



CENTRO UNIVERSITÁRIO FAMETRO
CURSO DE BACHARELADO EM EDUCAÇÃO FÍSICA

DENIS LEITE CHAVES

USO DA ENTROPIA COMO FERRAMENTA DE LEITURA DE SÉRIES TEMPORAIS
NÃO-ESTACIONÁRIAS LIGADAS AO COMPORTAMENTO MOTOR: UMA
REVISÃO SISTEMÁTICA

FORTALEZA

2020

DENIS LEITE CHAVES

USO DA ENTROPIA COMO FERRAMENTA DE LEITURA DE SÉRIES TEMPORAIS
NÃO-ESTACIONÁRIAS LIGADAS AO COMPORTAMENTO MOTOR: UMA
REVISÃO SISTEMÁTICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Educação Física da Centro Universitário Fametro - UNIFAMETRO sob orientação do Professor Me. Bruno Nobre Pinheiro como parte dos requisitos para a conclusão do curso.

FORTALEZA

2020

DENIS LEITE CHAVES

USO DA ENTROPIA COMO FERRAMENTA DE LEITURA DE SÉRIES TEMPORAIS
NÃO-ESTACIONÁRIAS LIGADAS AO COMPORTAMENTO MOTOR: UMA
REVISÃO SISTEMÁTICA

Este artigo foi apresentado no dia 12 de junho de 2020 como requisito para obtenção do grau de Bacharelado do Centro Universitário Fametro - UNIFAMETRO, tendo sido aprovada pela banca examinadora composta pelos professores

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Bruno Nobre Pinheiro
Orientador- FAMETRO

Prof. Me. Paulo André Gomes Uchoa
Membro- FAMETRO

Prof. Me. Lino Delcio Gonçalves Scipião Junior
Membro- FAMETRO

USO DA ENTROPIA COMO FERRAMENTA DE LEITURA DE SÉRIES TEMPORAIS NÃO-ESTACIONÁRIAS LIGADAS AO COMPORTAMENTO MOTOR: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Denis Leite Chaves¹

Bruno Nobre Pinheiro²

RESUMO

A atividade muscular pode ser visualizada em ferramentas que permitem visualizar e quantificar as respostas neuromusculares através de variáveis específicas. A oscilação presente nos dados obtidos nessas ferramentas revela um caráter não estacionário que pode, e deve, ser alvo de pesquisas. Esta revisão tem como objetivo reunir e discutir registros existentes na literatura da utilização de leituras entrópicas dos dados coletados de variáveis do comportamento motor como medidas de estabilidade e complexidade do mesmo. A busca foi realizada na base de dados PubMed a partir da combinação descritores que, por sua vez, foram organizados visando maior abrangência dos resultados obtidos na busca. Dentre os tipos de entropia encontrados, o mais recorrente foi a entropia de amostra (SampEn), presente em 55,5% dos estudos. A entropia de Shannon e Entropia Multiescala utilizadas em 33,3% dos estudos, aparecem logo em seguida. Já a Entropia Aproximada, presente em 22,2% dos artigos, esteve à frente apenas da Entropia de Renyi e a Entropia de Análise de Quantificação de Recorrência que, por sua vez, foram encontradas em apenas 11,1% dos trabalhos. Todos os artigos utilizaram, além da leitura entrópica, ferramentas estatísticas de correlação, análise de variância, regressão e dispersão. A escolha do método entrópico a ser utilizado deve, além de ser coerente com o tipo de informação que se almeja alcançar, considerar características como o comprimento dos dados e o ruído das séries temporais. As pesquisas indicam que as leituras não lineares possuem propriedades que possibilitam visualização da dependência escalar e temporal dos dados.

Palavras-chave: Complexidade; Entropia; Séries temporais; Controle motor.

ABSTRACT

Muscle activity can be visualized in tools that allow visualizing and quantifying neuromuscular responses through specific variables. The oscillation present in the data obtained in these tools reveals a non-stationary character that can, and should, be the target of research. This review aims to gather and discuss existing records in the literature on the use of entropic readings of data collected from motor behavior variables as measures of stability and complexity. The search was carried out in the PubMed database based on the combination of descriptors, which, in turn, were organized aiming at a wider range of results obtained in the search. Among the types of entropy found, the most recurrent was sample entropy (SampEn), present in 55.5% of the studies. Shannon's entropy and Multiscale Entropy used in 33.3% of the studies, appear shortly afterwards. Approximate Entropy, present in 22.2% of the articles, was only ahead of Renyi's Entropy and Entropy of Recurrence Quantification Analysis, which, in turn, were found in only 11.1% of the works. All articles used, in addition to entropic reading, statistical correlation tools, analysis of variance, regression and dispersion. The choice of the entropic method to be used must, in addition to being coherent with the type of information that one aims to achieve, consider characteristics such as the length of the data and the noise of the time series. Research indicates that non-linear readings have properties that allow visualization of the scalar and temporal dependence of the data.

Keywords: Complexity; Entropy; Time series; Motor control.

1 INTRODUÇÃO

¹Graduando No Curso De Educação Física Do Centro Universitário Fametro - UNIFAMETRO

² Mestre em Ciências Morfofuncionais. Professora Adjunta Do Centro Universitário Fametro-UNIFAMETRO

A força muscular pode ser definida como uma habilidade do músculo em produzir ou resistir a uma força, podendo ser classificada como isométrica, isocinética ou isotônica que é traduzida pelo recrutamento de unidades motoras. (SHECHMAN; GESTEWITZ; KIMBLE, 2005)

Por sua vez, Sherrington (1925) conceitua Unidade Motora como um neurônio a-motor, seu axônio e as fibras musculares inervadas por esse axônio. O recrutamento das Unidades Motoras é determinado pelo que conhecemos como “princípio do tamanho”. Propriedades contráteis e energéticas delimitam o recrutamento adequado das unidades de acordo com a intensidade e duração das tarefas. (HODSON-TOLE; WAKELING, 2009)

A atividade muscular pode ser visualizada em ferramentas que permitem visualizar e quantificar as respostas neuromusculares através de variáveis específicas (DE LUCA, 1997; HEGYI. 2020) A oscilação presente nos dados obtidos nessas ferramentas revela um caráter não estacionário que pode e deve, ser alvo de pesquisas.

