



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

Ângelo Frederico Souza de Oliveira e Torres

**Entropia Multiescalar na Avaliação dos Efeitos do
Tai Chi Chuan na Progressão da Doença de Parkinson**

**Salvador
2017**

Ângelo Frederico Souza de Oliveira e Torres

Entropia Multiescalar na Avaliação dos Efeitos do Tai Chi Chuan na Progressão da Doença de Parkinson

Dissertação apresentada ao programa de pós graduação em física, Instituto de Física, Universidade Federal da bahia como requisito para obtenção do título de Mestre em Física

Orientador: Prof. Dr. José Garcia Vivas Miranda

Salvador

2017

Ângelo Frederico Souza de Oliveira e Torres

Entropia Multiescalar na Avaliação dos Efeitos do Tai Chi Chuan na Progressão da Doença de Parkinson / Ângelo Frederico Souza de Oliveira e Torres. – Salvador, 2017-

60 p. : il. (algumas cores.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. José Garcia Vivas Miranda

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia – UFBA

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Física, 2017.

1. Biomecânica. 2. Complexiade. 3. Parkinson. 4. Equilíbrio. 5. Entropia Multiescalar. 6. Tai Chi Chuan. I. José Garcia Vivas Miranda. II. Universidade Federal da Bahia. III. Instituto de Física. IV. Entropia Multiescalar na Avaliação dos Efeitos do Tai Chi Chuan na Progressão da Doença de Parkinson

Ângelo Frederico Souza de Oliveira e Torres

Entropia Multiescalar na Avaliação dos Efeitos do Tai Chi Chuan na Progressão da Doença de Parkinson

Dissertação apresentada ao programa de pós graduação em física, Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia como requisito para obtenção do título de Mestre em Física

Trabalho aprovado. Salvador, 7 de Novembro de 2017:

Prof. Dr. José Garcia Vivas Miranda
Orientador

Prof. Dr. Thiago Albuquerque de Assis
Doutor em Física pela Universidad
Politécnica de Madrid, UPM, Espanha
Professor da Universidade Federal da Bahia

Dr. Raphael Silva do Rosário
Doutorado em Física pela Universidade
Federal da Bahia
Bolsista Pesquisador do Senai-Cimatec

Salvador
2017

Esse trabalho é dedicado às milhares de crianças que sob a égide de um sistema excludente, tem suas vidas abreviadas ou desviadas. Crianças que pela violência física, moral e institucional são impossibilitadas de se desenvolver e transformar seu universo.

Agradecimentos

Agradeço a meu Pai Ogum, meu Pai Exu, minha Mãe Iemanjá, meu Pai Oxalá, meu pai Paulo, minha mãe Vera, meu pai Anselmo, meu pai Garcia, minha mãe Elaine e meus irmão de sangue, fraternos, Nitristas, LEFistas e eternos.

*"I dare do all that may become a man,
who dares more is none"*
(*Macbeth*, ato 1, cena 7, página 2)

Resumo

A doença de Parkinson atinge milhares de pessoas no mundo todo. Uma das consequências mais severas da doença é o aumento da frequência de quedas, dados os vários sintomas que afetam o equilíbrio e controle motor. O Tai Chi Chuan, milenar arte marcial chinesa, foi desenvolvida sob os princípios da medicina tradicional chinesa, portanto conectada com os processos de cura realizados por aquele povo. No ocidente, portadores de diversas doenças degenerativas têm se beneficiado dos poderes curativos do Tai Chi. O presente trabalho se propôs a medir a progressão da doença de Parkinson em pacientes no estado inicial divididos em dois grupos distintos; um que se submeteu apenas ao tratamento convencional e o outro que incluiu a prática do Tai chi a sua rotina diária. Mostramos que através da entropia multiescalar é possível observar diferença entre o avanço da doença nos pacientes praticantes e dos não praticantes.

Palavras-chave: Parkinson. Tai Chi Chuan. Equilíbrio. Entropia Multiescalar.

Abstract

Parkinson's disease affects millions around the world. One of its direct consequences is the increase of falling frequency, due to several symptoms that affect balance and motor control. The Tai Chi Chuan, ancient Chinese martial art, was created based on the principles of the Chinese traditional medicine, therefore connected to the healing processes experimented by these people. In the west, lots of patients of different degenerative diseases are recipients of the benefits of the martial art. The present paper measured Parkinson's progression on two separate first stage groups of patients, one was subjected to regular treatment and the other added Tai Chi Chuan to its daily routine. We show that through Multiscale Entropy Analysis we can observe differences between the progression of Parkinson's in the different groups.

Keywords: Parkinson's. Tai Chi Chuan. Balance. Multiscale Entropy.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de série temporal para cálculo da entropia amostral	25
Figura 2 – Comparação entre ruídos branco e $1/f$	26
Figura 3 – Esquema de obtenção dos sinais reduzidos	26
Figura 4 – Organização dos Dados	29
Figura 5 – Tarefas Executadas Pelos Pacientes	30
Figura 6 – esquema da organização geral do processamento de dados. Extração, Reamostragem e Separação (ERS), Cálculo da entropia multiescalar (MSE); Organização e Testes estatísticos (OTE).	31
Figura 7 – Etapa de de reamostragem, extração e separação dos dados	32
Figura 8 – Dados após o cálculo da Entropia Multiescalar	32
Figura 9 – Comparação entre tarefa simples e tarefas duplas	33
Figura 10 – Comparações entre sessões	33
Figura 11 – Teste entre os grupos	34
Figura 12 – Comparação Geral das tarefas duplas Contagem Regressiva (CR) e <i>Star Movement</i> (SM) com a tarefa simples (TS)	35
Figura 13 – Homogeneidade dos dados para as dupla tarefas.	37
Figura 14 – Grupo B: Comparação entre as tarefas, sessão final	38
Figura 15 – Grupo B: p-valores da comparação da sessão final	38
Figura 16 – Comparação a diferença entre as tarefas nas diferentes sessões	51
Figura 17 – Detalhe da comparação das tarefas na sessão final	52
Figura 18 – Tarefas Avaliadas entre sessões	52
Figura 19 – Resultado dos testes longitudinais para tarefas	53
Figura 20 – Comparação longitudinal das tarefas nos grupos	55
Figura 21 – Resultados dos testes das tarefas entre sessão inicial e final.	56
Figura 22 – Curvas de Entropia para o Grupo Tai Chi - Comparação nas sessões	57
Figura 23 – Resultados dos testes para o Grupo Tai Chi (A) comparando tarefas	58
Figura 24 – Curvas de Entropia para as tarefas nas sessões final e inicial Grupo Convencional (B)	59
Figura 25 – Resultados dos testes entre as tarefas em cada sessão para o Grupo Convencional (B)	59
Figura 26 – Detalhe do teste entre tarefas para o grupo convencional (B) na sessão final.	60

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	A Doença de Parkinson	21
2.1.1	Quedas e Parkinson	21
2.1.2	A Importância da Dupla Tarefa	22
2.2	O Tai Chi Chuan	22
2.3	Medidas não-lineares de Sinais Fisiológicos	23
2.3.1	Entropia e Complexidade	24
2.3.2	Entropia Amostral	24
2.3.3	Entropia Multiescalar.	25
3	METODOLOGIA	29
3.1	Dados	29
3.2	Protocolo	29
3.3	Análise	30
3.3.1	Comparação entre Tarefa Simples e Dupla	32
3.3.2	Entre Sessões	32
3.3.3	Tipos de Tratamento	34
4	RESULTADOS	35
4.1	Tarefa simples e Tarefas Duplas	35
4.2	Entre Sessões	36
4.3	Tipos de Tratamento	36
5	DISCUSSÃO	39
6	CONCLUSÕES	41
	REFERÊNCIAS	43
	APÊNDICES	49
	APÊNDICE A – TESTES E RESULTADOS PARA A COMPARAÇÃO ENTRE SESSÕES	51

APÊNDICE B – AVALIAÇÃO LONGITUDINAL DAS TAREFAS POR TIPO DE TRATAMENTO	55
APÊNDICE C – TESTES E RESULTADOS DA COMPARAÇÃO DAS TAREFAS NAS DIFERENTES SESSÕES DO GRUPO TAI CHI CHUAN (GRUPO A)	57
APÊNDICE D – TESTES E RESULTADOS DA COMPARAÇÃO DAS TAREFAS NAS DIFERENTES SESSÕES DO GRUPO CONVENCIONAL (GRUPO B)	59

1 Introdução

O Parkinson é uma doença neurodegenerativa progressiva. Dada sua complexidade, ela afeta não somente o portador mas suas famílias e comunidades. Uma das consequências mais severas da doença é o aumento do risco de quedas, devido majoritariamente à instabilidade postural. O Tai-chi Chuan, arte marcial originária da china, tem sido utilizada com sucesso no tratamento de diversas doenças degenerativas, como Osteoartrite (WANG et al., 2009a), fibromialgia (WANG et al., 2010a) e transtornos mentais (ABBOTT; LAVRETSKY, 2013a), sua indicação acontece muito em função das técnicas serem executadas com movimentos lentos, de baixo impacto e que produzem, portanto baixo estresse cardiovascular e pouca tensão na estrutura musculoesquelética. Esse trabalho visa compreender e medir as consequências do treinamento de Tai-chi Chuan no equilíbrio dos pacientes, utilizando a medida não-linear entropia multiescalar dos sinais de centro de pressão dos indivíduos portadores de Parkinson em estágio inicial (GELB; OLIVER; GILMAN, 1999).

