices estruturais preveem algo de que um profissional precise? Este protocolo não tem desfecho de desempenho contra o qual qualquer marcador pudesse ser validado, e um marcador que se move sistematicamente ainda não é um marcador útil.

Os quatro modos de falha descritos na seção 2.3 são detectáveis por qualquer pessoa que tenha os sinais brutos e uma simulação, e não são detectáveis a partir de uma seção de método que não informe a banda, a razão, o procedimento de surrogado e o comprimento da

janela. Um campo que exigisse esses quatro itens de todo artigo de acoplamento capturaria a maior parte do que este reexame capturou, e o capturaria antes da publicação em vez de depois. A recomendação, portanto, é de que banda, razão, procedimento de surrogado e comprimento de janela passem a constar obrigatoriamente da seção de método. Tomados em conjunto, os seis artigos sustentam que o acoplamento é um comportamento observável singular e que a fadiga o reorganiza de modo seletivo, preservando a sinergia entre músculos enquanto degrada a conversão dela em movimento. Sustentam também, e com a mesma firmeza, que essa medida não substitui o monitoramento convencional naquilo que o monitoramento convencional faz bem, e que a melhoria mais barata de um conjunto convencional não é um sensor novo e sim um índice diferente, calculado sobre dados que já estão sendo coletados.

Contudo, o resultado central da dissertação, a dissociação seletiva entre a sinergia intermuscular e a conversão dessa atividade em movimento, não é apenas um achado empírico, na medida em que só é enunciável a partir de uma posição (ontológica e epistemológica) que admita a existência de algo como um acoplamento a ser medido, e que esse acoplamento seja um comportamento observável, não um artefato de correlação. Sob os compromissos da rota convencional, os mesmos dados potencialmente produziriam a conclusão de que alguns marcadores caíram e outros não, sem que a pergunta pela relação chegasse a ser formulada. Sendo assim, a contribuição desta coletânea, está tanto no que ela mediu quanto na declaração explícita do que precisou assumir para poder medi-lo.

2.6 Conclusões Gerais: a Fadiga como Fenômeno de Acoplamento entre Escalas

A tese é a de que a fadiga em corrida se descreve melhor como reorganização do acoplamento entre escalas do que como declínio de qualquer variável tomada isoladamente. O que os dados mostram não é perda uniforme de organização, e sim uma dissociação seletiva entre duas escalas que o protocolo instrumentou. Na escala intermuscular, a coerência de fase entre tibial anterior e gastrocnêmio medial permaneceu praticamente inalterada do Aquecimento ao Esforço Máximo, de 0,97 para 0,96. Na escala que liga a atividade muscular ao deslocamento do corpo, a coerência caiu de 0,82 para 0,54 e de 0,95 para 0,73, com queda em vinte dos vinte e um participantes nos dois pares. A sinergia entre os músculos é preservada; o que cede é a conversão dela em movimento.

Esse resultado só é enunciável a partir de uma leitura multiescala, entendendo que em uma descrição por componentes, o que se observaria seria que alguns marcadores caíram e outros não, sem que a pergunta pela relação entre eles chegasse a ser formulada. A fisiologia

de redes já sustentava que estados globais do organismo correspondem a configurações de acoplamento entre sistemas, e que comportamentos globais distintos podem emergir de mudanças na forma funcional dessas interações sem que a topologia da rede se altere (Bashan et al., 2012; Ivanov, 2021). O que essa dissertação acrescenta é uma demonstração de que, sob fadiga, as escalas não se desacoplam em bloco, e a direção da mudança depende de qual par de escalas se observa.

A leitura tem precedente e ganha sentido quando confrontada com ele, ao passo de que como Garcia-Retortillo e Ivanov (2025) mostraram, interações cardio-musculares formam uma rede multiplex com heterogeneidade pronunciada, em que sub-redes distintas respondem de modo distinto à fadiga acumulada, e a coordenação cardiorrespiratória se reorganiza após treinamento e destreinamento de modo específico ao estímulo (Garcia-Retortillo et al., 2017). Em ambos os casos, como aqui, a fadiga aparece como redistribuição de acoplamento e não como afrouxamento generalizado. A ausência de acoplamento de fase cardiolocomotor detectável nestes dados, reprovado em três formulações independentes, é coerente com esse quadro, uma vez que interações entre órgãos se estabelecem em escalas temporais próprias e nem toda dupla de sinais se acopla por fase (Bartsch et al., 2015).

Duas consequências decorrem para o modo de investigar a fadiga sendo a primeira delas a de que a pergunta pertinente deixa de ser qual componente falha primeiro e passa a ser entre quais escalas o acoplamento se reorganiza, e em que direção. A segunda é que um protocolo que instrumente apenas uma escala não pode detectar redistribuição, porque redistribuição é, por definição, uma grandeza relacional. Isso não torna a medida convencional dispensável, e a comparação entre famílias de medida feita no Artigo 5, demonstrando que o acoplamento é largamente redundante com as grandezas que o protocolo impõe e quase ortogonal aos índices que descrevem a estrutura da variabilidade cardíaca.

Ainda assim, a dissociação foi observada num protocolo em esteira, com velocidade regulada pela percepção do próprio corredor e com três pares de sinais, e nada aqui autoriza estendê-la a outras tarefas, a outras populações ou a escalas que não foram instrumentadas. O regime metaestável, discutido na fundamentação como a descrição adequada ao comportamento vivo, foi indexado indiretamente pelo crescimento do termo de quebra de simetria e pela aceleração da deriva de fase, e não observado em sua forma canônica de permanências e escapes sucessivos. Uma agenda que leve a sério a leitura multiescala precisará instrumentar mais de duas escalas por vez, e é essa a direção que o Artigo 6 sustenta ser possível com os controles que a seção 2.3 descreve.

REFERÊNCIAS GERAIS

Esta lista reúne as referências das seções de autoria própria, isto é, da Introdução Geral e das Considerações Finais Integradoras. As referências de cada artigo constam ao final do respectivo capítulo, nas normas do periódico-alvo, conforme o Manual de Normalização da BIBESEFID/ESEFID/UFRGS (2023).

ANDERSON, P. Complexity theory and organization science. Organization Science, v. 10, n. 3, p. 216–232, 1999. DOI: 10.1287/orsc.10.3.216. Disponível em: https://doi.org/10.1287/orsc.10.3.216. Acesso em: 1 ago. 2026.

ARAÚJO, D.; DAVIDS, K.; HRISTOVSKI, R. The ecological dynamics of decision making in sport. Psychology of Sport and Exercise, v. 7, n. 6, p. 653–676, 2006. DOI: 10.1016/j.psychsport.2006.07.002. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2006.07.002. Acesso em: 1 ago. 2026.

ARAÚJO, D.; HRISTOVSKI, R.; SEIFERT, L.; CARVALHO, J.; DAVIDS, K. Ecological cognition: expert decision-making behaviour in sport. International Review of Sport and Exercise Psychology, v. 12, n. 1, p. 1–25, 2019. DOI: 10.1080/1750984X.2017.1349826.

ARAÚJO, D.; LOPES, H.; FARROKH, D.; DAVIDS, K. The ecological dynamics of cognizant action in sport. Psychology of Sport and Exercise, v. 80, 102935, 2025. DOI: 10.1016/j.psychsport.2025.102935.

ASSIS, T. A.; MIRANDA, J. G. V.; MOTA, F. B.; ANDRADE, R. F. S.; CASTILHO, C. M. C. Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30, n. 2, 2304, 2008. DOI: 10.1590/S1806-11172008000200005. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1806-11172008000200005. Acesso em: 1 ago. 2026.