A não-linearidade das ativações musculares era ignorada ou não conhecida. Com o avançar dos estudos, foi evidenciado diferenças regionais de ativação de vários músculos. Tal característica pode ser associada a respostas musculares específicas da região a estímulos como dor, fadiga e treinamento. (HEGYI. 2020)

Hegyí ainda destaca que a distribuição não uniforme dentro e entre os músculos das lesões dos isquiotibiais pode estar ligada à distribuição não uniforme dentro e entre os músculos da atividade muscular.

A essência do comportamento começa a ser entendida como não-estacionária. Portanto a interpretação dos dados obtidos sobre comportamento motor deve ser orientada pela natureza ocasional dos fenômenos. (DAVIDS. et. al. 2013)

Para o tratamento dos dados, a estatística descritiva que utiliza medidas típicas de variabilidade como o desvio padrão, possibilitam apenas observações sobre a média e não medem como a sequência de tempo afeta os dados. Outra possibilidade de análise faz uso do conceito de entropia que é uma medida da quantidade de desordem em um sistema. (DAVIDS. et. al. 2013) Nesse sentido, a literatura apresenta formas de utilização da entropia com esse fim.

Diante desse contexto, a presente pesquisa tem como objeto de estudo: a entropia como ferramenta de interpretação de dados para a investigação do comportamento motor.

O estudo da natureza de dependência sequencial dos dados possibilita o entendimento das leis que caracterizam o comportamento do sistema a ser estudado. (DAVIDS. et. al. 2013) A maioria das ferramentas estatísticas vastamente utilizadas para a investigação do controle motor ignoram suas propriedades essenciais e, por conta disso, a produção científica voltada para essa questão carece de qualificação metodológica. Portanto, a justificativa para a escolha do tema tem caráter científico. Além disso, a temática do presente estudo surge de uma questão bastante presente na vida acadêmica do pesquisador. Desta forma, a proximidade com o assunto abordado caracteriza também, uma justificativa pessoal.

Esta revisão tem como objetivo reunir e discutir registros existentes na literatura da utilização de leituras entrópicas dos dados coletados de variáveis do comportamento motor como medidas de estabilidade e complexidade do mesmo.

As seguintes questões surgiram para guiar as investigações: A leitura entrópica da variabilidade é um marcador significativo da estabilidade das respostas neuromusculares frente a desafios motores? É possível utilizar esse tipo de leitura para investigar coordenação em diferentes escalas de organização?

Com os achados do presente estudo, pesquisadores e profissionais da área do treinamento desportivo acessam informações relevantes sobre métodos voltados para o entendimento da natureza não-estacionária do comportamento motor como resposta a uma demanda ocasional. Desta forma a conduta prática, bem como o embasamento teórico pode, de forma coerente, ampliar e aprofundar suas bases conceituais tendo em vista as características do sistema aqui destacadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Entropia

O conceito de entropia está presente nas leis da termodinâmica, como medida de desordem ou de irreversibilidade de um sistema físico. Visto que ela está intimamente ligada aos conceitos de ordem e desordem, a aleatoriedade, a previsibilidade, a variabilidade e a dependência temporal são características acessíveis a leituras entrópicas. (DAVIDS. et. al. 2013; BANDT e POMPE, 2002) Assim sendo, este é um conceito aplicável a diversas áreas do conhecimento que investigam o comportamento com aleatoriedade e desordem como: Psicologia e psiquiatria (PINCUS, 2006., DELIGNIERES, et. al. 2004), economia (SHEINKMAN e

LEBARON, 1989), meteorologia (LIU, et. al. 2011) futebol (LOPES, 2019), entre outros.

O conceito de entropia viria a ser utilizado por Shannon (1948) na teoria da informação, no período pós guerra. O autor descreveu suas bases matemáticas para calcular o nível de incerteza de uma série de códigos consecutivos através da quantidade de informação produzida a partir da utilização de logaritmo na base 2 da probabilidade de ocorrência de cada um dos símbolos presentes. Usou uma unidade de medida chamada Bit para quantificar a informação. A partir daí, uma série de adaptações e modificações contribuíram para a ampla utilização do conceito de entropia em diversos tipos de dados. Inclusive para séries temporais fisiológicas não estacionárias. (DAVIDS. et. al. 2013; GAO. et. al. 2012)

Kolmogorov (1968) propôs ideias derivadas da teoria da informação de Shannon que são conhecidas como Complexidade de Kolmogorov, buscam a investigação da aleatoriedade. Porém, a análise de dados periódicos com padrões explícitos é relativamente simples. O que não se reproduz em dados caóticos não-estacionários. (DAVIDS. et. al. 2013) Conseqüentemente, diferentes tipos de cálculos entrópicos surgiram para aumentar a efetividade e confiabilidade destas leituras para series temporais fisiológicas não-estacionárias. Dentre elas: Entropia Aproximada (PINCUS, 1991), Entropia de Amostra (RICHMAN e MOORMAN, 2000), Entropia de Permutação (BANDT e POMPE, 2002) e Entropia Multiescala (COSTA,2005).

Os trabalhos de Kolmogorov (1968) também trazem uma ferramenta conhecida como Entropia de “Kolmogorov Sinai” ou simplesmente “KS”: A entropia métrica de sistemas dinâmicos que se dedica a investigar a previsibilidade de uma série temporal. A KS está intimamente ligada ao expoente de Lyapunov que, por sua vez, reflete o caráter dissipativo de um sistema dinâmico. A KS é sensível ao “N” de dados, ou seja, ao tamanho da série temporal. (DAVIDS. et. al. 2013; GAO. et. al. 2012)

Diante disto, Pincus (1991), com base nos trabalhos já realizados na teoria da informação, apresenta a entropia aproximada (ApEn) com o objetivo de compartilhar um modelo prático para calcular a regularidade ou repetibilidade de séries temporais relativamente curtas e ruidosas. A ApEn é, aproximadamente, o logaritmo natural médio negativo de uma probabilidade ocasional da semelhança entre ponto de dados $m+1$ e um ponto de dados m , dentro de uma tolerância “ r ”. Estes valores são

tradicionalmente determinados como: $m=3$ e $r=20\%$. (PINCUS, 1991); $m=2$ e $r=15\%$ (COSTA,2005)

Dada a conceituação, os valores de ApEn são bastante sensíveis aos valores de r e m . Essa característica acaba criando um viés com cálculos de séries temporais muito curtas, dando origem a investigações que findaram em novas formas de entropia que carregam consigo adaptações específicas. (RICHMAN e MOORMAN, 2000)