Sendo uma doença neurodegenerativa, a progressão da doença resulta em uma piora do quadro clínico do paciente e redundando em uma crescente dificuldade de realizar tarefas cotidianas (JANKOVIC, 2009; FRANCHIGNONI et al., 2005). Assim, a expectativa é que o paciente vá perdendo com o tempo as habilidades motoras que permitem controlar os movimentos do corpo, inclusive a postura. Essa perda deve ser detectável através da análise da série temporal do Centro de Pressão. O que se espera do Tai Chi como tratamento terapêutico é que ele retarde os efeitos da degeneração, o que permitiria diferenciar o grupo de praticantes do de não praticantes.

Existem diversas medidas usadas na literatura para avaliar o centro de pressão de um indivíduo, velocidade média (LUOTO et al., 1996; KUUKKANEN; MÄLKIÄ, 2000; MOK; BRAUER; HODGES, 2004; VOLPE et al., 2006; LAFOND et al., 2009; SALAVATI et al., 2009), posição média (MIENTJES; FRANK, 1999; HAMAOUÏ et al., 2002), valor RMS do sinal dos eixos (MIENTJES; FRANK, 1999; BRUMAGNE; CORDO; VERSCHUEREN, 2004; BRUMAGNE et al., 2008) e da velocidade (HARRINGE et al., 2008) e deslocamento médio (GRIMSTONE; HODGES, 2003; HAMAOUÏ; DO; BOUISSET, 2004; POPA et al., 2007; SMITH; COPPIETERS; HODGES, 2005). Todas essas medidas, entretanto, são lineares e portanto presumem que a natureza do fenômeno avaliado também o seja. Ocorre que o equilíbrio é um fenômeno multifatorial, composto de diversos sensores e grupos musculares (WINTER, 1995) interagindo o que indica a natureza não linear do equilíbrio. A premissa desse trabalho é de que o sinal avaliado (Centro de Pressão) é gerado por um sistema não linear, portanto uma avaliação não linear do fenômeno é mais adequada para detectar diferenças no equilíbrio humano. Outros autores já trabalham sob

essa mesma premissa (COSTA; GOLDBERGER; PENG, 2005; CHRISTINI et al., 1995; DUARTE; STERNAD, 2008; ZHOU et al., 2017, 2017) e esse trabalho espera contribuir com o aprofundamento do tema.

No intuito de demonstrar esses resultados, esse trabalho foi dividido em cinco capítulos: Fundamentação, Metodologia, Resultados, Discussão e Conclusões. No capítulo fundamentação serão apresentados alguns dados relevantes sobre o Parkinson como sua prevalência no Brasil e no Mundo, além dos impactos dessa doença sobre o equilíbrio e os consequentes riscos de quedas; alguns conceitos básicos do Tai Chi Chuan dentro de seu contexto de criação, sua relação com a medicina tradicional chinesa e sua inserção no ocidente no tratamento de doenças degenerativas; os argumentos para a utilização de medidas não-lineares para avaliar sinais biomecânicos e a importância de uma visão de complexidade ao abordar tais fenômenos, apresentação da técnica da entropia Multiescalar, histórico e desenvolvimento, seu algoritmo e algumas interpretações.

No capítulo de Metodologia serão descritos: Os protocolos utilizados na aquisição dos dados, bem como os equipamentos e suas características técnicas; A natureza dos dados analisados, bem como os algoritmos utilizados para sua obtenção e manipulação; os testes estatísticos utilizados para inferir os resultados. No capítulo Resultados, serão exibidos os resultados obtidos nos testes. Na Discussão, os resultados serão comparados com os registros na literatura. Por fim, a efetividade da pesquisa será abordada no capítulo de Conclusões.

2 Fundamentação Teórica

2.1 A Doença de Parkinson

O Parkinson é uma doença neurodegenerativa e progressiva. Ela ocorre em 0.3% da população mundial afetando 5 milhões de pessoas em todo mundo (OLANOW; STERN; SETHI, 2009) e sua incidência vai de 8 a 18 pacientes por cem mil habitantes por ano. No Brasil a prevalência encontrada foi de 3,3% (BARBOSA et al., 2006).

A maioria dos pacientes de Parkinson exibe déficit de equilíbrio em algum estágio da doença e a instabilidade postural tende a piorar com seu avanço (JANKOVIC, 2009). Indivíduos com alteração no equilíbrio tem maior tendência a queda e frequentemente relatam medo de cair, redução da mobilidade, dificuldade de realizar tarefas diárias e pior qualidade de vida (FRANCHIGNONI et al., 2005).

A instabilidade postural, por si só, já é um comprometimento motor que afeta o equilíbrio, mas a bradicinésia (BERARDELLI et al., 2001; JANKOVIC, 2008) (lentidão dos movimentos), a rigidez (BROUSSOLLE et al., 2007; JANKOVIC, 2008) e o tremor de repouso (RAJPUT; ROZDILSKY; ANG, 1991) – que se apresentam em mais de 78% dos casos (GELB; OLIVER; GILMAN, 1999) – também contribuem para o déficit no sistema.

2.1.1 Quedas e Parkinson

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS) a queda é definida como um evento que resulta num individuo ficar prostrado inadvertidamente sobre um chão, piso ou outro pavimento inferior. A frequência de quedas na doença de Parkinson é alta, com eventos ocorrendo em 38 a 54% dos pacientes num período de três meses (PICKERING et al., 2007), 68%, num período de 12 meses (WOOD et al., 2002) e 87%, num período de 20 meses (HELY et al., 2008).

Um episódio de queda acarreta diversas consequências, sejam físicas (ferimentos leves, trauma em cabeça e fratura) ou psicossociais, impactando diretamente na mobilidade, capacidade funcional e qualidade de vida. (BLOEM et al., 2001; BALASH et al., 2005; GENEVER; DOWNES; MEDCALF, 2005; ASHBURN et al., 2008). Um estudo retrospectivo evidenciou que há mais risco de fraturas em parkinsonianos que em controles da mesma idade e sexo (GENEVER; DOWNES; MEDCALF, 2005). A maioria das quedas em pessoas com Parkinson acontece em ambientes fechados, quando se viram, levantam, inclinam-se para frente ou realizam duas tarefas ao mesmo tempo (dupla tarefa) (BLOEM et al., 2001).

2.1.2 A Importância da Dupla Tarefa

A dupla tarefa é algo que qualquer ser humano executa sem se dar conta todos os dias. Ainda que nem sempre sejam os melhores hábitos (como dirigir ao telefone), é comum caminhar e pensar sobre como organizar os problemas da casa ou do trabalho, correr na esteira da enquanto assiste TV ou até estudar e ouvir música. Em última análise, a dupla tarefa é a simples realização de duas tarefas simultâneas. É intuitivo pensar que realizar duas tarefas ao mesmo tempo pode tanto prejudicar grandemente a execução de uma delas, como dirigir e mandar mensagens de texto, quanto não afetar em nada como ouvir música e correr.

Alem da já mencionada tendência de queda em pacientes de Parkinson em dupla tarefa, [Wayne et al. \(2015\)](#) estudaram o efeito do Tai Chi na variabilidade da marcha em dupla tarefa envolvendo adultos saudáveis, [Springer et al. \(2006\)](#) estudaram os efeitos do envelhecimento na variabilidade da marcha em Dupla Tarefa e [Yogev-Seligmann, Hausdorff e Giladi \(2012\)](#) usaram Dupla Tarefa para discutir um modelo de priorização de tarefas. Todos eles, no fim, estudaram a dupla tarefa pelo mesmo motivo que ela está sendo observada aqui. O ser humano está quase sempre executando mais de uma tarefa simultaneamente.

Particularmente para esse trabalho, a dupla tarefa se insere imperativa pelo aumento de quedas e de parâmetros que se correlacionam com tal risco ([HERMAN et al., 2010](#); [MIRELMAN et al., 2012](#)). Há naturalmente tarefas que são mais custosas que outras e esse trabalho avaliará os efeitos de duas dupla tarefas distintas, uma que envolve a contagem regressiva em múltiplos de três (CR)([WAYNE et al., 2015](#)) e um *Star Movement*([GEORGE et al., 2007](#); [BROOKS, 1967](#)) (SM)

2.2 O Tai Chi Chuan

Segundo o Grão Mestre Chan Kowk Wai, em seu livro Tai chi Chuan, Estilo Yang Tradicional ([CHAN, 2014](#)), o Tai-chi Chuan, ou apenas Tai-chi, é uma arte marcial Baseada no I Ching, o livro das mutações e na medicina tradicional chinesa, que durante sua consolidação foi influenciada pelo Taoísmo, Budismo e Confucionismo, além de notáveis filósofos e pensadores orientais. Em comum a todas as influencias estava a ideia da não violência, do aprimoramento do ser e dos seus semelhantes através da prática marcial.