AVITABILE, D.; SŁOWIŃSKI, P.; BARDY, B.; TSANEVA-ATANASOVA, K. Beyond in-phase and anti-phase coordination in a model of joint action. Biological Cybernetics, v. 110, n. 2-3, p. 201–216, 2016. DOI: 10.1007/s00422-016-0691-9. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00422-016-0691-9. Acesso em: 1 ago. 2026.

BALAGUÉ, N.; GARCIA-RETORTILLO, S.; HRISTOVSKI, R.; IVANOV, P. Ch. From exercise physiology to network physiology of exercise. In: EXERCISE physiology. Londres: IntechOpen, 2022. DOI: 10.5772/intechopen.102756. Disponível em: https://doi.org/10.5772/intechopen.102756. Acesso em: 1 ago. 2026.

BALAGUÉ, N.; GONZÁLEZ, J.; JAVIERRE, C.; HRISTOVSKI, R.; ARAGONÉS, D.; ÁLAMO, J.; NIÑO, O.; VENTURA, J. L. Cardiorespiratory coordination after training and detraining:

a principal component analysis approach. Frontiers in Physiology, v. 7, 35, 2016. DOI: 10.3389/fphys.2016.00035. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00035. Acesso em: 1 ago. 2026.

BALAGUÉ, N.; HRISTOVSKI, R.; ALMARCHA, M.; GARCIA-RETORTILLO, S.; IVANOV, P. Ch. Network physiology of exercise: vision and perspectives. Frontiers in Physiology, v. 11, 611550, 2020. DOI: 10.3389/fphys.2020.611550. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fphys.2020.611550. Acesso em: 1 ago. 2026.

BALAGUÉ, N.; POL, R.; TORRENTS, C.; RIC, A.; HRISTOVSKI, R. On the relatedness and nestedness of constraints. Sports Medicine – Open, v. 5, 15, 2019. DOI: 10.1186/s40798-019-0178-z. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s40798-019-0178-z. Acesso em: 1 ago. 2026.

BARTSCH, R.; KANTELHARDT, J. W.; PENZEL, T.; HAVLIN, S. Experimental evidence for phase synchronization transitions in the human cardiorespiratory system. Physical Review Letters, v. 98, n. 5, 054102, 2007. DOI: 10.1103/PhysRevLett.98.054102. Disponível em: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.054102. Acesso em: 1 ago. 2026.

BARTSCH, R. P.; LIU, K. K. L.; BASHAN, A.; IVANOV, P. Ch. Network physiology: how organ systems dynamically interact. PLoS ONE, v. 10, n. 11, e0142143, 2015. DOI: 10.1371/journal.pone.0142143. Disponível em: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142143. Acesso em: 1 ago. 2026.

BASHAN, A.; BARTSCH, R. P.; KANTELHARDT, J. W.; HAVLIN, S.; IVANOV, P. Ch. Network physiology reveals relations between network topology and physiological function. Nature Communications, v. 3, 702, 2012. DOI: 10.1038/ncomms1705. Disponível em: https://doi.org/10.1038/ncomms1705. Acesso em: 1 ago. 2026.

BERNSTEIN, N. A. The co-ordination and regulation of movements. Oxford: Pergamon Press, 1967.

BORG, G. Perceived exertion and pain scales. Champaign: Human Kinetics, 1998.

CARSON, R. G.; GOODMAN, D.; KELSO, J. A. S.; ELLIOTT, D. Phase transitions and critical fluctuations in rhythmic coordination of ipsilateral hand and foot. Journal of Motor Behavior, v. 27, n. 3, p. 211–224, 1995. DOI: 10.1080/00222895.1995.9941711. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00222895.1995.9941711. Acesso em: 1 ago. 2026.

CASTELLANI, B.; GERRITS, L. Map of the complexity sciences. Art & Science Factory, 2021. Disponível em: https://www.art-sciencefactory.com/complexity-map_feb09.html.

CHAN, S. Complex adaptive systems. ESD.83 Research Seminar in Engineering Systems. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2001.

CHOW, J. Y.; DAVIDS, K.; HRISTOVSKI, R.; ARAÚJO, D.; PASSOS, P. Nonlinear pedagogy: learning design for self-organizing neurobiological systems. New Ideas in Psychology, v. 29, n. 2, p. 189–200, 2011. DOI: 10.1016/j.newideapsych.2010.10.001. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.newideapsych.2010.10.001. Acesso em: 1 ago. 2026.

COTTINGHAM, J.; STOOTHOFF, R.; MURDOCH, D. (Trad.). The philosophical writings of Descartes. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. v. 1.

DAVIDS, K.; GLAZIER, P. Deconstructing neurobiological coordination: the role of the biomechanics-motor control nexus. Exercise and Sport Sciences Reviews, v. 38, n. 2, p. 86–90, 2010. DOI: 10.1097/JES.0b013e3181d4968b. Disponível em: https://doi.org/10.1097/JES.0b013e3181d4968b. Acesso em: 1 ago. 2026.

DESCARTES, R. Discurso do método. São Paulo: Martins Fontes, 2001 [1637].

DOOLEY, K. J. A complex adaptive systems model of organization change. Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences, v. 1, n. 1, p. 69–97, 1997. DOI: 10.1023/A:1022375910940. Disponível em: https://doi.org/10.1023/A:1022375910940. Acesso em: 1 ago. 2026.

EDELMAN, G. M.; GALLY, J. A. Degeneracy and complexity in biological systems. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 98, n. 24, p. 13763–13768, 2001. DOI: 10.1073/pnas.231499798. Disponível em: https://doi.org/10.1073/pnas.231499798. Acesso em: 1 ago. 2026.

ENOKA, R. M.; DUCHATEAU, J. Translating fatigue to human performance. Medicine & Science in Sports & Exercise, v. 48, n. 11, p. 2228–2238, 2016. DOI: 10.1249/MSS.0000000000000929. Disponível em: https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000929. Acesso em: 1 ago. 2026.

FUCHS, A.; JIRSA, V. K.; HAKEN, H.; KELSO, J. A. S. Extending the HKB model of coordinated movement to oscillators with different eigenfrequencies. Biological Cybernetics, v. 74, n. 1, p. 21–30, 1996. DOI: 10.1007/BF00204236. Disponível em: https://doi.org/10.1007/BF00204236. Acesso em: 1 ago. 2026.

GARCIA-RETORTILLO, S.; IVANOV, P. Ch. Dynamics of cardio-muscular networks in exercise and fatigue. The Journal of Physiology, v. 603, n. 9, p. 2545–2568, 2025. DOI: 10.1113/JP286963. Disponível em: https://doi.org/10.1113/JP286963. Acesso em: 1 ago. 2026.

GARCIA-RETORTILLO, S.; JAVIERRE, C.; HRISTOVSKI, R.; VENTURA, J. L.; BALAGUÉ, N. Cardiorespiratory coordination in repeated maximal exercise. Frontiers in Physiology, v. 8, 387, 2017. DOI: 10.3389/fphys.2017.00387. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00387. Acesso em: 1 ago. 2026.

GELL-MANN, M. The quark and the jaguar: adventures in the simple and the complex. Nova York: W. H. Freeman, 1994.

GIBSON, E. J. Principles of perceptual learning and development. Nova York: Appleton-Century-Crofts, 1969.

GIBSON, J. J. The ecological approach to visual perception. Boston: Houghton Mifflin, 1979.

GIBSON, J. J. The senses considered as perceptual systems. Boston: Houghton Mifflin, 1966.