A Entropia de Amostra (SampEn) proposta por Richman e Moorman (2000), é derivada de adaptações da Entropia Aproximada (ApEn) podendo ser conceituada como o logaritmo natural negativo da probabilidade condicional. Essas adaptações eliminam o viés de correspondência automática. Essa inconsistência gerada pela aplicação da ApEn em séries temporais curtas e ruidosas, bem como as bases matemáticas bem detalhadas para ApEn e SampEn, ambas medidas de regularidade do sinal, são expostas por Richman e Moorman (2000) e Pincus (1991). Diante deste contexto, a SampEn foi proposta para qualificar a aplicação da leitura entrópica em series temporais fisiológicas não-estacionárias como, por exemplo, sinais eletromiográficos. (DAVIDS. et. al. 2013)

Embora os tipos de entropia citados anteriormente se caracterizem como medidas de incerteza, regularidade ou estabilidade, elas não podem ser consideradas medidas de complexidade visto que a complexidade de um sistema está relacionada à sua riqueza escalar, e todas elas são limitadas a leitura de apenas uma escala (COSTA, 2005). Em decorrência dessa limitação, foi criada a Entropia Multiescala (MSE) que é um método capaz de realizar uma leitura da SampEn em diversas escalas de tempo derivadas de pontos de dados da série temporal original, mas sem sobreposição de pontos. (COSTA, 2005)

Com este direcionamento, características de uma escala de organização intramuscular, influenciadas por variáveis de arquitetura muscular descritas por Bosch (2016) podem contribuir bastante para o entendimento do que conhecemos como controle motor e sua ocasionalidade.

2.2 Controle motor

O estado de um sistema é derivado da mutualidade ocasional entre suas partes, desta forma, é evidente a característica volátil do comportamento. Tendo comportamento motor como o estado desse sistema, constantemente criado e redefinido com base na demanda que, por sua vez, também é originada ocasionalmente, compreendemos que as ferramentas que se propõem a investiga-lo precisam comportar suas características essenciais. (DAVIDS. et. al. 2013)

Barnstein (1990) possui um grande trabalho nesse seguimento com a apresentação de conceitos que viriam a fortalecer tais discussões. Os conhecidos “Problemas de Barnstein” apresentaram, de forma bem lúcida, as questões presentes.

O primeiro deles, descrito como problema dos “Graus de Liberdade”, é um problema que visa lidar com a parte estável do movimento. Expõe a perspectiva de que as possibilidades de soluções motoras para uma tarefa específica eram delimitadas pela história prévia do indivíduo, ou vivência do desafio. Tais soluções motoras foram denominadas por ele como: Graus de liberdade. Aqui, Bosch (2016) se aproxima de Barnstein quando traz o conceito de “atratores”, retratando partes estáveis do movimento que podem ser eficientes ou ineficientes, qualitativamente.

Se nos dedicarmos a aprofundar esse raciocínio, percebemos que não há uma chave mestra em forma de exercício que me capacite a lidar com as mais distintas tarefas motoras, tampouco uma representação do movimento ideal que não desconfigure o contexto. (HEALD, et. al. 2018)

Todo esse caminho traçado por Barnstein (1990) atribui ao conceito controle motor uma essência totalmente ocasional e tarefa-específica. Feito que fornece importantes implicações práticas para o universo do treinamento e contribuições teóricas para a presente atividade investigativa.

O segundo problema de Barnstein descrito na obra, trata do conceito adaptabilidade, ou seja, da parte instável do movimento. Leva em consideração a aleatoriedade das condições ambientais e suas influências no comportamento motor que, por sua vez, se traduz como resposta ao caos do contexto. Sob uma ótica inteiramente ecológica, atribui valores de complexidade à relação do organismo com o ambiente já abordada anteriormente. Aqui, Bosch (2016) se aproxima de Barnstein com o conceito de “flutuações”, que representam a instabilidade inerente ao movimento humano em sua relação com o ambiente.

A possibilidade de acesso aos graus de liberdade permite descobrir através dos erros e acertos ao longo das tentativas (Alta desordem), quais as soluções mais

eficientes e, com isso, aperfeiçoar a técnica ao estabilizar o movimento na direção dos graus de liberdade mais eficientes (Baixa desordem). (BERNSTEIN, 1990)

Para Bosch (2016), esta organização é reproduzida em diferentes escalas de organização que vão desde a escala intramuscular até uma escala interpessoal. Segundo o autor, a coordenação intramuscular diz respeito à organização em uma escala muscular e pondera características de comportamento que são delimitadas em variáveis de arquitetura muscular.

Estas variáveis respondem a estímulos e, com isso, a ideia de estabilidade e instabilidade presentes em uma ação motora ganha força. A interação com um ambiente caótico faz com que esses pontos sejam essenciais para a avaliação e investigação do controle motor. (MOO e HERZOG, 2018; HODSON-TOLE; WAKELING, 2009)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Tipologia da pesquisa

O presente estudo é definido como uma pesquisa bibliográfica de natureza básica. Severino (2007) descreve a pesquisa bibliográfica como um apunhado de registros anteriores que utiliza esse banco de dados, previamente publicados, como base para estabelecer uma discussão sobre o tema abordado de forma mais abrangente.

3.2 Critérios de elegibilidade e seleção dos estudos.

Os critérios de inclusão e exclusão dos estudos tem como direcionamento tornar a lista de estudos mais homogênea e qualificada. A vista disso, foram excluídos os estudos que não detalharam bem a amostra ou que apresentaram falhas graves na exposição da metodologia empregada. Aqueles que não estavam publicados na língua inglesa também foram excluídos. Como critérios de inclusão: apenas ensaios clínicos disponíveis na base de dados escolhida poderiam se classificar como elegíveis. A caracterização do tipo de entropia empregado pelo estudo também foi estabelecida como critério de inclusão.

A busca ocorreu nos meses de março e abril de 2020 e foi realizada na base de dados PubMed. Para a escolha da base de dados, foram levados em consideração: a abrangência, a viabilidade metodológica, a acessibilidade e a qualidade das publicações. A busca foi feita com descritores que, por sua vez, foram organizados visando maior abrangência dos resultados obtidos na busca: (Complexity OR

"Nonlinear dynamics" AND "Motor control" OR Running OR "Strength training" AND Variability OR Entropy)

Como já mencionado, apenas ensaios clínicos foram contabilizados na busca que foi realizada do mais geral para o mais específico. Desta forma, inicialmente os descritores foram pesquisados ao longo de todo o corpo do texto. Em seguida, com a busca avançada por "Título e Abstract" em que os descritores seriam buscados apenas nesses campos, induzimos a uma seleção mais específica dos artigos.