A influência da medicina tradicional chinesa se reflete diretamente nos movimentos executados pelo praticante. A ligação entre eles e os órgãos internos através dos canais energéticos (Mai) é o elemento fundamental do processo de cura através da prática. Entretanto, esse é um efeito avançado do Tai Chi, que será sentido apenas com anos de exercício, para este trabalho, os praticantes de Tai Chi foram submetidos a 24 semanas de treino, o que não deve ser suficiente para alcançar os efeitos mais avançados, entretanto:

No Tai Chi, todas as partes do corpo são solicitadas a trabalhar em conjunto, em vez de focar no fortalecimento das partes. A respiração acontece de forma natural, integrada aos movimentos. Os batimentos cardíacos se tornam suaves e cadenciados, possibilitando a melhoria da capacidade cardiorrespiratória e circulação sanguínea. Além disso, no Tai Chi Chuan trabalha-se bastante a região abdominal, os órgãos internos são massageados, melhorando o metabolismo e a digestão.

A mente dirige a execução dos movimentos do corpo, favorecendo a concentração e a conscientização, proporcionando melhora na coordenação motora e reduzindo o nível de stress.

(CHAN, 2014, p. 24, 25)

Dessa forma, é esperado que o praticante atinja algum nível de consciência corporal e concentração. Trabalhando a coordenação ele desenvolve as habilidades para realização de tarefas simultâneas ao mesmo tempo em que preserva os sistemas cardiovascular e musculoesquelético. Essa preservação, que é resultado da baixa velocidade em que os movimentos são executados, é o principal aspecto que torna o Tai Chi adequado para indivíduos com dificuldade de locomoção.

2.3 Medidas não-lineares de Sinais Fisiológicos

Não existe, *a priori* uma definição unívoca de sistema complexo (LADYMAN; LAMBERT; WIESNER, 2013). O que se sabe é que essa caracterização deriva da capacidade de se obter do sistema parâmetros específicos de uma ou mais áreas da disciplina. Atratores para sistemas caóticos, pontos críticos para criticalidade e liberdade de escala para redes, são todos indícios de que o sistema estudado tem em seu núcleo relações complexas. Assim toda abordagem complexa deve ser feita com muito cuidado, verificando se aqueles observáveis podem ser interpretados daquela forma ou podem classificar os sistemas em questão.

No caso do movimento humano, os paradigmas clássicos foram aos poucos sendo superados, pois seus modelos, baseados em medidas lineares como desvio padrão, médias e variâncias de diversas ordens, normalmente falhavam em dar conta de diversos aspectos fundamentais do movimento humano. O controle dos inúmeros graus de liberdade proposto por Bernstein (THOMAS, 1967), a conciliação da Consistência e Variabilidade do movimento habilidoso (TANI, 1998) e o problema da equivalência motora, ou seja a capacidade de produzir várias soluções para um determinado movimento (GLENCROSS, 1980) são alguns exemplos que os modelos de otimização lineares falham em explicar, seja gerando previsões de movimentos estereotipados, rígidos e de baixa adaptabilidade (TANI, 1998) ou gerando movimentos com variabilidade excessiva, falhando em minimizar os graus de liberdade do sistema (TANI, 1998).

Por outro lado, as técnicas não lineares vem mostrando importantes resultados, particularmente nas áreas de modelagem (KYRIACOU et al., 1999) e cardiolo-

gia(GOLDBERGER et al., 2002), chegando ao ponto de se criar um repositório com técnicas em software livre para uso geral (GOLDBERGER et al., 2000), dentre elas a Entropia Multiescalar(COSTA; GOLDBERGER; PENG, 2005) utilizada no presente trabalho para avaliar o equilíbrio de pacientes de Parkinson

2.3.1 Entropia e Complexidade

Dentro dos Sistemas complexos, a entropia é uma medida relativa às possibilidades combinatórias de um sistema. Entretanto, Costa, Goldberger e Peng (2002) desenvolveram uma metodologia que permite utilizar a medida entropia como parâmetro de complexidade. O algoritmo usado permitiria inferir a complexidade de sistemas, sendo respaldado por alguns resultados posteriores(COSTA; GOLDBERGER; PENG, 2005).

A técnica é baseada na Entropia Amostral(RICHMAN; MOORMAN, 2000), que tem raízes na Entropia de Shannon, Weaver e Burks (1951). Embora fosse mais confiável em relação a sua utilização em sinais fisiológicos e ser menos sensível ao tamanho do sinal, a entropia amostral, por si só não representaria uma medida de complexidade, mas esse fato poderia ser contornado se o sinal fosse analisado em diversas escalas (COSTA; GOLDBERGER; PENG, 2005). Zhang (1991) sugeriu uma tentativa de medir a entropia amostral em diversas escalas, mas sua técnica consistia em somar os resultados medidos em cada escala obtendo um número final.

O algoritmo aqui utilizado é aquele proposto por Costa, Goldberger e Peng (2002) e consiste basicamente no cálculo da entropia amostral para diversas escalas do sinal, tendo como resultado uma curva de valores de entropia, ou simplesmente curvas de entropia. o algoritmo em si será detalhado a seguir.

2.3.2 Entropia Amostral

O cálculo da Entropia Amostral é feito através de um algoritmo relativamente simples. Há dois parâmetros de relevância, r e m . r é um limiar de similaridade, ou seja, uma tolerância para que determinado valor de um ponto do sinal seja considerado igual a outro, ele normalmente é determinado como uma fração do desvio padrão – no caso desse trabalho foi utilizado o valor de 15% do desvio, valor padrão da literatura (COSTA; GOLDBERGER; PENG, 2002). m é o tamanho do histórico acessível ao sistema, ou seja, quantos pontos anteriores vão ser utilizados para prever o próximo. Usualmente (COSTA; GOLDBERGER; PENG, 2002), e foi o caso desse trabalho, utiliza-se $m = 2$. A figura 1 exemplifica o processo.

Com esses dois parâmetros estabelecidos, inicia-se o processo em $x=0$ e os $m+1$ primeiros pontos ($f(1), f(2), \dots, f(m), f(m+1)$) são fixados e são criados dois vetores base, um com m pontos e outro com $m+1$ pontos. Para facilitar a descrição, o vetor

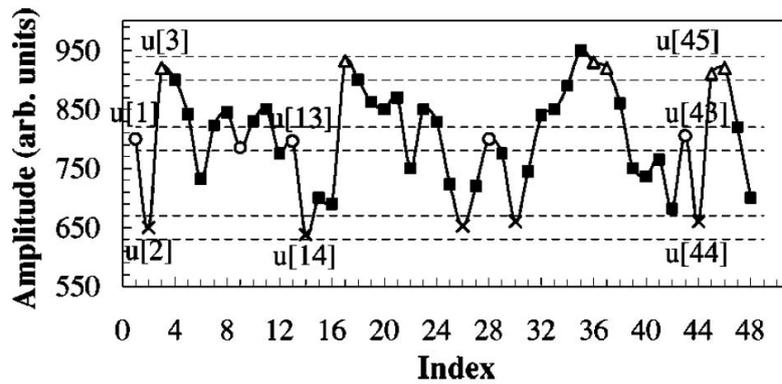


Figura 1: Na série temporal se estabelece o primeiro vetor $u[1]$, $u[2]$ de $m=2$ posições, depois o vetor $u[1]$, $u[2]$, $u[3]$ de $m+1=3$ posições. As linhas tracejadas representam $r=15\%$ do desvio padrão, e todos os pontos que estiverem dentro dessa faixa limitada por essas linhas são considerados iguais, ou seja $u[1]=u[13]=u[28]=u[43]$, $u[2]=u[14]=u[26]=u[30]=u[44]$ e $u[3]=u[36]=u[37]=u[45]=u[46]$.

Fonte: (COSTA; GOLDBERGER; PENG, 2005)

de m pontos será chamado de " P_m " e o vetor de $m + 1$ pontos de " P_{m+1} ". A partir daí, o algoritmo varre o sinal contabilizando padrões de m pontos consecutivos similares ao vetor P_m e padrões de $m + 1$ pontos similares ao vetor P_{m+1} . Após isso, calcula-se o negativo do logaritmo da razão entre o número de P_{m+1} pelo número de P_m encontrados (equação 2.1). É importante salientar que pela forma como o algoritmo foi criado, o número de padrões encontrados para P_m e P_{m+1} é sempre no mínimo 1.

$$S_E(m, r, N) = -\ln \frac{\sum_{i=1}^{N-m} n_i^{m+1}}{\sum_{i=1}^{N-m} n_i^m} \quad (2.1)$$

Esse processo é repetido até o ponto $x=N-m-1$, onde N é o número de pontos do sinal. Os valores de Entropia amostral para cada x são então somados, resultando o valor da entropia amostral para aquele sinal. É também importante notar que tanto o sinal perfeitamente regular, ou seja em que o número de P_m e P_{m+1} sejam iguais, ou um sinal que nunca se repete, ou seja, em que o número de P_m e P_{m+1} seja sempre a unidade, tem entropia amostral nula.