GRÉHAIGNE, J.-F.; BOUTHIER, D.; DAVID, B. Dynamic-system analysis of opponent relationships in collective actions in soccer. Journal of Sports Sciences, v. 15, n. 2, p. 137–149, 1997. DOI: 10.1080/026404197367416. Disponível em: https://doi.org/10.1080/026404197367416. Acesso em: 1 ago. 2026.

HAKEN, H.; KELSO, J. A. S.; BUNZ, H. A theoretical model of phase transitions in human hand movements. Biological Cybernetics, v. 51, n. 5, p. 347–356, 1985. DOI: 10.1007/BF00336922. Disponível em: https://doi.org/10.1007/BF00336922. Acesso em: 1 ago. 2026.

HAKEN, H.; PORTUGALI, J. Synergetic cities: information, steady state and phase transition. Cham: Springer, 2021. (Springer Series in Synergetics).

HAKEN, H. Synergetics: an introduction. 3. ed. Berlim: Springer, 1983.

HAKEN, H. Synergetics: nonequilibrium phase transitions and self-organization in physics, chemistry and biology. Berlim: Springer, 1977.

HARRISON, S. J.; KINSELLA-SHAW, J. M.; DOTOV, D. Effects of footedness and stance asymmetry confirm an inter-leg metastable coordination dynamics of standing posture. Journal of Motor Behavior, v. 53, n. 2, p. 135–156, 2021. DOI: 10.1080/00222895.2020.1740151. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00222895.2020.1740151. Acesso em: 1 ago. 2026.

HICKS, D. S.; MCMILLAN, S.; SCHÖLLHORN, W.; VAN DEN TILLAAR, R. Sprint running coordination: a dynamical systems perspective. Sports Medicine, v. 56, p. 651-675, 2026. DOI: 10.1007/s40279-025-02380-6. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s40279-025-02380-6. Acesso em: 1 ago. 2026.

HOENIG, J. M.; HEISEY, D. M. The abuse of power: the pervasive fallacy of power calculations for data analysis. The American Statistician, v. 55, n. 1, p. 19–24, 2001. DOI: 10.1198/000313001300339897. Disponível em: https://doi.org/10.1198/000313001300339897. Acesso em: 1 ago. 2026.

HOLDEN, L. M. Complex adaptive systems: concept analysis. Journal of Advanced Nursing, v. 52, n. 6, p. 651-657, 2005. DOI: 10.1111/j.1365-2648.2005.03638.x. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2005.03638.x. Acesso em: 1 ago. 2026.

HOLLAND, J. H. Complex adaptive systems. Daedalus, v. 121, n. 1, p. 17-30, 1992.

HOLLAND, J. H. Hidden order: how adaptation builds complexity. Reading: Addison-Wesley, 1995.

HOLM, S. A simple sequentially rejective multiple test procedure. Scandinavian Journal of Statistics, v. 6, n. 2, p. 65–70, 1979. DOI: 10.2307/4615733. Disponível em: https://doi.org/10.2307/4615733. Acesso em: 1 ago. 2026.

HOLMES, P. Poincaré, celestial mechanics, dynamical-systems theory and "chaos". Physics Reports, v. 193, n. 3, p. 137–163, 1990. DOI: 10.1016/0370-1573(90)90012-Q. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0370-1573(90)90012-Q. Acesso em: 1 ago. 2026.

HUYS, R.; PERDIKIS, D.; JIRSA, V. K. Functional architectures and structured flows on manifolds: a dynamical framework for motor behavior. Psychological Review, v. 121, n. 3, p. 302-336, 2014. DOI: 10.1037/a0037014. Disponível em: https://doi.org/10.1037/a0037014. Acesso em: 1 ago. 2026.

IVANOV, P. Ch.; LIU, K. K. L.; BARTSCH, R. P. Focus on the emerging new fields of network physiology and network medicine. New Journal of Physics, v. 18, 100201, 2016. DOI: 10.1088/1367-2630/18/10/100201. Disponível em: https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/10/100201. Acesso em: 1 ago. 2026.

IVANOV, P. Ch. The new field of network physiology: building the human physiolome. Frontiers in Network Physiology, v. 1, 711778, 2021. DOI: 10.3389/fnetp.2021.711778. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fnetp.2021.711778. Acesso em: 1 ago. 2026.

JEKA, J. J.; KELSO, J. A. S. Manipulating symmetry in the coordination dynamics of human movement. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, v. 21, n. 2, p. 360–374, 1995. DOI: 10.1037/0096-1523.21.2.360. Disponível em: https://doi.org/10.1037/0096-1523.21.2.360. Acesso em: 1 ago. 2026.

JUARRERO, A. Context changes everything: how constraints create coherence. Cambridge: MIT Press, 2023.

JUARRERO, A. Dynamics in action: intentional behavior as a complex system. Cambridge: MIT Press, 1999.

KAUFFMAN, S. A. The origins of order: self-organization and selection in evolution. Nova York: Oxford University Press, 1993.

KELSO, J. A. S. Coordination dynamics. In: MEYERS, R. A. (Ed.). Encyclopedia of complexity and systems science. Berlim: Springer, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-27737-5_101-3. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_101-3. Acesso em: 1 ago. 2026.

KELSO, J. A. S.; DELCOLLE, J. D.; SCHÖNER, G. Action-perception as a pattern formation process. In: JEANNEROD, M. (Ed.). Attention and performance XIII. Hillsdale: Erlbaum, 1990. p. 139–169.

KELSO, J. A. S. Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior. Cambridge: MIT Press, 1995.

KELSO, J. A. S. On the coordination dynamics of (animate) moving bodies. Journal of Physics: Complexity, v. 3, n. 3, 031001, 2022. DOI: 10.1088/2632-072X/ac7caf. Disponível em: https://doi.org/10.1088/2632-072X/ac7caf. Acesso em: 1 ago. 2026.

KELSO, J. A. S. Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. American Journal of Physiology, v. 246, n. 6, p. R1000–R1004, 1984. DOI: 10.1152/ajpregu.1984.246.6.R1000. Disponível em: https://doi.org/10.1152/ajpregu.1984.246.6.R1000. Acesso em: 1 ago. 2026.

KELSO, J. A. S. The Haken–Kelso–Bunz (HKB) model: from matter to movement to mind. Biological Cybernetics, v. 115, n. 4, p. 305–322, 2021. DOI: 10.1007/s00422-021-00890-w. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00422-021-00890-w. Acesso em: 1 ago. 2026.

KELSO, J. A. S. Multistability and metastability: understanding dynamic coordination in the brain. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 367, n. 1591, p. 906–918, 2012. DOI: 10.1098/rstb.2011.0351.

KUGLER, P. N.; TURVEY, M. T. Information, natural law, and the self-assembly of rhythmic movement. Hillsdale: Lawrence Erlbaum, 1987.

LAKENS, D. Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: a practical primer for t-tests and ANOVAs. Frontiers in Psychology, v. 4, art. 863, 2013. DOI: 10.3389/fpsyg.2013.00863. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00863. Acesso em: 1 ago. 2026.

LANGTON, C. G. Computation at the edge of chaos: phase transitions and emergent computation. Physica D: Nonlinear Phenomena, v. 42, n. 1-3, p. 12–37, 1990. DOI: 10.1016/0167-2789(90)90064-V. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0167-2789(90)90064-V. Acesso em: 1 ago. 2026.