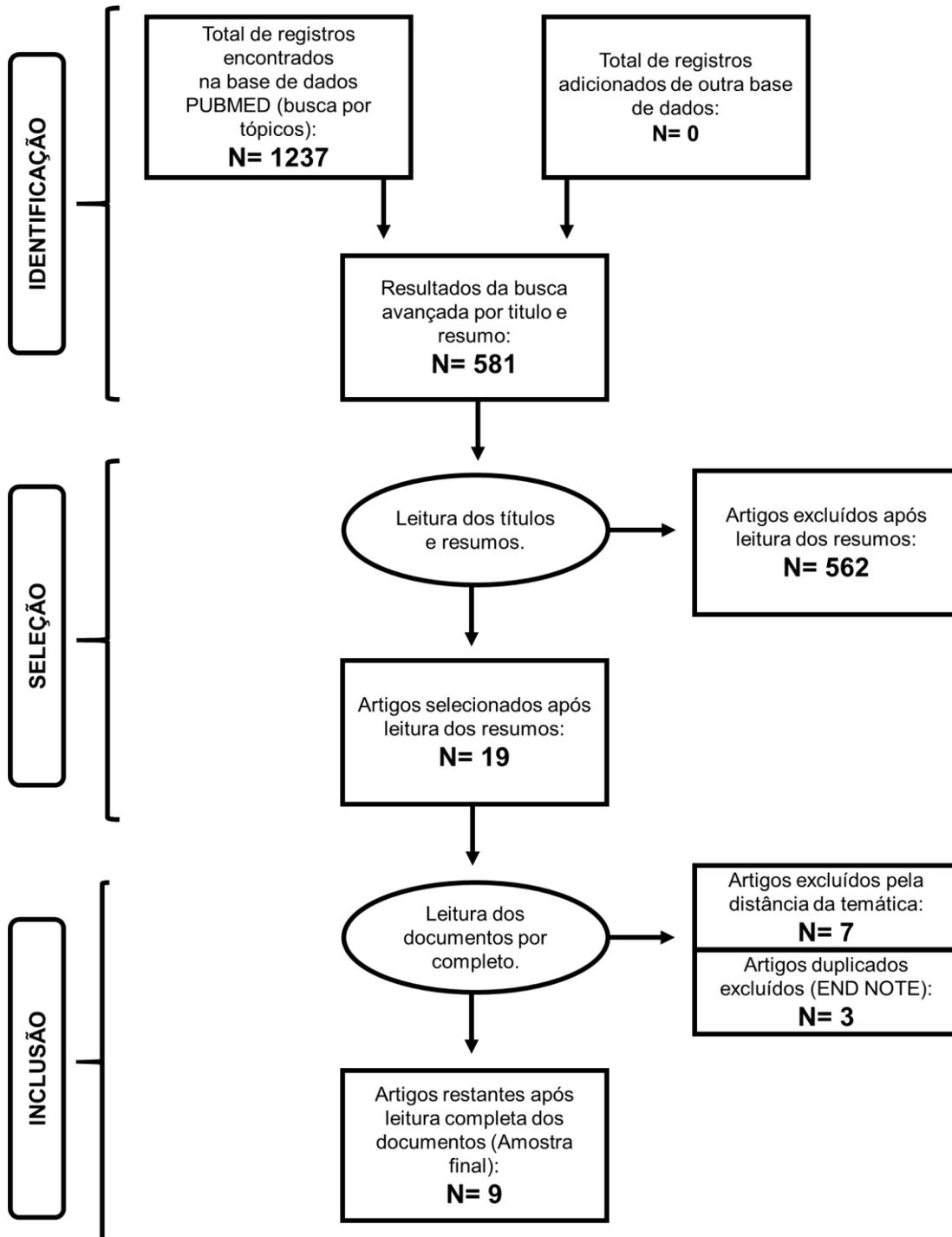
Os artigos restantes, a partir da leitura do abstract, foram avaliados tendo como base a coerência com o tema abordado pela presente revisão. Sucedendo esta leitura do abstract, os artigos selecionados foram transferidos para o software End Note que possibilita uma melhor visualização da lista de artigos além de facilitar a organização e eliminar possíveis duplicados e, por fim, os artigos elegíveis foram submetidos aos critérios de inclusão e exclusão.

3.3 Caracterização dos estudos

Após todos os passos de busca descritos, a amostra utilizada na revisão foi caracterizada com a intenção de obter informações sobre os sujeitos das amostras por grupo, como: sexo, idade, nível de habilidade prévio e saúde neuromuscular. Da mesma maneira, as peculiaridades metodológicas das pesquisas foram coletadas, tais como: as variáveis investigadas, a tarefa proposta, as ferramentas de coleta utilizadas, o tipo de entropia e de outros modelos estatísticos utilizados e a conclusão exposta pelo autor a partir da interpretação de seus resultados.

3.4 Resultados da busca

Todas as três etapas de busca estão bem descritas no fluxograma abaixo com os passos de seleção de estudos já relatados anteriormente e seus respectivos resultados. A identificação, seleção e inclusão dos artigos retratam o afinamento oriundo do avançar das buscas.



Fluxograma dos resultados da busca na base de dados.

4 RESULTADOS

Como resultado, esta revisão investigou os achados de nove ensaios clínicos publicados entre os anos de 2005 e 2019. Ao todo, 273 indivíduos participaram dos estudos. Dentre eles, apenas dois artigos realizaram suas pesquisas com amostras que possuíam limitações musculoesqueléticas (LEE, T.-R., 2010 e MORAITI, C. O.

et.al. 2009). Nenhum deles utilizou amostras com características de dificuldades neuro motoras patológicas, entretanto, um estudo utilizou uma amostra de indivíduos idosos saudáveis (FINO, P. C. et.al. 2015).

Foram encontradas diversas ferramentas de coleta de dados utilizadas para a investigação das variáveis em cada estudo. Percentualmente, a recorrência destas ferramentas destaca a utilização da plataforma de força e de sistemas optoeletrônicos, ambos presentes em 33,3% dos estudos. Logo em seguida, presente em 22,2% dos estudos, está o acelerômetro de tronco triaxial. Todas as demais ferramentas encontradas nos estudos estão presentes em apenas um artigo.