2.3.3 Entropia Multiescalar.

Como já foi dito, isolada, a Entropia não mede complexidade, mas segundo Costa, Goldberger e Peng (2005), a medida feita para múltiplas escalas pode revelar a natureza complexa de um determinado sistema. De fato a comparação feita entre ruído branco e ruído $1/f$ se mostra promissora e é possível observar características fundamentais dos sinais através da análise. A figura 2 mostra o resultado da técnica aplicada aos dois tipos

de ruído. Antes de entrar em maiores detalhes sobre a comparação entre os tipos de ruído, é importante estabelecer a técnica utilizada para investigar as diferentes escalas.

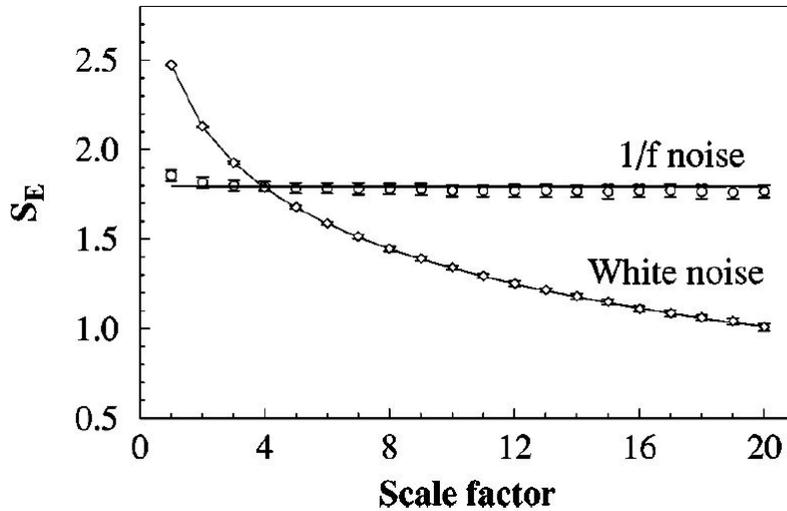


Figura 2: Mostra como a entropia se mantém quase constante para todo o espectro de escalas no $1/f$ enquanto para o ruído branco há uma queda aparentemente exponencial.

Fonte: Costa, Goldberger e Peng (2005)

Costa, Goldberger e Peng (2002) sugeriram que a partir do sinal original fossem criados sinais reduzidos (*coarse-grained signals*, tradução livre do autor). Cada sinal reduzido seria referente a uma escala adicional de avaliação. A obtenção desses sinais seria feita através de um fator Δ e a Δ -ésima série teria N/Δ pontos e cada ponto seria o resultado da média de Δ pontos adjacentes do sinal original sem superposição. A figura 3 mostra um esquema da obtenção dos sinais reduzidos

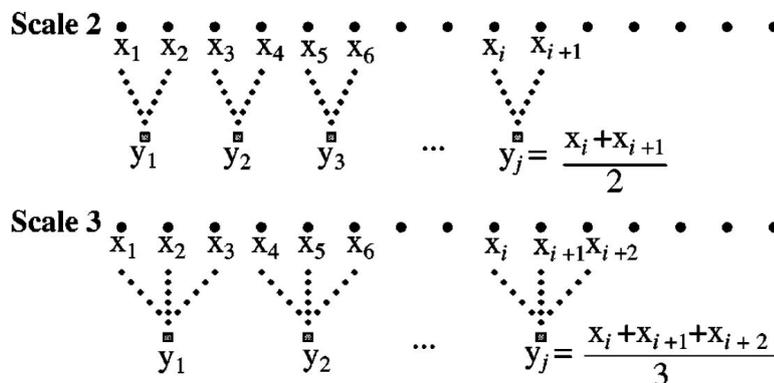


Figura 3: exemplo de obtenção de sinais reduzidos para a segunda e terceira escalas. A média é feita sobre conjuntos de valores adjacentes que não se sobrepõem.

Fonte: Costa, Goldberger e Peng (2005)

Uma vez obtidos os valores de entropia para cada escala, pode-se inferir, dado o perfil da curva “Entropia Aproximada x Escalas” o grau de complexidade dos sinais. Agora é possível inferir algumas coisas sobre os resultados da figura 2. Da forma como os sinais reduzidos são construídos, ao passo que as escalas vão aumentando acontece algo similar à uma suavização e as frequências mais altas do sinal são perdidas primeiro, como o ruído branco tem igual amplitude para todas as frequências, a informação nele contida é perdida rapidamente, daí a queda aparentemente exponencial.

Quanto ao ruído $1/f$, ele é composto de sinais cujas amplitudes são o inverso da frequência característica deles, gerando menos perda na regularidade no sinal com a suavização decorrente do processo de *coarse-graining*. Essa lógica de construção acaba gerando um sinal que exibe auto semelhança entre as escalas, o que é responsável pela manutenção da regularidade do sinal.

3 Metodologia

3.1 Dados

Os dados aqui utilizados foram cedidos pelo Laboratório de Análises do Movimento (Motion Analysis Lab - MAL) com sede em Boston, Massachusetts. A coleta ocorreu entre os anos de 2015 e 2016 envolvendo 32 pacientes de Parkinson divididos em dois grupos: um submetido ao tratamento convencional apenas (Grupo B) e o outro ao tratamento convencional com adição de aulas e da prática de Tai-chi chuan (Grupo A). Todos os pacientes foram avaliados em três momentos distintos (aqui definidos como sessões), antes de começar o tratamento, após 12 semanas e ao fim de 24 semanas. A figura 4 mostra um diagrama ilustrativo de como os dados são organizados.

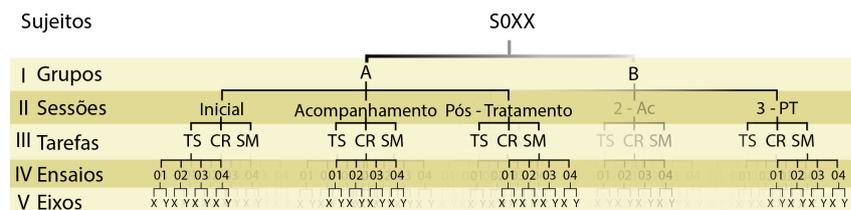


Figura 4: Dados organizados por nível hierárquico. Os sujeitos são classificados em (I) Grupos, A ou B, realizam três (II) Sessões de avaliação (Inicial, antes do tratamento, de Acompanhamento e Pós-tratamento) dentro das quais são realizadas as três (III) Tarefas de Equilíbrio, Tarefa Simples (TS), Contagem Regressiva (CR) e *Star Movement* (SM). Para cada uma delas são feitos quatro (IV) Ensaios e os dados são obtidos na forma de (V) Eixos coordenados X e Y.

3.2 Protocolo

O protocolo utilizado na pesquisa envolvia uma série de avaliações tanto clínicas quanto biomecânicas. Elas foram realizadas em três momentos distintos: Antes de começar o tratamento – Sessão Inicial, após doze semanas – Sessão de Acompanhamento, e a avaliação final – Sessão Pós-Tratamento, 12 semanas após a segunda sessão. Os dados para esse trabalho foram obtidos através de uma plataforma de força (Kistler Instruments Corp, Amherst, NY).

Foram estipuladas três tipos de tarefa de equilíbrio: Uma tarefa de equilíbrio simples (TS), em que o sujeito estaria de pé sobre a plataforma, pés afastados a largura dos ombros, braços relaxados ao lado do corpo e olhos abertos e duas tarefas duplas, a primeira (CR) consistia em contar a partir de 500 até 1 em múltiplos de três, em pé sobre a plataforma,

nas mesmas condições da tarefa simples, a segunda aplicou-se um protocolo *Star Movement* (SM), que consiste na localização imaginativa de uma estrela em um plano com quatro quadrantes em que o examinador indica a posição inicial e movimentos sucessivos, ficando a cargo do examinado determinar a posição final da estrela (GEORGE et al., 2007). Ver figura 5 para referencia visual das tarefas.

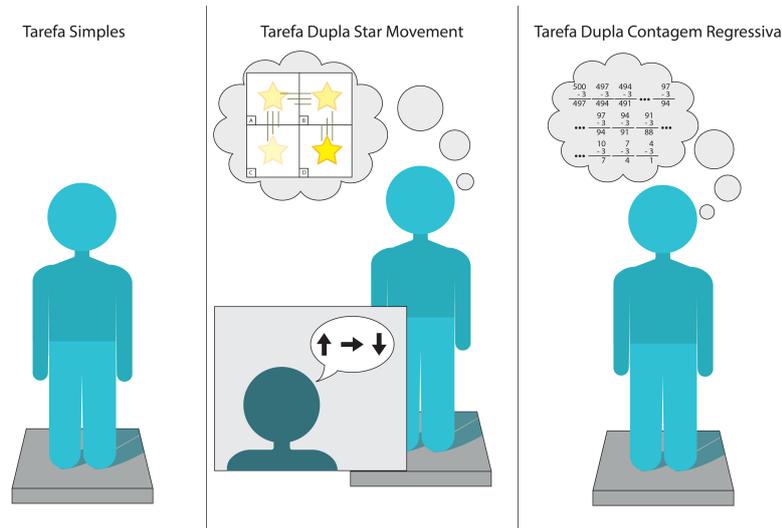


Figura 5: A imagem exemplifica as tarefas Simples, Dupla de *Star Movement* e a Dupla de Contagem Regressiva.