LANSING, J. S. Complex adaptive systems. Annual Review of Anthropology, v. 32, p. 183-204, 2003. DOI: 10.1146/annurev.anthro.32.061002.093440. Disponível em: https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.32.061002.093440. Acesso em: 1 ago. 2026.

MATURANA, H. R.; VARELA, F. J. Autopoiesis and cognition: the realization of the living. Dordrecht: D. Reidel, 1980.

MOREL, B.; RAMANUJAM, R. Through the looking glass of complexity: the dynamics of organizations as adaptive and evolving systems. Organization Science, v. 10, n. 3, p. 278–293, 1999. DOI: 10.1287/orsc.10.3.278. Disponível em: https://doi.org/10.1287/orsc.10.3.278. Acesso em: 1 ago. 2026.

MORIN, E. Introdução ao pensamento complexo. Porto Alegre: Sulina, 2005.

NEWELL, K. M. Constraints on the development of coordination. In: WADE, M. G.; WHITING, H. T. A. (Ed.). Motor development in children: aspects of coordination and control. Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1986. p. 341–360.

NICOLIS, G.; PRIGOGINE, I. Self-organization in nonequilibrium systems. Nova York: Wiley, 1977.

NOAKES, T. D. Fatigue is a brain-derived emotion that regulates the exercise behavior to ensure the protection of whole body homeostasis. Frontiers in Physiology, v. 3, p. 82, 2012. DOI: 10.3389/fphys.2012.00082. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00082. Acesso em: 1 ago. 2026.

ONIK, M. F. A.; FIELT, E.; GABLE, G. Complex adaptive systems theory in information systems research: a systematic literature review. In: PACIFIC ASIA CONFERENCE ON

INFORMATION SYSTEMS, 21., 2017. Proceedings […]. Association for Information Systems, 2017. p. 1–14.

PIKOVSKY, A.; ROSENBLUM, M.; KURTHS, J. Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

POINCARÉ, H. Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste. Paris: Gauthier-Villars, 1892. t. 1.

PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. Order out of chaos: man's new dialogue with nature. Nova York: Bantam Books, 1984.

ROSENBLUM, M. G.; PIKOVSKY, A. S.; KURTHS, J. Phase synchronization of chaotic oscillators. Physical Review Letters, v. 76, n. 11, p. 1804–1807, 1996. DOI: 10.1103/PhysRevLett.76.1804. Disponível em: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.1804. Acesso em: 1 ago. 2026.

SCHMIDT, R. C.; CARELLO, C.; TURVEY, M. T. Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, v. 16, n. 2, p. 227–247, 1990. DOI: 10.1037/0096-1523.16.2.227. Disponível em: https://doi.org/10.1037/0096-1523.16.2.227. Acesso em: 1 ago. 2026.

SCHÖNER, G.; HAKEN, H.; KELSO, J. A. S. A stochastic theory of phase transitions in human hand movement. Biological Cybernetics, v. 53, n. 4, p. 247–257, 1986. DOI: 10.1007/BF00336995. Disponível em: https://doi.org/10.1007/BF00336995. Acesso em: 1 ago. 2026.

SCHREIBER, T.; SCHMITZ, A. Surrogate time series. Physica D: Nonlinear Phenomena, v. 142, n. 3-4, p. 346–382, 2000. DOI: 10.1016/S0167-2789(00)00043-9. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0167-2789(00)00043-9. Acesso em: 1 ago. 2026.

SEAY, J. F.; HADDAD, J. M.; VAN EMMERIK, R. E. A.; HAMILL, J. Coordination variability around the walk to run transition during human locomotion. Motor Control, v. 10, n. 2, p. 178–196, 2006. DOI: 10.1123/mcj.10.2.178. Disponível em: https://doi.org/10.1123/mcj.10.2.178. Acesso em: 1 ago. 2026.

SEIFERT, L.; DAVIDS, K. Ecological dynamics: a theoretical framework for understanding sport performance, physical education and physical activity. In: COMPLEX SYSTEMS IN SPORT. Berlim: Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-45901-1_3. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-45901-1_3. Acesso em: 1 ago. 2026.

SHAW, R. E.; TURVEY, M. T. Ecological foundations of cognition II: degrees of freedom and conserved quantities in animal-environment systems. Journal of Consciousness Studies, v. 6, n. 11–12, p. 111–123, 1999.

TASK FORCE of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Circulation, v. 93, n. 5, p. 1043–1065, 1996.

TASS, P.; ROSENBLUM, M. G.; WEULE, J.; KURTHS, J.; PIKOVSKY, A.; VOLKMANN, J.; SCHNITZLER, A.; FREUND, H.-J. Detection of n:m phase locking from noisy data: application to magnetoencephalography. Physical Review Letters, v. 81, n. 15, p. 3291–3294, 1998. DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.3291. Disponível em: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.3291. Acesso em: 1 ago. 2026.

THEILER, J.; EUBANK, S.; LONGTIN, A.; GALDRIKIAN, B.; FARMER, J. D. Testing for nonlinearity in time series: the method of surrogate data. Physica D: Nonlinear Phenomena, v. 58, n. 1-4, p. 77–94, 1992. DOI: 10.1016/0167-2789(92)90102-S. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0167-2789(92)90102-S. Acesso em: 1 ago. 2026.

TOGNOLI, E.; KELSO, J. A. S. Coordination dynamics: a foundation for understanding social behavior. Frontiers in Human Neuroscience, v. 14, 317, 2020. DOI: 10.3389/fnhum.2020.00317. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00317. Acesso em: 1 ago. 2026.

TURVEY, M. T. Affordances and prospective control: an outline of the ontology. Ecological Psychology, v. 4, n. 3, p. 173–187, 1992. DOI: 10.1207/s15326969eco0403_3. Disponível em: https://doi.org/10.1207/s15326969eco0403_3. Acesso em: 1 ago. 2026.

TURVEY, M. T.; FONSECA, S. T. The medium of haptic perception: a tensegrity hypothesis. Journal of Motor Behavior, v. 46, n. 3, p. 143–187, 2014. DOI: 10.1080/00222895.2013.798252. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00222895.2013.798252. Acesso em: 1 ago. 2026.

TURVEY, M. T.; SHAW, R. E.; REED, E. S.; MACE, W. M. Ecological laws of perceiving and acting: in reply to Fodor and Pylyshyn. Cognition, v. 9, n. 3, p. 237–304, 1981.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Biblioteca da Escola de Educação Física, Fisioterapia e Dança. Orientações para a normalização de trabalhos acadêmicos da ESEFID. Porto Alegre: UFRGS, 2023.

VENHORST, A.; MICKLEWRIGHT, D.; NOAKES, T. D. Perceived fatigability: utility of a three-dimensional dynamical systems framework to better understand the psychophysiological regulation of goal-directed exercise behaviour. Sports Medicine, v. 48, n. 11, p. 2479–2495, 2018. DOI: 10.1007/s40279-018-0986-1. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s40279-018-0986-1. Acesso em: 1 ago. 2026.

TURVEY, M. T. Lectures on perception: an ecological perspective. Nova York: Routledge, 2019.

VON BERTALANFFY, L. General system theory: foundations, development, applications. New York: George Braziller, 1968.

WARREN, W. H. The dynamics of perception and action. Psychological Review, v. 113, n. 2, p. 358–389, 2006. DOI: 10.1037/0033-295X.113.2.358. Disponível em: https://doi.org/10.1037/0033-295X.113.2.358. Acesso em: 1 ago. 2026.

WITHAGEN, R.; CHEMERO, A. Naturalizing perception: developing the Gibsonian approach to perception. Theory & Psychology, v. 19, n. 3, p. 363-389, 2009. DOI:

10.1177/0959354309104159. Disponível em: https://doi.org/10.1177/0959354309104159. Acesso em: 1 ago. 2026.