Dentre os tipos de entropia encontrados, o mais recorrente foi a entropia de amostra (SampEn), presente em 55,5% dos estudos. A entropia de Shannon e Entropia Multiescala utilizadas em 33,3% dos estudos, aparecem logo em seguida. Já a Entropia Aproximada, presente em 22,2% dos artigos, esteve afrente apenas da Entropia de Renyi e a Entropia de Análise de Quantificação de Recorrência que, por sua vez, foram encontradas em apenas 11,1% dos trabalhos. Todos os artigos utilizaram, além da leitura entrópica, ferramentas estatísticas de correlação, análise de variância, regressão e dispersão, aplicadas e delimitadas pelo desenho do estudo em questão. Apenas dois softwares para aplicação dos testes estatísticos e de leitura dos dados foram citados nos artigos MATLAB (55,5%) e SPSS (22,2%). Dentre os artigos que especificaram a filtragem dos dados das séries temporais (55,5%), todos utilizaram filtro Low-pass para frequência de corte.

A tabela a seguir possibilita a visualização das características de cada estudo de forma mais sucinta e acessível, facilitando a compreensão geral e superficial dos trabalhos que compõem esta revisão. Além disso, possibilita a visualização da heterogeneidade tanto das estratégias empregadas para avaliação do controle motor, quanto dos seus âmbitos de manifestação e variáveis coletadas. Condição essa que fortalece e aumenta a abrangência da presente ação investigativa.

Estudos elegíveis	Amostra	Instrumento de coleta	Tipo de entropia e interpretação dos dados	Variáveis investigadas	Intervenção	Conclusão
						Pesquisadores e médicos que tentam criar testes

FINO, P. C. et.al. (2015)	Setenta e cinco (75) indivíduos idosos saudáveis com idade média de 74,4 anos (Desvio padrão = 9). Separados em dois grupos: fallers (F) non-fallers (NF)	Placa de força	Shannon Entropy (ShanEn); Renyi Entropy (RenyEn); Approximate Entropy (ApEn); Sample Entropy (SampEn); Multiscale Entropy (MSE); Composite Multiscale Entropy (CompMSE); Recurrence Quantification Analysis Entropy (RQAEn).	Séries temporais do centro de pressão.	Teste postural (Manutenção de postura estática sobre placa de força com olhos abertos e, em seguida, olhos fechados)	clínicos para identificar quedas devem considerar uma combinação de todos os métodos de entropia ao criar um teste de classificação. Além disso, os classificadores MSE e CompMSE, usando dados de coordenadas polares, superaram os dados de coordenadas retangulares, incentivando mais pesquisas sobre as séries temporais mais apropriadas para a análise de entropia de estabilidade postural.
GLASS, S. M. et.al. (2019)	Cinquenta (50) adultos ativos e saudáveis (25 homens e 25 mulheres)	Placa de força	Multivariate Multiscale Entropy (MMSE); Coeficiente de variação. (CV)	Séries temporais do centro de pressão	Testes de equilíbrio, amplitude de movimento e força. Além disso, tarefas de movimento cíclico sob uma condição de controle (C) e com carga externa (W), foram realizadas.	Evidências moderadas apoiam uma associação entre restrições modificáveis e complexidade comportamental, mas não foi demonstrado um papel na mediação da perda de complexidade relacionada à carga.
LAI, S.-C. et.al. (2005)	Seis (6) voluntários adultos saudáveis, destros (3 mulheres e 3 homens) *Um participante	Mesa digitalizadora (Tablet); Caneta Intuos.	Shannon Entropy (Entropia da informação); Informação mútua.	Variabilidade das trajetórias de movimentos discretos.	Sequência de testes de trajetória baseados na manipulação de uma caneta sobre	A análise de entropia revelou estrutura para a variabilidade da trajetória e do resultado do movimento que foram mascarados pelas análises

	abandonou o estudo. Idade média de 24,6 anos (DP = 2,88)				uma mesa digitalizadora.	distributivas tradicionais de movimentos de mira discretos
LEE, T.-R., KIM, Y. H., SUNG, P. S. (2010)	Quarenta e seis (46) adultos com lombalgia (24 mulheres e 22 homens).	Eletromiografia; Million Visual Analog Scale (MVAS)	Shannon Entropy	Nível de fadiga pós intervenção e intensidade da dor.	Protocolo de exercícios de estabilização da coluna.	Os achados se baseiam na informação de que a relação entre a dor relatada e os valores da entropia de Shannon dos sinais eletromiográficos se mostrou existente.
MORAITI, C. O. et.al. (2009)	Seis (6) pacientes com reconstrução de ligamento (BPTB); Seis (6) pacientes com reconstrução (ST / G); Seis (6) indivíduos saudáveis.	Sistema optoeletrônico de 6 câmeras.	Approximate Entropy (ApEn).	Dados cinemáticos da variabilidade da marcha.	Marcha de 2 minutos na esteira com ritmo auto selecionado.	Após a reconstrução do LCA, usando BPTB ou quadruplo ST/ G, há aumento da variabilidade da marcha em comparação com indivíduos saudáveis.
PREATONI, E. et.al. (2010)	Sete (7) atletas. (4 homens e 3 mulheres). Idade média de 19,7 anos. Separados em dois grupos com base no nível de desempenho: Nível nacional; Nível internacional	Sistema optoeletrônico de 8 câmeras; Plataforma de força.	Sample Entropy (SampEn)	Dados cinemáticos de variabilidade da marcha e variáveis da força de reação do solo.	Testes de corrida de 15 metros.	O método descrito e aplicado tem o mérito de ser um índice sintético da organização neuromuscular e pode representar um meio importante para investigar peculiaridades individuais que podem estar relacionadas a técnica de desempenho, procedimentos de treinamento, reabilitação,

						aprendizado motor e lesões subjacentes.
SCHÜTTE, K. H. et.al. (2018)	Trinta (30) corredores saudáveis (16 homens e 14 mulheres)	Acelerômetros de tronco; Analisador metabólico de respiração.	Sample Entropy (SampEn).	Parâmetros dinâmicos de estabilidade extraídos de cada eixo de aceleração.	Teste incremental máximo na esteira.	Nossos resultados sugerem que corredores recreativos com menor AP de regularidade de passada, AP de RMS mais baixo e menor entropia de amostra ML têm uma marcha de corrida energeticamente menos eficiente em intensidades relativas similares. Além disso, a entropia da amostra ML não era mais mantida como um preditor significativo de EC quando as acelerações eram filtradas antes do cálculo.
TAMBURINI, P. et.al. (2018)	Dezenove (19) jovens saudáveis (14 homens e 5 mulheres)	Acelerômetro de tronco triaxial.	Coeficiente de Variação (CV); Sample Entropy (SampEn) Expoentes de Lyapunov de curto prazo; Relação harmônica (HR).	Variabilidade e estabilidade da marcha.	Teste de caminhada em ambientes distintos. Indicados como: ICW (caminhada controlada em ambiente interno), OCW (caminhada controlada em ambiente externo), OFW (caminhada livre em ambiente interno) e CFW	Houve diferenças significativas nas medidas de variabilidade entre os diferentes ambientes. Entretanto, para as medidas de estabilidade, a divergência dos ambientes parece não exercer forte influência.