Para cada tarefa foram realizados quatro ensaios de 1 minuto . Entre eles, o sujeito deveria descansar sentado por um minuto. A não observância de alguma dessas etapas foi fator para exclusão de dados.

3.3 Análise

Devido aos equipamentos utilizados para a aquisição dos dados, os dados foram registrados no formato c3d, tipo de arquivo padrão do dispositivo da coleta. Para a obtenção e análise dos dados, dois *scripts* do programa MATLAB(R) foram utilizados: um para extração, reamostragem e separação dos dados (ERS) e o outro para organização e testes estatísticos (OTE)), bem como um programa em C, utilizado para o calculo da entropia multiescalar (MSE). Os Scripts foram produzidos pelo autor e por seu orientador e o programa foi obtido na internet (em <<https://physionet.org/physiotools/mse/>>), o mesmo utilizado por Costa, Goldberger e Peng (2005).

A Preparação e análise dos dados seguiu três etapas básicas esquematizadas na figura 6. Primeiro se aplicou o *script* ERS sobre os arquivos c3d, para extrair o sinal de posição (X e Y) de cada um, reamostrá-los para 360Hz e separar os sinais dos eixos em dois arquivos distintos, cada um com uma coluna contendo os dados de posição no tempo de cada coordenada, portanto duplicando o número de arquivos. A extensão desses arquivos

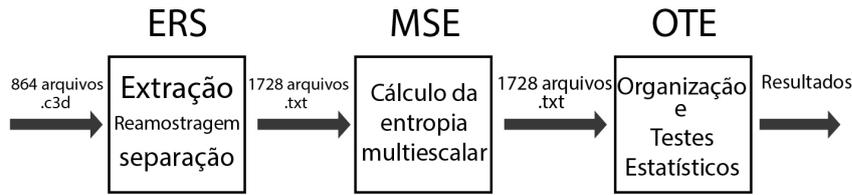


Figura 6: esquema da organização geral do processamento de dados. Extração, Reamostragem e Separação (ERS), Cálculo da entropia multiescalar (MSE); Organização e Testes estatísticos (OTE).

deve ser `.txt`, que é a extensão de entrada do programa MSE, que é a segunda etapa do processo. O MSE não altera o número total de arquivos, tendo como saída um arquivo com extensão `.mse` para cada arquivo `.txt` de entrada. Por fim o segundo *script* é rodado, tendo como entrada os arquivos `mse`. OTE organiza os arquivos numa estrutura de dados e depois promove os testes estatísticos para avaliação.

Os dados foram filtrados por um algoritmo *Buttreworth* passa-baixa de 25Hz logo após a extração, sob a hipótese que o sistema efetor humano não produz movimentos acima de tal frequência (COLLINS; LUCA, 1993). Portanto, o limite inferior de tempo foi estabelecido em $40ms$. O limite superior foi estabelecido pelas limitações do programa MSE, que na última escala fornecia um sinal de resolução da ordem de $111ms$.

Dada a estrutura nervosa que coordena o movimento humano, o tempo de resposta pode ser dividido em dois intervalos de tempo, abaixo e acima de 100 ms. Abaixo, o corpo executa o movimento em um sistema de *loop* aberto ou *feedforward*, acima numa dinâmica de *loop* fechado ou *feedback* (COLLINS; LUCA, 1993). No caso do equilíbrio, a estrutura majoritariamente presente é a de *loop* aberto, estando em conformidade com os limites estabelecidos pela metodologia.

Separados os eixos em arquivos diferentes (Figura 7), os dados foram introduzidos no programa MSE, que gerou os arquivos `.mse` com as escalas em uma das colunas e os valores de entropia amostral da respectiva escala em outra.

A seguir o *script* OTE foi rodado sobre os arquivos egressos do MSE. Esse *script* lê os arquivos de entrada e os organiza dentro de uma matriz multidimensional. Cada uma das dimensões da matriz corresponde a uma categoria: Sujeito, Grupo, Sessões, Tarefas, Eixo e Ensaio e são indexadas para facilitar o acesso e a manipulação. Depois de reorganizados dessa forma, o *script* calcula a média dos valores de entropia por escala numa determinada tarefa de uma determinada sessão. A média é feita sobre os valores de entropia dos diferentes ensaios de uma sessão para cada tarefa. Os dados então ficam como ilustrado no diagrama da figura 8.

A seguir, os dados foram organizados para permitir as comparações.

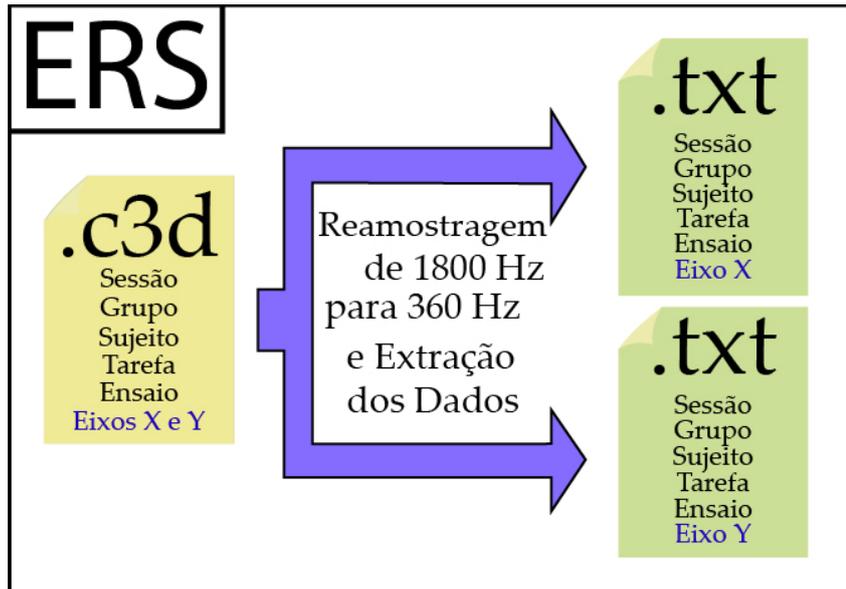


Figura 7: Diagrama que ilustra a obtenção dos dados dos arquivos .c3d e criação dos dois arquivos .txt, um para cada eixo coordenado

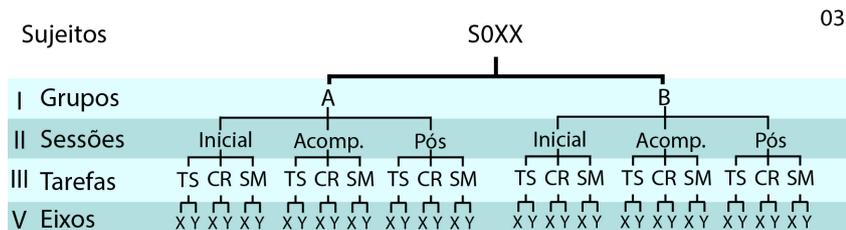


Figura 8: diagrama mostra que o nível IV Ensaio foi subtraído da estrutura. Assim, para cada tarefa teremos duas séries temporais, uma para cada (V) Eixo.

3.3.1 Comparação entre Tarefa Simples e Dupla

Essa separação consiste em tomar todos os dados dos eixos X e Y, sem considerar qualquer outro nível de organização que não fossem as tarefas. O objetivo aqui é comparar as curvas de entropia das tarefas simples com cada uma das tarefas duplas separadamente.

Como mostra a figura 9, há basicamente duas comparações nessa etapa, o interesse é comparar a curva de entropia referente às tarefas duplas com a tarefa simples, independente do período em que foram coletadas.

3.3.2 Entre Sessões

Ao separar os dados entre sessões, o interesse é fazer duas comparações, verificar se há diferenças entre tarefas duplas e simples em momentos distintos e verificar se uma mesma tarefa se altera significativamente com o tempo, independentemente do tipo de tratamento. Para isso, foram retirados da comparação os dados referentes às medidas feitas no acompanhamento.