WOODS, C. T.; MCKEOWN, I.; ROTHWELL, M.; ARAÚJO, D.; ROBERTSON, S.; DAVIDS, K. Sport practitioners as sport ecology designers: how ecological dynamics has progressively changed perceptions of skill "acquisition" in the sporting habitat. Frontiers in Psychology, v. 11, 654, 2020. DOI: 10.3389/fpsyg.2020.00654. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00654. Acesso em: 1 ago. 2026.

ZHANG, M.; BEETLE, C.; KELSO, J. A. S.; TOGNOLI, E. Connecting empirical phenomena and theoretical models of biological coordination across scales. Journal of the Royal Society Interface, v. 16, n. 157, 20190360, 2019. DOI: 10.1098/rsif.2019.0360. Disponível em: https://doi.org/10.1098/rsif.2019.0360. Acesso em: 1 ago. 2026.

APÊNDICE A — TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TCLE)

Versão aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa da UFRGS (CEP/UFRGS). Parecer nº 8.375.309. Inclui todas as correções solicitadas pelo CEP: linguagem acessível, esclarecimento sobre direito de desistência, informações sobre cobertura de transporte para os participantes, e contatos do pesquisador responsável e do CEP.

APÊNDICE B — INSTRUMENTOS PSICOMÉTRICOS UTILIZADOS

B.1 Escala de Percepção de Esforço de Borg (6–20) — utilizada como critério de controle da intensidade durante o protocolo (faixas: Aquecimento 9–11; Esforço Médio 13–15; Esforço Máximo 17–20) e como verificação global da fadiga ao término. B.2 Escala de Humor de Brunel (BRUMS). B.3 Escala Visual Analógica de Dor (EVA). B.4 Inventário de Ansiedade Competitiva (CSAI-2R).

APÊNDICE C — DOCUMENTAÇÃO DO PIPELINE COMPUTACIONAL

C.1 Arquitetura de pastas do projeto Acoplamento de sinais fisiológicos e cinemáticos: uma análise da fadiga em corredores. C.2 Dependências: mne, numpy, scipy, matplotlib, pandas, scikit-learn, reportlab, opencv-python. C.3 Os nove scripts Python: pipeline_completo.py, utils_participantes.py, preprocess_emg.py, preprocess_vfc.py (correção adaptativa de ectópicos e VFC por segmento em logaritmo natural), hkb_analise.py (estimação por mínimos quadrados ponderados, com suavização de Laplace, filtro de bins povoados e limites em a e b), cinematica.py (frequência de passada por periodograma de Welch), kernel_pca.py (escalonamento robusto e caso completo, sem imputação), calculo_amostral.py (piso n=20; 21 analisados; Holm sobre os 6 pares), paisagem_potencial.py. C.4 Repositório público: [URL a inserir].

APÊNDICE D — CARACTERIZAÇÃO DOS PARTICIPANTES

Tabela com dados demográficos e antropométricos agregados dos 21 participantes analisados: idade, sexo, massa corporal, estatura, experiência em corrida e volume semanal médio. Registro das 2 exclusões por corrupção do sinal de GM no Esforço Máximo (um deles também com perda de VFC), totalizando 23 coletas e dropout de 8,7%. Dados individuais sem identificação nominal, conforme TCLE e Parecer CEP nº 8.375.309.

ANEXO A — PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP/UFRGS

Parecer nº 8.375.309, do Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, emitido pela Plataforma Brasil, que aprovou o protocolo desta pesquisa.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO GRANDE DO SUL - UFRGS

PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

Título da Pesquisa: ACOPLAMENTO DE SINAIS FISIOLÓGICOS E CINEMÁTICOS: UMA ANÁLISE DA FADIGA EM CORREDORES A PARTIR DE TEORIAS DA COMPLEXIDADE

Pesquisador: Jerri Luiz Ribeiro

Área Temática:

Versão: 3

CAAE: 95876426.9.0000.5347

Instituição Proponente: Programa de Pós-Graduação em Ciências do Movimento Humano

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 8.375.309

Apresentação do Projeto:

As informações elencadas nos campos "Apresentação do Projeto", "Objetivo da Pesquisa" e "Avaliação dos Riscos e Benefícios" foram retiradas do documento "PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_2671947.pdf", datado em 22/04/2026, e do "Projeto Detalhado".

Esse parecer refere-se a análise do projeto ACOPLAMENTO DE SINAIS FISIOLÓGICOS E CINEMÁTICOS: UMA ANÁLISE DA FADIGA EM CORREDORES A PARTIR DE TEORIAS DA COMPLEXIDADE. É um projeto de pesquisa do Prof. Dr. Jerri Luiz Ribeiro, que conta com a participação de Lucas Poli, estudante de Mestrado em Ciências do Movimento Humano, e dos professores Rodrigo Rodrigues e Tercio Apolinário de Souza.

Trata-se de um estudo experimental de caráter transversal, com intervenção de um único dia. A amostra será constituída por 20 corredores de rua de ambos os sexos, com idades entre 30 e 50 anos. Serão incluídos corredores com volume semanal médio de 30 a 50 km, no mínimo há 2 anos. Serão excluídos corredores que usem de esteroides anabolizantes ou substâncias ergogênicas ilícitas; com presença de dores ou lesões prévias relatadas na avaliação VAS-100mm; e com

Endereço: Av. Paulo Gama, nº 110 - Sala 311 do Prédio Anexo 1 da Reitoria - Campus Centro
Bairro Farroupilha **CEP:** 90.040-060
UF: RS **Município** PORTO ALEGRE
Telefone (51)3308-3787 **E-** etica@gabinete.ufrgs.br



condições clínicas impeditivas para esforço físico de alta intensidade.

Os pesquisadores irão divulgar a pesquisa diretamente em ambientes da universidade, redes sociais e na comunidade conforme modelo de convite no apêndice B. A coleta de dados do estudo será realizada na ESEFID/UFRGS. A intervenção será realizada em uma única sessão individual por participante, organizada em três momentos distintos:

No primeiro momento, os participantes passarão por um processo de familiarização com os equipamentos e procedimentos da coleta, incluindo a esteira e os sensores, com o objetivo de reduzir interferências por incertezas ou adaptações iniciais. Nessa etapa, será feita a entrega do TCLE, e aplicada uma breve corrida-teste para adaptação ao protocolo. Também serão aplicados os instrumentos VAS-100mm, POMS e CSAI-2, com o objetivo de caracterizar a amostra e identificar possíveis variáveis intervenientes que possam influenciar os resultados do processo de fadiga.
No segundo momento ocorrerá à intervenção propriamente dita, com duração total estimada entre 45 a 90 minutos por participante, onde os participantes realizarão uma corrida contínua em esteira até atingirem o limiar de fadiga subjetiva pré-determinado, com coleta simultânea de dados eletrofisiológicos e cinemáticos. Esse período incluirá 10 minutos iniciais de aquecimento na esteira, conduzido a uma intensidade correspondente à faixa 9¿11 da escala de percepção subjetiva de esforço de Borg (PSE Borg). Após o aquecimento, a velocidade da esteira será gradualmente aumentada a cada 3 minutos, até atingir uma intensidade percebida entre 13 e 15 da PSE, mantida até o ponto de desengajamento voluntário da tarefa pelo participante. Durante a corrida, os participantes serão instruídos a avisar os pesquisadores ao perceberem que estão atingindo os níveis 17 a 20 na PSE, sinalizando uma possível entrada no estado de fadiga.