					(caminhada livre em ambiente externo).	
VAZ, D. V., AVELAR, B. S., RESENDE, R. A. (2019)	Vinte e dois (22) adultos saudáveis foram divididos em dois grupos: Internal Focus – (IF) e External Focus – (EF).	Sistema optoeletrônico de quatro câmeras; Marcadores reflexivos.	Sample Entropy (SampEn); Multiscale Entropy (MSE);	Variabilidade angular da plataforma e deslocamento linear dos participantes	Teste de equilíbrio sobre plataforma instável com diferenciação das instruções sobre a tarefa entre os grupos.	Para o grupo focal externo, apesar dos melhores desempenhos, os valores de entropia multiescala dos movimentos foram menores em algumas escalas em comparação com o grupo focal, especialmente no início da prática e na retenção.

Tabela de descrição dos artigos que compõem a presente revisão.

5 DISCUSSÃO

Esta atividade investigativa buscou na literatura trabalhos que utilizaram métodos de entropia para a análise de séries temporais relacionadas ao comportamento motor. A variedade de tarefas e desafios motores encontrados dentre os trabalhos revela a versatilidade destas ferramentas para leitura de séries temporais distintas. Desde a variabilidade de trajetória de uma caneta sobre uma tela digital em diferentes velocidades estabelecidas, como teste de precisão investigado por Lai (2005), até a análise cinemática da marcha e da corrida através de sistemas optoeletrônicos investigado por Moraiti (2009), Preatoni (2010) e Vaz (2019).

Diante disto, a interpretação dos dados deve considerar sua essência e a entropia parece fornecer informações relevantes nessa direção. Para alcançar tal abrangência, adaptações matemáticas e metodológicas que tinham como objetivo corrigir ou driblar limitações observadas anteriormente, deram origem aos diversos tipos de entropia investigados.

As diferenças entre os tipos de entropia são investigadas. Embora sejam métodos bastante distintos, as comparações feitas visam elenca-los quanto a sua efetividade diante das características de dados específicos, nomeadamente o

comprimento dos dados e o ruído presente. Com seu direcionamento, Richman e Moorman (2000), realizaram esse procedimento para ApEn e SampEn com ponderações às falhas e limitações da ApEn em relação a SampEn sobre o comprimento dos dados e a presença de correspondências automáticas. Costa (2015) considerou as características multiescalares da MSE em relação a SampEn e ApEn. Por sua vez, Rhea (2011) destaca as distinções entre ApEn, SampEn e Entropia de Análise de Quantificação de Recorrência (RQAEn) em resposta às características de ruído de dados sintéticos determinísticos, semi determinísticos e estocásticos.

Em sua investigação, Fino (2015) pareou várias medidas entrópicas com dados coletados a 1000Hz e amostrados a 100Hz para testes de equilíbrio de idosos com histórico de queda e sem histórico de queda. Seus achados fortalecem Costa (2015) relatando que dentre todos os tipos de entropia, individualmente analisados, a melhor predição do comportamento de ambos os grupos foi obtida por MSE. Resultado que motivou uma hipótese do autor sobre a superioridade de predição, nesses moldes, da leitura entrópica em múltiplas escalas de tempo em relação às análises de apenas uma escala. Esta conclusão do autor converge para o argumento de que a MSE se posiciona como medida de complexidade por se preocupar em levar em consideração diferentes escalas de tempo, diferentemente dos demais métodos.

Além disso, Fino (2015) obteve melhor resultado de predição com regressão logística ao combinar os métodos do que com valores obtidos individualmente por cada leitura. Em suas considerações, o autor sugere que a elaboração de testes clínicos voltados para a prevenção de quedas em idosos deve considerar a combinação das diferentes leituras entrópicas para análise dos dados. Sugestão essa que merece maiores investigações, entretanto, em teoria, apresenta possível incongruência visto que, com a presença de ruídos ou com dados relativamente curtos, algumas dessas ferramentas apresentam resultados vazios. Tornando tal combinação turva e insegura, além da inconsistência inerente e lógica da junção de métodos distintos. O que não significa dizer que dizer que o acúmulo das diferentes informações coletadas não possa proporcionar uma visão mais rica e completa do comportamento investigado.

As características das séries temporais e suas influências nas ferramentas de leitura, nomeadamente o comprimento dos dados e o ruído, devem receber devida

atenção, pois colocam em jogo a confiabilidade dos resultados, condição exposta por Richman e Moorman (2000) e Rhea, (2011). Por isso, a escolha do tipo de entropia a ser utilizada e suas interpretações, devem ser cautelosas. Ao colocar em questão o uso de filtro nos dados, Schütte (2017) fortalece essa condição. Nesse caso, o autor comparou os resultados com e sem a aplicação de filtro nos dados coletados. Porém, algumas questões metodológicas do estudo devem ser observadas criticamente para um direcionamento seguro dessa questão, pois, as análises estatísticas utilizadas retratavam uma relação entre a economia de corrida (Calorimetria indireta) e medidas de estabilidade da corrida (SampEn da frequência de passos), que podem ocorrer ocasionalmente e, em teoria, de forma independente ao critério de filtragem utilizado. Principalmente tomando como base as variáveis investigadas pelo autor e a ausência de dados sintéticos com propriedades conhecidas.

Todavia, essa discussão não tem como objetivo expor uma possível fragilidade destas ferramentas, mas alertar dos critérios existentes para a efetividade de sua aplicação. Quando bem utilizadas, as leituras não lineares produzem resultados que as medidas típicas de variabilidade não são capazes de alcançar. Propriedade essas, descritas por Pincus (1991) e Richman e Moorman (2000) em cálculos de propriedades logarítmicas da repetibilidade dos pontos base em uma série temporal. Davids (2013) expõe com propriedade essas relações que são reforçadas por Preatoni (2010), Tamburini (2017) e Lee (2010).