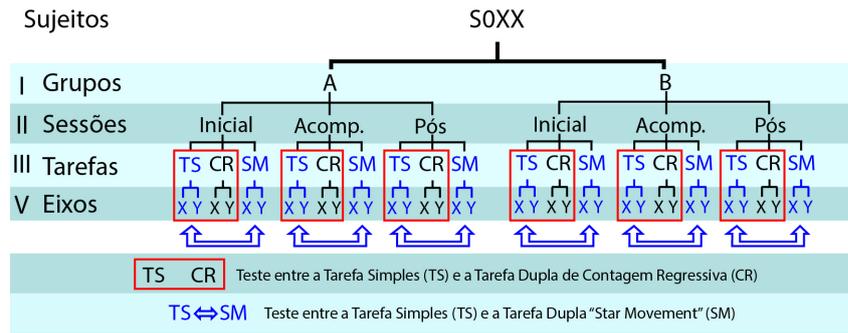


Figura 9: O retângulo vermelho explicita a comparação entre TS e CR, enquanto a cor azul e seta azul marcam a comparação entre TS e (SM). Embora todas as curvas referentes a cada eixo sejam comparadas ao mesmo tempo, tal comparação é feita sempre dentro da mesma tarefa de uma dada sessão

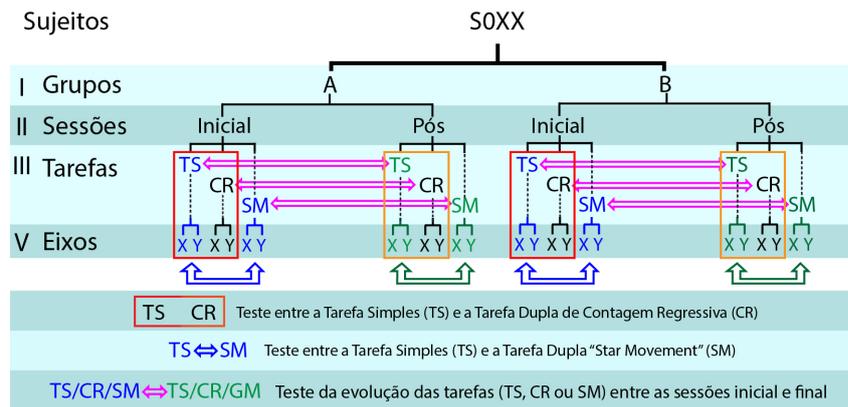


Figura 10: Os retângulos vermelhos simbolizam as comparações entre TS e CR enquanto os laranja são referentes às comparações de TS e SM . A mesma cor de fonte sinaliza que os dados serão agrupados no mesmo teste. As setas azuis e verdes se agrupam da mesma forma. Já para as comparações representadas pelas setas cor-de-rosa (comparações de uma mesma tarefa ao longo do tempo), os testes são agrupados pelas próprias tarefas (TS, CR, SM).

As comparações "entre sessões" ignoram os grupos aos quais o sujeito fora alocado. As comparações foram para entender como as tarefas evoluíram no tempo e como as diferenças entre tarefas duplas e tarefa simples evoluem com o tempo. A figura 10 mostra os agrupamentos por cores.

Comparou-se TS, CR e SM da sessão inicial com TS, CR e SM da do pós-tratamento, respectivamente. Comparou-se TS com CR e TS com SM na Sessão inicial e na Sessão Pós-Tratamento.

3.3.3 Tipos de Tratamento

As comparações dos Tipos de Tratamento são as mesmas da sessão anterior, com o adendo de que os grupos aos quais pertencem os sujeitos foram levados em consideração. Assim, serão dois grandes blocos de comparação "Entre Sessões", um para o Grupo A e o outro para o grupo B.

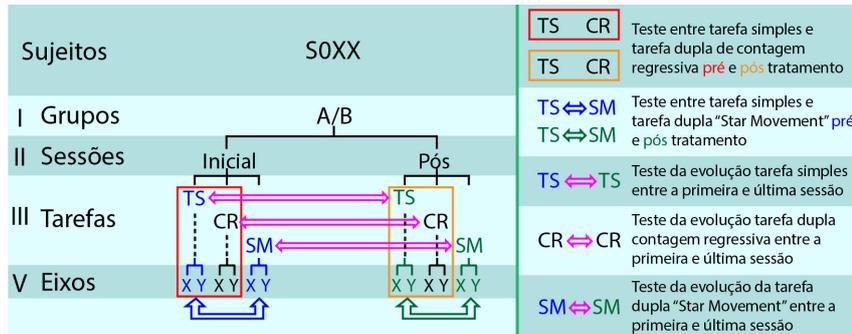


Figura 11: O retângulo Vermelho corresponde à comparação entre TS e CR nas sessões iniciais de cada sujeito, o laranja é a mesma comparação para a sessão pós-tratamento. A seta azul é representa a comparação entre TS e SM na inicial, enquanto a verde corresponde a mesma comparação das sessões finais. As comparações de mesma tarefa em sessões diferentes são separadas por tarefa (TS, CR e SM).

A figura 11 exibe uma representação dos testes feitos dentro da estrutura de dados. Comparado com a figura 10, vê-se que os dois grupos não são explicitados, uma vez que os testes são executados para cada grupo separadamente.

Portanto, aqui foram comparadas as medidas das tarefas duplas (Contagem Regressiva (CR) e *Star Movement*) com as medidas da Tarefa Simples (TS) para cada sessão e foi avaliada a evolução no tempo de cada uma das tarefas, comparando as medidas das execuções na sessão inicial e final. Isso foi feito para cada um dos grupos separadamente, com o intuito de se obter parâmetros para avaliar os diferentes métodos de tratamento.

4 Resultados

O teste escolhido para avaliar as comparações foi o Wilcoxon pareado¹, já que não foi verificada a normalidade necessária para a realização do teste T. Dividiu-se os resultados na mesma forma das comparações descritas na metodologia.

Como foram feitos vinte testes, um para cada escala, o valor de significância α foi corrigido de 0,05 para 0,0025, ou seja $\alpha = 0,05/20 = 0,025$, de acordo com a correção de Bonferroni (BONFERRONI, 1936).

4.1 Tarefa simples e Tarefas Duplas

O objetivo desse teste era validar a metodologia, comparando as tarefas duplas com a tarefa simples. O resultado esperado é que haja diferenças significativas na comparação das tarefas duplas (contagem regressiva (CR) e *Star Movement* (SM)) com a tarefa simples.

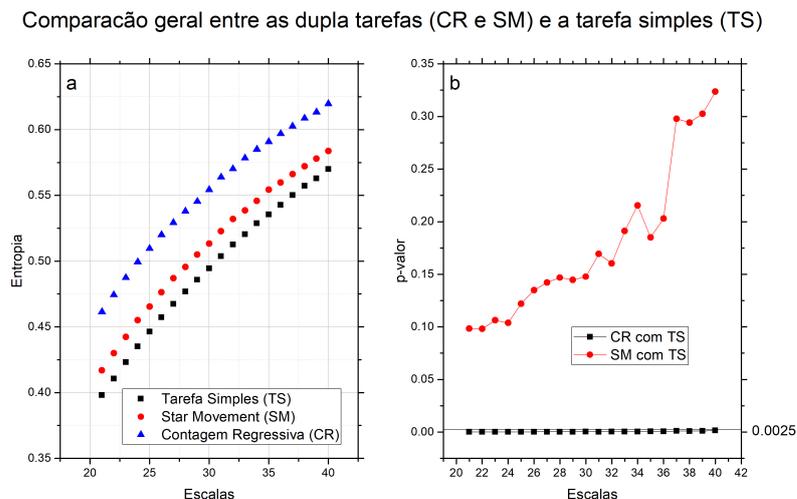


Figura 12: Em (a) são exibidas as curvas médias de entropia por escala, mostrando como essas médias diferem entre si. (b) exhibe os resultados dos testes de Wilcoxon pareado para as duas comparações. A linha de 0,0025 representa o nível de significância corrigido por Bonferroni.

A figura 12 mostra (a) as médias por escala das curvas de entropia que foram comparadas. As médias são apenas representações, uma vez que as comparações foram feitas com todo o conjunto de dados e de forma pareada. Ela está sendo exibida para

¹O teste pareado de Wilcoxon é um teste não paramétrico que compara dois conjuntos de medidas com do mesmo tamanho. ele é utilizado em casos em que a distribuição dos conjuntos de dados não é normal. (WILCOXON, 1945)

dar uma ideia de como os valores estão distribuídos. Em 12(b) são exibidas as curvas dos p-valores por escala, onde cada ponto é o resultado do teste Wilcoxon pareado realizado para a referida escala. A curva em vermelho é referente à comparação entre a Dupla Tarefa de *Star Movement* e a Tarefa simples. Tal curva exhibe valores superiores ao limiar de significância desejado ($\alpha = 0,0025$). A curva em preto é referente à comparação da Tarefa Dupla de Contagem Regressiva. Com valores abaixo do limiar de significância, o teste aponta para a rejeição do modelo nulo, ou seja, mostrando que há diferenças significativas entre a complexidade das tarefas, contrariando parcialmente as expectativas preliminares, indicando a possibilidade de tarefas duplas distintas terem efeitos diferentes no equilíbrio. O nível de significância foi atingido para todas as escalas.

4.2 Entre Sessões

Aqui objetivou-se observar se haveria diferença significativa entre as tarefas duplas e a tarefa simples em cada sessão (Inicial e Final). Também tentou-se observar se haveria alguma alteração significativa na execução de cada tarefa ao longo do tempo, comparando-as entre sessões.

Não se obteve diferenças significativas em nenhum dos testes feitos (Ver Apêndice A).