No terceiro e último momento da sessão, serão reaplicados os instrumentos VAS-100mm e POMS, juntamente com um PSE Borg geral do esforço percebido ao longo de toda a tarefa. Os dados coletados pós-intervenção serão analisados em conjunto

com os dados iniciais, permitindo identificar possíveis transições psicofisiológicas associadas à fadiga.

Os sinais fisiológicos e cinemáticos serão analisados por meio de modelagem baseada no HKB estendido (Haken-Kelso-Bunz), para identificar sinergias de fase e anti-fase representativas dos acoplamentos e desacoplamentos. Posteriormente, os valores de acoplamento obtidos serão submetidos a uma análise de Componentes Principais com Kernel Gaussiano (Kernel PCA), a fim de explorar padrões emergentes de integração multiescalar e identificar transições críticas associadas à fadiga. As análises serão conduzidas em ambiente computacional (Python), utilizando pacotes científicos apropriados para processamento de séries temporais e estatística descritiva (numpy, pandas, sklearn).

Cronograma:
Coleta de dados: 11/05/2026 a 29/05/2026

Orçamento: os custos previstos são de R$ 293,49 (financiamento próprio).

Objetivo da Pesquisa:
OBJETIVO PRIMÁRIO: Investigar as alterações nas dinâmicas de acoplamento entre sinais eletrofisiológicos e cinemáticos durante o exercício em corredores de rua, considerando estados de fadiga, a partir da modelagem por um sistema de coordenação multiescalar.

OBJETIVO SECUNDÁRIO: A. Analisar as transições dinâmicas e os desacoplamentos funcionais entre EEG, EMG e ECG ao longo do esforço físico; B. Avaliar as mudanças nos padrões de coordenação motora inter e intra-membros por análise de fase/antifase dos sinais cinemáticos; C. Integrar os dados eletrofisiológicos e cinemáticos em uma abordagem multiescalar via PCA Kernel, identificando padrões emergentes e possíveis transições críticas; D. Relacionar essas alterações fisiológicas e motoras com medidas subjetivas de estresse, fadiga e dor.

Avaliação dos Riscos e Benefícios:
RISCOS: A participação nesta pesquisa envolve os seguintes riscos: dor muscular durante ou após o protocolo de corrida; sensação de fadiga física; desconforto

físico decorrente do esforço prolongado em esteira; e eventual indisposição ou mal-estar durante a atividade. Caso ocorra qualquer um desses eventos, o participante poderá interromper o teste a qualquer momento, sem prejuízo algum. Um profissional de educação física estará à disposição durante toda a coleta para o atendimento imediato.

BENEFÍCIOS DIRETOS:- Os participantes terão acesso a uma avaliação fisiológica e motora detalhada, incluindo parâmetros de desempenho, percepção subjetiva de esforço e indicadores de fadiga.- O protocolo poderá contribuir para aperfeiçoar o autoconhecimento corporal e a autorregulação do esforço durante corridas, auxiliando na prevenção de lesões e na melhoria da performance.

BENEFÍCIOS INDIRETOS e científicos:- A pesquisa contribuirá para avançar o conhecimento científico sobre a fadiga sob o prisma das teorias da complexidade, explorando o corpo como um sistema adaptativo complexo.- Oferece novas perspectivas analíticas (HKB estendido e PCA Kernel) para compreender as interações multiescalares entre sistemas fisiológicos e motores, com potencial de impacto sobre metodologias de treinamento e monitoramento esportivo.- Os resultados poderão orientar novas práticas de controle da carga de treino e avaliação da fadiga em corredores e atletas, com potencial aplicação em contextos clínicos e de alto rendimento.

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:
A pesquisa evidencia a necessidade de repensar as práticas de avaliação e intervenção no treinamento, adotando modelos que respeitem a variabilidade e a adaptabilidade individuais. Ainda, a pesquisa contribuirá para avançar o conhecimento científico sobre a fadiga, sendo que seus resultados poderão orientar novas práticas de controle da carga de treino e avaliação da fadiga em corredores e atletas, com potencial aplicação em contextos clínicos e de alto rendimento.

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:
Apresenta TCLE, folha de rosto, formulário da PB, Termo de Anuência do Lapex.

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:
Trata-se de resposta ao parecer consubstanciado nº 8.329.035 emitido pelo CEP

UFRGS:

[3] Prever no orçamento os custos com o transporte dos participantes para irem ao local da coleta de dados (Resolução CNS nº 510 de 2016, Artigo 17, Inciso VII). Solicita-se adequação.
RESPOSTA: RESPOSTA: Em conformidade com a Resolução CNS no 510/2016, Artigo 17, Inciso VII, o orçamento foi atualizado para incluir o ressarcimento das despesas de transporte dos participantes. Foi previsto o custeio de passagens de transporte público para deslocamento ao LAPEX/UFRGS para os 20 participantes, considerando duas passagens por sessão de coleta (ida e volta), totalizando R$ 192,00 (20 participantes × 2 passagens × R$ 4,80). O orçamento total foi atualizado de R$ 135,10 para R$ 293,49. A alteração está identificada em fonte vermelha no documento do projeto. O orçamento foi corrigido na Plataforma Brasil.
ANÁLISE DO CEP: PENDÊNCIA ATENDIDA.

[4] TCLE

[4.3] No item Riscos e Desconfortos: Ao subestimar os riscos envolvidos em um estudo, o/a pesquisador(a) não transmite as informações necessárias para que o indivíduo tome uma decisão autônoma sobre sua participação na pesquisa. Dessa forma, solicita-se que os RISCOS DA PESQUISA sejam expressos objetivamente e sem o uso de adjetivos (como risco mínimo, baixo, moderado, elevado etc.). Solicita-se adequação.
RESPOSTA: O texto foi corrigido na Plataforma Brasil para: A participação nesta pesquisa envolve os seguintes riscos: dor muscular durante ou após o protocolo de corrida; sensação de fadiga física; desconforto físico decorrente do esforço prolongado em esteira; e eventual indisposição ou mal-estar durante a atividade. Caso ocorra qualquer um desses eventos, o participante poderá interromper o teste a qualquer momento, sem prejuízo algum. Um profissional de educação física estará à disposição durante toda a coleta para o atendimento imediato.
ANÁLISE DO CEP: PENDÊNCIA ATENDIDA.

[4.6] O final do TCLE deve conter o registro do consentimento, próximo ao campo para assinaturas do pesquisador responsável, do pesquisador que fará a coleta e do participante. Observa-se ausência do texto final para esse registro (por exemplo: Eu, _____, abaixo assinado (a) após leitura desse documento, estando ciente de todas estas informações, concordo de livre e espontânea vontade em participar do presente estudo como voluntário). Solicita-se adequação.
RESPOSTA: Foi incluído ao final do TCLE o texto de registro de consentimento, próximo ao campo de assinaturas do pesquisador responsável, do pesquisador que realizará a coleta e do participante, conforme modelo sugerido pelo CEP. O arquivo 02_TCLE_REVISADO_2.pdf foi anexado com as correções solicitadas.
ANÁLISE DO CEP: PENDÊNCIA ATENDIDA.

CONCLUSÃO DA ANÁLISE: Não foram observados óbices éticos nos documentos do estudo. Projeto apto para a aprovação no CEP.

Diante do exposto, o Comitê de Ética em Pesquisa - CEP-UFRGS, de acordo com as atribuições definidas na Resolução CNS n.° 466, de 2012, e na Norma Operacional n.° 001, de 2013, do CNS, manifesta-se por APROVAR o protocolo de pesquisa.