Os resultados de Preatoni (2010) trazem a variabilidade da marcha e da corrida não apenas como ruído aleatório, mas como estrutura caótica não linear, destacando assim, o papel das leituras entrópicas na interpretação destes dados. Além disso, a investigação da variabilidade da marcha levou Tamburini (2019) a comparar medidas típicas de variabilidade (Desvio Padrão; Coeficiente de variação; Variabilidade da Passada) com medidas de estabilidade (Relação Harmônica; Expoentes de Lyapunov; Quantificação de recorrência; SampEn), em diferentes ambientes e com diferentes restrições na tarefa. Seus resultados mostram que as medidas de variabilidade foram afetadas pelas variações de ambiente induzidas. O mesmo não foi percebido com as medidas de estabilidade. Sugerindo que as repercussões das medidas típicas de variabilidade são sensíveis a pequenas mudanças ocasionais no ambiente, condição que atribui um comportamento volátil, por conta da superficialidade de uma leitura feita com base na média, à essas medidas. Estes achados reforçam o argumento de que

os resultados obtidos a partir destas ferramentas, não necessariamente denunciam alterações significativas no comportamento motor, mas simples movimentos dos valores mediais e seu agrupamento ocasional em um contexto que, quando aplicados a ferramentas de correlação linear, podem apresentar ou não, correlação estatisticamente significativa, a depender do retrato de estado momentâneo coletado. Como consequência, a presença ou ausência de correlação nesse sentido, perde relevância.

Por sua vez, Lee (2010), ao comparar a variabilidade dos sinais eletromiográficos, aqui utilizada apenas como teste de fadiga, com a escala de dor percebida em pacientes com dores lombares, verificou correlação positiva entre essas variáveis. Achados que seguem a mesma linha que os de Lai (2010), embora seja necessário um olhar crítico ao interpretar tais informações visto que, os valores de dor coletados subjetivamente são oriundos de uma percepção inteiramente momentânea de estado. Entretanto, o potencial das leituras das séries temporais coletadas pela eletromiografia, também relatado por Davids (2013), é capaz de fornecer importantes contribuições para a visualização da estabilidade de contração muscular em desafios motores de sobrecarga e isometria.

Em seu trabalho, Moraiti (2009) avaliou a recuperação funcional após reconstrução do ligamento cruzado anterior com uso da ApEn de variáveis cinemáticas da marcha e percebeu que mesmo após as intervenções, os níveis de variabilidade ficaram aumentados em comparação aos parâmetros normativos de controle. Conduzindo o autor a cogitar um conceito de variabilidade ótima de movimento que, sem dúvidas, apresenta fortes contradições. A tendência de linearizar medidas não lineares acaba inutilizando essas ferramentas pela negligência de seus motivos primordiais. A criação idealista de números ou padrões alvo, por exemplo, banalizam todo e qualquer método de análise dos dados, seja ele linear ou não linear.

A relação entre sobrecarga e complexidade de movimento é abordada por Glass (2019) utilizando um colete de carga como modulação do desafio motor em testes de equilíbrio. Com dados da força de reação do solo coletados com plataforma de força e interpretados por MSE, o autor tinha como referência a hipótese de perda de complexidade causada por alterações sensoriais, mecânicas ou fisiológicas citada

também por Fino (2015) que foi retratada quando obteve em seus resultados redução de complexidade em múltiplas escalas associada aos resultados de equilíbrio com o colete de peso.

6 CONCLUSÃO

A coordenação é desenvolvida em diferentes escalas de organização que permitem oscilações desde a escala muscular até a escala interpessoal. As sinergias encontradas nessas escalas possuem complexidade. Portanto, não devemos nos contentar em capturar e comparar os estados momentâneos de um sistema, mas nos empenhar em investigar e entender seu comportamento integralmente. Diferentes tarefas motoras expressam complexidades específicas que podem ser analisadas e quantificadas através das leituras das variáveis comportamentais coletadas.

Estas variáveis são diversas e isso pode ser visualizado na leitura dos artigos que compõem esta revisão. Diante disto, a interpretação dos dados deve considerar sua essência e a entropia parece fornecer informações relevantes nessa direção.

A escolha do método entrópico a ser utilizado deve, além de ser coerente com o tipo de informação que se almeja alcançar, considerar as características como o comprimento dos dados e o ruído das séries temporais em questão, principalmente na investigação de séries temporais fisiológicas não-estacionárias. As pesquisas indicam que as leituras não lineares possuem propriedades que possibilitam visualização da dependência escalar e temporal dos dados. Informações essas, inacessíveis para as medidas típicas de variabilidade.

Esta revisão possui limitações. A principal delas é a utilização de apenas uma base de dados para a apuração dos estudos, causada por dificuldades de acesso a outras plataformas. As estratégias de busca e seleção dos estudos foram pensadas com o objetivo de tentar amenizar este problema. Além disso, a ausência de uma variação da disposição e organização dos descritores de busca também é considerada uma limitação.

Futuras pesquisas podem explorar de forma mais profunda, abrangendo diferentes contextos e seus desafios motores distintos, os dados obtidos por ferramentas que não receberam a devida atenção na literatura aqui apurada e que, ao mesmo tempo, possuem grande potencial de informação sobre controle motor em suas séries temporais como, por exemplo, a eletromiografia.

Imagina-se que a variabilidade do sinal eletromiográfico forneça informações relevantes de características de estabilidade da contração muscular e, conseqüentemente, viabilize a leitura sobre a complexidade da tarefa, aprendizado motor e quantificação da fadiga acumulada, através de investigações das respostas neuromusculares e sua estabilidade ocasional. Desta forma, a entropia do sinal eletromiográfico apresenta possibilidades a serem exploradas sobre controle motor e sua complexidade.

Devemos pontuar também, que as possíveis correlações derivadas da relação entre os dados de variabilidade, complexidade, funcionalidade e desempenho sejam encontradas ocasionalmente, mas que não há qualquer causalção a ser retirada dessa relação.

Por fim, destacamos que a utilização de leituras não lineares, como a entropia, para a investigação do controle motor e do movimento, ainda se mostra carente, em termos de literatura, quando comparada à sua aplicação em outras áreas de conhecimento. Assim sendo, criamos a expectativa de que, com o surgimento de novas pesquisas direcionadas, este cenário mude.

7 REFERÊNCIAS

BANDT, C., POMPE, B. ***Permutation entropy: a natural complexity measure for time series***. Physical review letters. 2002.

BERNSTEIN, N. A. ***Physiology of movements and of activity***. Classics of science. Moscow: Nauka. 1990.

BERNSTEIN, N. A. ***The coordination and regulation of movements***. Oxford: Pergamon. 1967.