4.3 Tipos de Tratamento

Por fim, tentou-se observar os efeitos dos diferentes tratamentos separando os sujeitos por grupo. O grupo A, de praticantes de Tai Chi como terapia complementar, e o grupo B, que se submeteu apenas ao tratamento convencional. Os testes executados foram os mesmos da sessão anterior: avaliação nas sessões (inicial e final) da diferença entre as tarefas duplas e tarefa simples bem como a avaliação da evolução das três tarefas entre as sessões inicial e final.

Preliminarmente, se testou a homogeneidade dos dados, para garantir que não havia uma diferença prévia entre os grupos, uma vez que todos os sujeitos estavam no mesmo estágio da doença, e tinham perfil similar.

A figura 13 mostra as curvas de p-valor do teste de homogeneidade, revelando que não há diferença significativa na execução das tarefas duplas para os grupos.

A exemplo do tópico anterior nenhuma das tarefas apresentou alteração significativa entre primeira e última sessão (Ver Apêndice B).

Para o Grupo A, o grupo que iniciou a prática de Tai Chi, não se observou diferenças significativas entre as tarefas duplas e tarefa simples em nenhuma das duas sessões (Ver

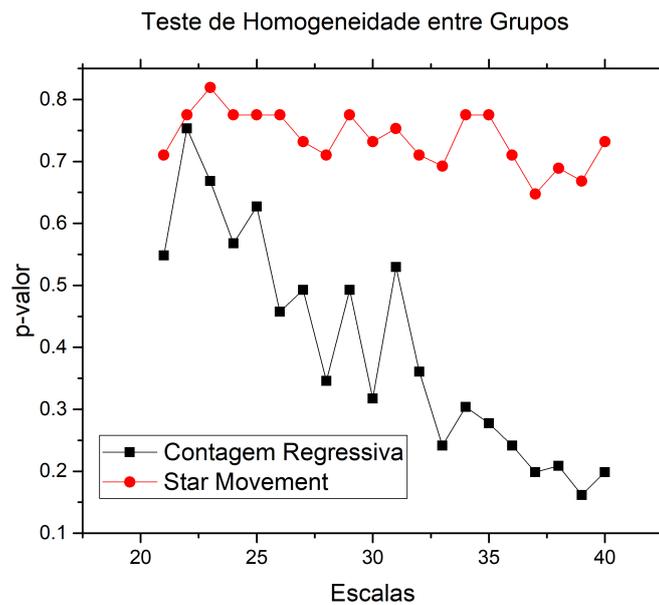


Figura 13: O gráfico apresenta as curvas de p-valor para as comparações entre grupos das tarefas duplas de Contagem Regressiva (CR) e *Star Movement* (SM) na primeira sessão. Vê-se que não há diferença significativa para o nível de significância de $\alpha = 0.0025$.

Apêndice C).

Para o Grupo B, grupo que realizou o tratamento convencional, não se observou diferença significativa entre tarefas duplas e simples na sessão inicial. Entretanto na final foram encontradas diferenças significativas nas comparações das duas tarefas duplas em relação à tarefa simples. A figura 14 mostra as curvas das médias das entropias para as tarefas e a faixa de p-valores encontrados (Mais detalhes no Apêndice D).

As diferenças significativas obtidas para a tarefa dupla de contagem regressiva ocorreram em todas as escalas observadas. No caso da tarefa dupla *Star Movement*, todas as escalas exibiram diferença significativa exceto para a última delas. A figura 15 mostra as curvas de p-valor referentes às comparações citadas.

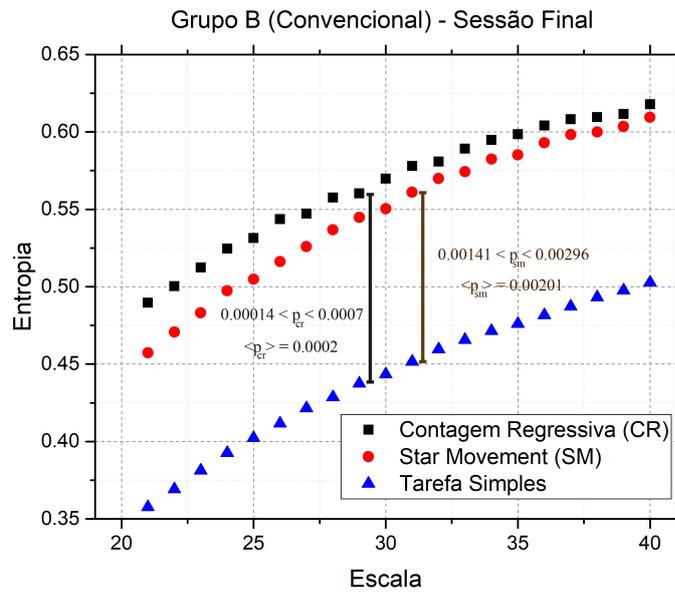


Figura 14: O gráfico exibe as curvas das médias das entropias por escala na sessão final. São exibidos os limites dos p-valores encontrados para cada comparação p_{cr} é referente aos p-valores encontrados para os testes da tarefa dupla de Contagem Regressiva (CR) e p_{sm} , aqueles referentes à tarefa dupla *Star Movement*. Os valores obtidos para o pcr estão muito abaixo do limiar de significância $\alpha = 0.0025$. Já o psm tem p-valores acima e abaixo do nível de significância.

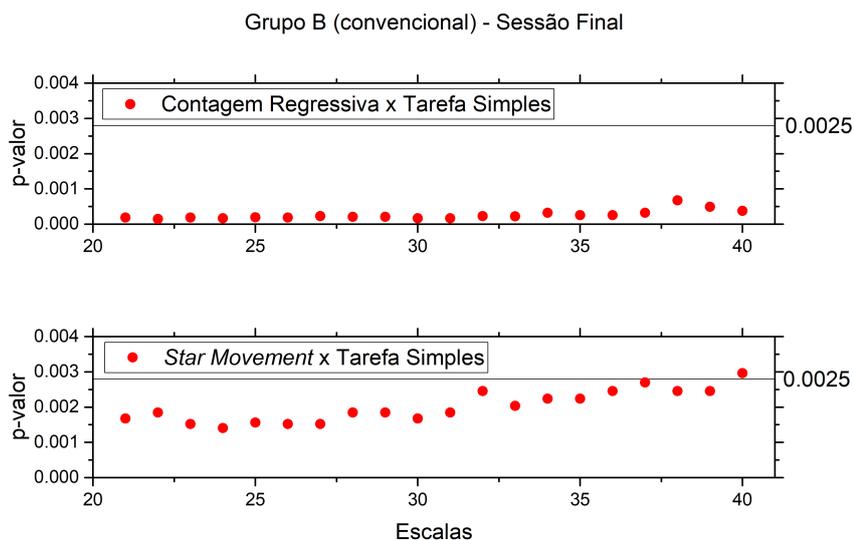


Figura 15: A imagem mostra os p-valores para as duas tarefas em gráficos distintos mas em mesma escala. Observa-se a totalidade dos pontos relativos à tarefa dupla de contagem regressiva abaixo do limiar de significância enquanto que, para a tarefa *Star Movement* apenas o último p-valor se encontra acima do limiar.

5 Discussão

A primeira hipótese que se tentou provar é que a realização de tarefas simultâneas afetam a complexidade do centro de equilíbrio. O resultado geral aqui apresentado é que há diferença significativa na complexidade dos sinais de centro de pressão associados à tarefa dupla de contagem regressiva, o que colabora com os achados de [Kang et al. \(2009\)](#) e se repetem nos estudos de [Zhou et al. \(2017\)](#) e [Zhou et al. \(2015\)](#).

Entretanto o que se detectou foi um aumento na complexidade do sinal do Centro de Pressão (COP) quando da execução da dupla tarefa de contagem (CR) com relação à tarefa simples (TS) ao invés da redução reportadas nos supracitados casos. Apesar do mesmo algoritmo de entropia multiescalar ter sido utilizado tanto nesse trabalho quanto nos artigos de referência, algumas diferenças foram detectadas. Aqui se analisou ambos os eixos do equilíbrio, enquanto a literatura observada se analisava os dois separadamente ou apenas um deles (o sinal relativo ao eixo anteroposterior) sob a justificativa de que este sinal (para esse trabalho eixo X) teria uma relação sinal ruído significativamente menor que o mediolateral, favorecendo as estatísticas nesse eixo. Portanto, o fato de se estar utilizando ambos os eixos na mesma comparação (ainda que pareada) pode estar contribuindo para a divergência.

Além disso ao contrário da filtragem com um algoritmo passa-baixa realizada aqui (e por [Gruber et al. \(2011\)](#), [Fournier et al. \(2014\)](#)), trabalhos anteriores utilizaram métodos como EMD (*Empirical Mode Decomposition*) ([KANG et al., 2009](#); [HUANG et al., 2013](#)) ou EEMD (*Ensemble Empirical Mode Decomposition*) ou *Multiscale Entropy Mode Decomposition* ([ZHOU et al., 2015](#); [WAYNE et al., 2014](#)), que, por serem filtros também não lineares se ajustariam melhor a dados não lineares e não estacionários ([GOW et al., 2015](#)).