Reitera-se aos pesquisadores a necessidade de elaborar e apresentar os relatórios parciais e final da pesquisa, como preconiza a Resolução CNS/MS nº 466/2012, Capítulo XI, Item XI.2: "d".

Considerações Finais a critério do CEP:

Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situaçã
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_2671947.pdf	22/04/2026 11:35:17		Aceito
Outros	01_CARTA_RESPOSTA_CEP.pdf	22/04/2026 11:34:55	Lucas Poli	Aceito
Projeto Detalhado /	PROJETO_COMPLETO_REVISADO.pdf	22/04/2026 11:34:26	Lucas Poli	Aceito



Brochura Investigador	PROJETO_COMPLETO_REVISADO.pdf	22/04/2026 11:34:26	Lucas Poli	Aceito
Outros	02_CARTA_RESPOSTA_CEP.pdf	09/04/2026 15:47:47	Jerri Luiz Ribeiro	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	02_TCLE_REVISADO_2.pdf	09/04/2026 15:45:38	Jerri Luiz Ribeiro	Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	03_PROJETO_SECOES_REVISADAS_2.pdf	03/04/2026 16:16:49	Lucas Poli	Aceito
Declaração de Instituição e Infraestrutura	Anuencia_assinada.pdf	28/02/2026 11:51:23	Jerri Luiz Ribeiro	Aceito
Folha de Rosto	Jerri_Luiz_Ribeiro_assinado.pdf	13/01/2026 15:44:03	Jerri Luiz Ribeiro	Aceito

Situação do Parecer:
Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:
Não

PORTO ALEGRE, 23 de Abril de 2026

Assinado por:
MARCIA HOLSBACH BELTRAME
(Coordenador(a))

ANEXO B — TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Termo apresentado e assinado por cada participante antes da sessão experimental, na versão aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa.

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO (TCLE)

Título da Pesquisa: ACOPLAMENTO DE SINAIS FISIOLÓGICOS E CINEMÁTICOS: UMA ANÁLISE DA FADIGA EM CORREDORES A PARTIR DE TEORIAS DA COMPLEXIDADE

Pesquisadores responsáveis:

Pesquisador Responsável: Prof. Dr. Jerri Luiz Ribeiro, coordenador da pesquisa, PPGCMH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); e-mail: jerri.ribeiro@ufrgs.br; telefone: (51) 99152-7794.

Pesquisador Colaborador: Lucas Gonçalves Poli, Mestrando em Ciências do Movimento Humano, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); e-mail: lucaspoli7@gmail.com; telefone: (51) 99142-6999.

Instituição:

Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Escola de Educação Física, Fisioterapia e Dança (UFRGS|ESEFID)

Programa de Pós-Graduação em Ciências do Movimento Humano

1. Apresentação da Pesquisa:

Você está sendo convidado(a) a participar de uma pesquisa científica que tem como objetivo compreender os padrões de coordenação neuromuscular, fisiológica e emocional relacionados ao fenômeno da fadiga em corredores amadores, utilizando uma abordagem ecológica e métodos de análise multiescalar. Este estudo integra o projeto de dissertação de mestrado do pesquisador acima identificado.

2. Procedimentos:

Sua participação consistirá em uma única sessão experimental, com duração aproximada de 1h30min a 2h, que ocorrerá no Laboratório de Pesquisa do Exercício (LAPEX), em data e horário a serem agendados. O protocolo será dividido em três momentos:

1. Pré-teste: aplicação de questionários e escalas (POMS, CSAI-2, VAS-100mm);

2. Intervenção: corrida em esteira com medição de sinais eletrofisiológicos (EEG, ECG, EMG), cinemática da corrida e percepção subjetiva de esforço (escala de Borg);

3. Pós-teste: reaplicação de questionários e escalas.

Durante o teste, serão coletados dados não invasivos por meio de sensores fixados com eletrodos de superfície e filmagem de movimentos. A participação é voluntária.

3. Riscos e Desconfortos:

A participação nesta pesquisa envolve os seguintes riscos: dor muscular durante ou após o protocolo de corrida; sensação de fadiga física; desconforto físico decorrente do esforço prolongado em esteira; e eventual indisposição ou mal-estar durante a atividade. Caso ocorra qualquer um desses eventos, o participante poderá interromper o teste a qualquer momento, sem prejuízo algum. Um profissional de educação física estará à disposição durante toda a coleta para o atendimento imediato.

4. Benefícios esperados:

Embora não haja benefícios diretos para os participantes, espera-se que os resultados do estudo contribuam para o avanço do conhecimento sobre a fadiga humana e influenciem práticas de treinamento e monitoramento de atletas amadores.

5. Confidencialidade e sigilo:

Todos os dados obtidos serão mantidos sob sigilo e utilizados exclusivamente para fins científicos. Nenhum dado pessoal será divulgado. Você será identificado(a) por códigos numéricos, e todas as informações serão armazenadas em arquivos protegidos por senha. Todos os dados coletados nesta pesquisa ficarão armazenados em arquivo físico ou digital, sob guarda e responsabilidade do pesquisador responsável (Prof. Dr. Jerri Luiz Ribeiro), pelo período mínimo de 5 (cinco) anos após o término da pesquisa, em conformidade com a Resolução CNS nº 510/2016, Art. 28, Inciso IV.

6. Esclarecimentos, Ressarcimento e Retirada:

Você poderá solicitar esclarecimentos a qualquer momento e retirar seu consentimento sem nenhuma penalização. Caso deseje, poderá ter acesso aos resultados do estudo após sua conclusão. O participante poderá ter ressarcimento das passagens de transporte público para deslocamento até o LAPEX/UFRGS (ida e volta), conforme combinação prévia com o pesquisador responsável. Quaisquer outras despesas que venham a ocorrer em decorrência de sua participação na pesquisa serão ressarcidas pelos pesquisadores. A assinatura desse termo não exclui a possibilidade do participante buscar indenização diante de eventuais danos decorrentes de sua participação na pesquisa. A qualquer momento você poderá solicitar esclarecimentos aos responsáveis pelo projeto, assim como ao Comitê de Ética em Pesquisa (dados abaixo).

CEP/UFRGS: Av. Paulo Gama, 110, Sala 311, Prédio Anexo I da Reitoria – Campus Centro, Porto Alegre/RS – CEP: 90040-060. Fone: +55 51 3308 3787. E-mail: etica@gabinete.ufrgs.br. Horário de funcionamento: segunda a sexta, das 08:00 às 12:00 e das 13:00 às 17:00h.

REGISTRO DE CONSENTIMENTO

Eu, _____,
portador(a) do CPF nº _____, abaixo assinado(a), após

a leitura deste documento e estando ciente de todas as informações nele contidas, concordo de livre e espontânea vontade em participar do presente estudo como voluntário(a). Declaro ter compreendido os objetivos, os procedimentos, os riscos e os benefícios da pesquisa, bem como meu direito de retirar meu consentimento a qualquer momento, sem nenhuma penalização.

Porto Alegre, _____ de _____ de 202___.

_____

Assinatura do(a) Participante

_____

Prof. Dr. Jerri Luiz Ribeiro – Pesquisador Responsável

_____

Lucas Gonçalves Poli – Pesquisador Colaborador (Coleta de Dados)

O projeto foi avaliado pelo CEP-UFRGS, órgão colegiado, de caráter consultivo, deliberativo e educativo, cuja finalidade é avaliar – emitir parecer e acompanhar os projetos de pesquisa envolvendo seres humanos, em seus aspectos éticos e metodológicos, realizados no âmbito da instituição. O CEP UFRGS está localizado na Av. Paulo Gama, 110, Sala 311, Prédio Anexo I da Reitoria – Campus Centro, Porto Alegre/RS – CEP: 90040-060. Fone: +55 51 3308 3787. E-mail: etica@gabinete.ufrgs.br.