BOSCH, F. ***Strength Training and Coordination: Na Integrative Approach***. 2016

CASPERSEN, C. J., POWELL, K. E., & CHRISTENSON, G. M. (1985). ***Physical activity, exercise, and physical fitness: Definitions and distinctions for health-related research***. Public Health Reports. 1985.

COSTA, M., GOLDBERGER A. L., PENG, C-K. ***Multiscale entropy analysis of biological signals***. Physical Review. 2005.

DAVIDS, K., HRISTOVSKI, R., ARAÚJO, D., SERRE, N. B., BUTTON, C., PASSOS, P. ***Complex Systems in Sport***. Routledge Research in Sport and Exercise Science. 2013.

DELIGNIÈRES, D., FORTES, M., NINOT, G. ***The Fractal Dynamics of Self-Esteem and Physical Self.*** Nonlinear Dynamics Psychol Life Sci. 2004.

DE LUCA C. J. ***The use of surface electromyography in biomechanics.*** Journal of applied biomechanics. Boston University. 1997.

FINO, P. C., MOIDEHI, A. R., ADJERID, K., HABIBI, M., LOCKHART, T. E., ROSS, S. D. ***Comparing Postural Stability Entropy Analyses to Differentiate Fallers and Non-fallers.*** Annals of Biomedical Engineering. 2015.

GAO, J., HU, J., TUNG, W.W. ***Entropy measures for biological signal analyses.*** Nonlinear Dynamics. 2012.

GIBSON, J.J. ***The ecological approach to visual perception.*** New Jersey: Lawrence Earlbaum Associates, Inc, 1986.

GLASS, S. M., RHEA, C. K., SCHMITZ, R. J., ROSS, S. E. ***Potential Mediators of Load-Related Changes in Movement Complexity in Young, Healthy Adults.*** Journal of Athletic Training. 2019)

HEALD, J. B., FRANKLIN, D. W., WOLPERT, D. M. ***Increasing muscle co-contraction speeds up internal model acquisition during dynamic motor learning.*** Scientific Reports. 2018.

HEGYI, A., GONÇALVES B.A.M., FINNI, T. CRONIN, N.J. ***Individual Region- and Muscle-specific Hamstring Activity at Different Running Speeds.*** Medicine & Science in Sports & Exercise. 2019.

HEGYI, A. ***Within- and between-muscle hamstring electromyography activity in various exercises and at different running speeds.*** University of Jyväskylä. 2020.

HODSON-TOLE, E. F., WAKELING, J. M. ***Motor unit recruitment for dynamic tasks: current understanding and future directions.*** Journal of Comparative Physiology B. 2008

LAI, S.-C., MAYER-KRESS, G., SOSNOFF, J. J., NEWELL, K. M. ***Information entropy analysis of discrete aiming movements.*** Acta Psychologica. 2005.

LEE, T.-R., KIM, Y. H., SUNG, P. S. ***Spectral and entropy changes for back muscle fatigability following spinal stabilization exercises.*** The Journal of Rehabilitation Research and Development. 2010.

LIDDELL, M. A., SHERRINGTON, O. M. ***Recruitment and some Other Features of Reflex Inhibition.*** Physiology Laboratory, Oxford. Received January 23, 1925.

LIU, Y., LIU, C., WANG, D. ***Understanding Atmospheric Behaviour in Terms of Entropy: A Review of Applications of the Second Law of Thermodynamics to Meteorology.*** Entropy. 2011.

LOPES, A., TENREIRO, M. J. **Entropy Analysis of Soccer Dynamics**. Entropy. 2019.

MOO, E. K., HERZOG, W. **Single sarcomere contraction dynamics in a whole muscle**. Scientific Reports. 2018

MORAITI, C. O., STERGIU, N., RISTANIS, S., VASILADIS, H. S., PATRAS, K., LEE, C., GEORGOULIS, A. D. **The Effect of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction on Stride-to-Stride Variability**. Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery. 2009.

PINCUS, S. M. **Approximate entropy as a measure of system complexity**. Proc. Nati. Acad. Sci. USA. 1991.

PINCUS, T., VOGEL, S., BURTON, K., SANTOS, R., FIELD, A. P. **Fear Avoidance, and Prognosis in Back Pain: A Systematic Review and Synthesis of Current Evidence**. Arthritis & Rheumatism. 2006.

PREATONI, E., FERRARIO, M., DONÀ, G., HAMILL, J., RODANO, R. **Motor variability in sports: A non-linear analysis of race walking**. Journal of Sports Sciences. 2010.

RHEA, C. K., SILVER, T. A., HONG, S. L., RYU, J. H., STUDENKA, B. E., HUGHES, C. M., HADDAD, J. M. **Noise and complexity in human postural control: interpreting the different estimations of entropy**. PloS One. 2011.

RICHMAN, J. S; MOORMAN, J. R. **Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy**. American Physiological Society. Charlottesville, Virginia, July 29, 2018.

SCHÜTTE, K. H., SACKEY, S., VENTER, R., VANWANSEEELE, B. **Energy cost of running instability evaluated with wearable trunk accelerometry**. Journal of Applied Physiology. 2018.

SHEINKMAN, J., LEBARON, B. **Nonlinear Dynamics and Stock Returns**. The Journal of Business. 1989.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do Trabalho Científico**. São Paulo: Cortez, 2007

SHANNON, C. E. **The Mathematical Theory of Communication**. 1948

TAMBURINI, P., STORM, F., BUCKLEY, C., BISI, M. C., STAGNI, R., MAZZÀ, C. **Moving from laboratory to real life conditions: Influence on the assessment of variability and stability of gait**. Gait & Posture. 2018.

TSAKLIS, P., MALLIAROPOULOS, N., MENDIGUCHIA, J., KORAKAKIS, V., TSAPRALIS, K., PYNE, D., MALLIARAS, P. **Muscle and intensity based hamstring exercise classification in elite female track and field athletes: implications for exercise selection during rehabilitation**. Open Access Journal of Sports Medicine. 2015.

TURVEY, MT. **Coordination**. Am Psychol. 1990.

VAN B. H., BOSCH F. **Is there really an eccentric action of the hamstrings during the swing phase of high speed running? Part II: Implications for exercise**. J Sports Sci. 2016.

VAN, E. R. E. A., ROSENSTEIN, M. T., MCDEEMOTT, W. J., HAMILL, J. A **Nonlinear Dynamics Approach to Human Movement**. Journal of Applied Biomechanics. 2004

VAZ, D. V., AVELAR, B. S., RESENDE, R. A. **Effects of attentional focus on movement coordination complexity**. Human Movement Science. 2019.