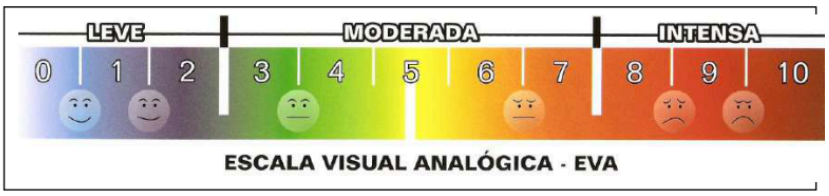
ANEXO C — ESCALA VISUAL ANALÓGICA DE DOR (EVA-100 mm)

Instrumento aplicado antes e depois da sessão para registro da percepção de dor.

Observação: Circular número referente ao grau de dor do paciente na escala abaixo.

NOME:_____**DATA:**____/___/____

ESCALA VISUAL ANALÓGICA – EVA



A Escala Visual Analógica – EVA consiste em auxiliar na aferição da intensidade da dor no paciente, é um instrumento importante para verificarmos a evolução do paciente durante o tratamento e mesmo a cada atendimento, de maneira mais fidedigna. Também é útil para podermos analisar se o tratamento está sendo efetivo, quais procedimentos têm surtido melhores resultados, assim como se há alguma deficiência no tratamento, de acordo com o grau de melhora ou piora da dor.

A EVA pode ser utilizada no início e no final de cada atendimento, registrando o resultado sempre na evolução. Para utilizar a EVA o atendente deve questionar o paciente quanto ao seu grau de dor sendo que **0** significa **ausência total de dor** e **10** o nível de **dor máxima** suportável pelo paciente.

Dicas sobre como interrogar o paciente:

- Você tem dor?
- Como você classifica sua dor? (deixe ele falar livremente, faça observações na pasta sobre o que ele falar)

Questione-o:

a) Se não tiver dor, a classificação é **zero**.
b) Se a dor for moderada, seu nível de referência é **cinco**.
c) Se for intensa, seu nível de referência é **dez**.

OBS.: Procure estabelecer variações de melhora e piora na escala acima tomando cuidado para não sugestionar o paciente.

_____
ASSINATURA E CARIMBO MÉDICO

ANEXO D — PERFIL DE ESTADOS DE HUMOR (POMS)

Versão reduzida do Profile of Mood States, aplicada antes e depois da sessão.

POMS Reduzido

(profile of mood states / perfil do estado de humor)

Nome e Sobrenome: ..... **Data:** ..... / ..... / 2 .....

Instruções: São apresentadas abaixo uma série de palavras que descrevem sensações que as pessoas sentem no dia a dia. Leia primeiro cada palavra com cuidado. Depois, assinale com uma cruz (X) o espaço que melhor corresponde a maneira como sente ao longo dos últimos **7** dias incluindo o dia de hoje.

	GRAU dos ITENS					Uso do Avaliador (escala)						
Itens	Nada **0**	Um Pouco **1**	Moderadamente **2**	Bastante **3**	Muitíssimo **4**	**T**	**D**	**H**	**F**	**C**	**V**	**DT**
1 Tenso						X						
2 Irritado								X				
3 Imprestável												X
4 Esgotado									X			
5 Animado											X	
6 Confuso										X		
7 Triste							X					
8 Ativo											X	
9 Mal Humorado								X				
10 Enérgico											X	
11 Sem Valor												X
12 Inquieto						X						
13 Fatigado									X			
14 Aborrecido								X				
15 Desencorajado							X					
16 Nervoso						X						
17 Só							X					
18 Embaralhado										X		
19 Exausto									X			
20 Ansioso						X						
21 Deprimido							X					
22 Sem Energia									X			
23 Miserável												X
24 Desnorteado										X		
25 Furioso								X				
26 Eficaz										X		
27 Cheio de Vida											X	
28 Com Mau Feitio								X				
29 Tranquilo						X						
30 Desanimado							X					
31 Impaciente						X						
32 Cheio de Boa Disposição											X	
33 Inútil												X
34 Estourado									X			
35 Competente										X		
36 Culpado												X
37 Enervado								X				
38 Infeliz							X					
39 Alegre											X	
40 Inseguro										X		
41 Cansado									X			
42 Apático												X
TE						X	X	X	X	X		
PTH												

ANEXO E — INVENTÁRIO DE ANSIEDADE ESTADO COMPETITIVA (CSAI-2)

Competitive State Anxiety Inventory-2, aplicado antes da sessão.

ANEXO B: Versão Brasileira do CSAI-2R

Nome:_____ **Condição:**_____

Leia cada uma das questões abaixo e assinale para cada afirmação o número que melhor indica como se sente agora – neste exato momento. Não há respostas certas nem erradas. Não fique muito tempo em cada uma das questões.

	NADA			MUITO
1. Sinto-me agitado.	1	2	3	4
2. Estou preocupado porque posso não render tão bem como poderia nesta competição.	1	2	3	4
3. Sinto-me auto-confiante.	1	2	3	4
4. Sinto o meu corpo tenso.	1	2	3	4
5. Estou preocupado pelo fato de poder perder.	1	2	3	4
6. Sinto tensão no meu estômago.	1	2	3	4
7. Estou confiante de que posso corresponder ao desafio que me é colocado.	1	2	3	4
8. Estou preocupado pelo fato de poder falhar sob pressão da competição.	1	2	3	4
9. O meu coração está a bater muito depressa.	1	2	3	4
10. Estou confiante de que vou ter um bom rendimento	1	2	3	4
11. Estou preocupado pelo fato de poder ter um mau rendimento	1	2	3	4
12. Sinto o meu estômago "às voltas".	1	2	3	4
13. Estou confiante porque me imagino, mentalmente, a atingir o meu objetivo	1	2	3	4
14. Estou preocupado pelo fato de os outros poderem ficar desapontados com o meu rendimento.	1	2	3	4
15. As minhas mãos estão frias e húmidas.	1	2	3	4
16. Estou confiante em conseguir ultrapassar os obstáculos sob a pressão da competição.	1	2	3	4
17. Sinto o meu corpo rígido.	1	2	3	4

ANEXO F — ESCALA DE PERCEPÇÃO SUBJETIVA DE ESFORÇO DE BORG (6–20)

A escala de Borg 6–20 é o instrumento que regulou a intensidade em todo o protocolo. A escala é numerada de 6 a 20, faixa escolhida por Borg para acompanhar aproximadamente a frequência cardíaca de adultos jovens quando multiplicada por dez, e traz descritores verbais ancorados em pontos específicos: 6 nenhum esforço, 7 extremamente leve, 9 muito leve, 11 leve, 13 um pouco intenso, 15 intenso, 17 muito intenso, 19 extremamente intenso e 20 esforço máximo. Neste estudo o aquecimento foi conduzido na faixa de 9 a 11, o esforço médio na faixa de 13 a 15 e o esforço máximo na faixa de 17 a 20. O instrumento não é reproduzido aqui por estar protegido por direito autoral; a versão utilizada é a publicada em Borg (1998), Borg's Perceived Exertion and Pain Scales, Human Kinetics, cuja referência consta das Referências Gerais.