Além disso, a dupla tarefa *Star Movement* não apresentou alteração significativa na complexidade dos sinais, trazendo o questionamento de como as diferentes dupla tarefas podem afetar o controle motor.

De forma geral, os resultados obtidos nesse trabalho mostraram que existem diferenças nos parâmetros de equilíbrio dos parksonianos praticantes e não praticantes de tai chi. O grupo de praticantes manteve a diferença de complexidade entre os sinais de tarefas duplas e simples sob controle, enquanto o grupo que apenas se submeteu ao tratamento convencional passou a registrar diferenças significativas na diferença da complexidade entre as tarefas duplas e a simples (Ver Apêndice C e D).

As evidências levantadas por [Wang et al. \(2009b\)](#) para osteoartrite, [Wang et al. \(2010b\)](#) para fibromialgia, [Abbott e Lavretsky \(2013b\)](#) para prevenção de doenças mentais

e [Wayne et al. \(2015\)](#) para melhoria do equilíbrio em marcha, apontam para a eficácia da arte marcial chinesa, que opera sobre todo o corpo trazendo benefícios à saúde do praticante. Se juntam a elas agora as evidências de que a arte seria também capaz de melhorar a qualidade de vida do paciente de parkinson.

6 Conclusões

Como mostraram os resultados, o tai chi chuan pode ser de grande valia na manutenção da saúde e bem estar dos pacientes de parkinson. E apesar do misticismo que a cerca, as evidencias encontradas aqui, corroborando com outras na literatura, justifica sua disseminação no ocidente e sua recorrente aparição como objeto de estudo da ciência.

Do ponto de vista da complexidade, ainda se está muito longe de ter um parâmetro ou medida cem por cento confiável para ela e embora os esforços não tenham sido poucos, esbarra-se sempre na riqueza do tema, que possui muitos detalhes que podem sempre influenciar um sistema dessa natureza. Nesse sentido de colaboração, aqui mostrou-se que a entropia multiescalar pode identificar variações sutis nos sinais de centro de pressão, permitindo inferir a efetividade de novos tratamentos e práticas como, para o presente caso, os treinamentos e exercícios do Tai Chi Chuan..

Dessa forma pode-se dizer que a multidisciplinaridade é chave para compreender e avançar no estudo de sistemas complexos, e que as ferramentas produzidas pela disciplina são capazes de dar respostas concretas a problemas reais e apontar ferramentas palpáveis e racionais de avaliação e análise de sistemas fisiológicos.

Particularmente sobre a doença de parkinson, é importante destacar que se faria necessária uma continuidade da avaliação dos pacientes para melhor compreender o avanço da doença. Apesar de não serem significativos, alguns resultados parecem apontar para a perda da complexidade da tarefa simples para o grupo de não praticantes. Em verdade, todas as medidas referentes ao grupo B, independente da tarefa, parecem distanciar daquilo que foram as medidas da primeira sessão, o que não ocorreu (ao menos não tão perceptivelmente como no grupo B) no grupo de praticantes.

Existem pequenos ajustes que podem ser feitos nesse trabalho com o objetivo de aprimorá-lo. o primeiro deles seria tentar aprimorar a filtragem. alguns artigos mais recentes usam uma técnica chamada *multiscale entropy mode decomposition* que permite tirar algumas tendências do sinal que podem não ser de natureza fisiológica. Outra possibilidade, essa mais simples, é separar os eixos e analisá-los separadamente. Existem registros de que a relação sinal ruído do eixo médio lateral é bastante ruim, o que comprometeria a qualidade do sinal filtrado. Por fim, vale investigar os motivos pelos quais a entropia aumentou no caso dessas dupla tarefas e desses pacientes, se seriam devido ao parkinson ou outro motivo ainda desconhecido.

Referências

- ABBOTT, Ryan; LAVRETSKY, Helen. Tai chi and qigong for the treatment and prevention of mental disorders. *Psychiatric Clinics of North America*, v. 36, n. 1, p. 109 – 119, 2013. ISSN 0193-953X. Complementary and Integrative Therapies for Psychiatric Disorders. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0193953X13000129>>. Citado na página 19.
- ABBOTT, Ryan; LAVRETSKY, Helen. Tai chi and qigong for the treatment and prevention of mental disorders. *The Psychiatric clinics of North America*, NIH Public Access, v. 36, n. 1, p. 109, 2013. Citado na página 39.
- ASHBURN, A et al. The circumstances of falls among people with parkinson's disease and the use of falls diaries to facilitate reporting. *Disability and rehabilitation*, Taylor & Francis, v. 30, n. 16, p. 1205–1212, 2008. Citado na página 21.
- BALASH, Yacov et al. Falls in outpatients with parkinson's disease. *Journal of neurology*, Springer, v. 252, n. 11, p. 1310–1315, 2005. Citado na página 21.
- BARBOSA, Maira Tonidandel et al. Parkinsonism and parkinson's disease in the elderly: A community-based survey in brazil (the bambuí study). *Movement Disorders*, Wiley Online Library, v. 21, n. 6, p. 800–808, 2006. Citado na página 21.
- BERARDELLI, Alfredo et al. Pathophysiology of bradykinesia in parkinson's disease. *Brain*, Oxford University Press, v. 124, n. 11, p. 2131–2146, 2001. Citado na página 21.
- BLOEM, Bastiaan R et al. Prospective assessment of falls in parkinson's disease. *Journal of neurology*, Springer, v. 248, n. 11, p. 950–958, 2001. Citado na página 21.
- BONFERRONI, Carlo E. *Teoria statistica delle classi e calcolo delle probabilita*. [S.l.]: Libreria internazionale Seeber, 1936. Citado na página 35.
- BROOKS, Lee Richard. The suppression of visualization by reading. *The Quarterly journal of experimental psychology*, Taylor & Francis, v. 19, n. 4, p. 289–299, 1967. Citado na página 22.
- BROUSSOLLE, Emmanuel et al. Contribution of jules froment to the study of parkinsonian rigidity. *Movement disorders*, Wiley Online Library, v. 22, n. 7, p. 909–914, 2007. Citado na página 21.
- BRUMAGNE, Simon; CORDO, Paul; VERSCHUEREN, Sabine. Proprioceptive weighting changes in persons with low back pain and elderly persons during upright standing. *Neuroscience letters*, Elsevier, v. 366, n. 1, p. 63–66, 2004. Citado na página 19.
- BRUMAGNE, Simon et al. Persons with recurrent low back pain exhibit a rigid postural control strategy. *European Spine Journal*, Springer, v. 17, n. 9, p. 1177–1184, 2008. Citado na página 19.
- CHAN, K. W. *Tai Chi Chuan - Estilo Yang Tradicional*. 1. ed. São Paulo: Barany Editora, 2014. 236 p., 22 cm. ISBN 978-85-61080-42-6. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

- CHRISTINI, David J et al. Application of linear and nonlinear time series modeling to heart rate dynamics analysis. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, IEEE, v. 42, n. 4, p. 411–415, 1995. Citado na página 20.
- COLLINS, James J; LUCA, Carlo J De. Open-loop and closed-loop control of posture: a random-walk analysis of center-of-pressure trajectories. *Experimental brain research*, Springer, v. 95, n. 2, p. 308–318, 1993. Citado na página 31.
- COSTA, Madalena; GOLDBERGER, Ary L.; PENG, C.-K. Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series. *Phys. Rev. Lett.*, American Physical Society, v. 89, p. 068102, Jul 2002. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.89.068102>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 26.
- COSTA, Madalena; GOLDBERGER, Ary L.; PENG, C.-K. Multiscale entropy analysis of biological signals. *Phys. Rev. E*, American Physical Society, v. 71, p. 021906, Feb 2005. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.71.021906>>. Citado 5 vezes nas páginas 20, 24, 25, 26 e 30.
- DUARTE, Marcos; STERNAD, Dagmar. Complexity of human postural control in young and older adults during prolonged standing. *Experimental Brain Research*, Springer, v. 191, n. 3, p. 265–276, 2008. Citado na página 20.
- FOURNIER, Kimberly A et al. Decreased dynamical complexity during quiet stance in children with autism spectrum disorders. *Gait & posture*, Elsevier, v. 39, n. 1, p. 420–423, 2014. Citado na página 39.
- FRANCHIGNONI, Franco et al. Balance and fear of falling in parkinson's disease. *Parkinsonism & related disorders*, Elsevier, v. 11, n. 7, p. 427–433, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 21.
- GELB, Douglas J; OLIVER, Eugene; GILMAN, Sid. Diagnostic criteria for parkinson disease. *Archives of neurology*, American Medical Association, v. 56, n. 1, p. 33–39, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 21.
- GENEVER, Richard W; DOWNES, Thomas W; MEDCALF, Pippa. Fracture rates in parkinson's disease compared with age-and gender-matched controls: a retrospective cohort study. *Age and ageing*, Oxford University Press, v. 34, n. 1, p. 21–24, 2005. Citado na página 21.
- GEORGE, Rebecca J. St et al. Choice stepping response and transfer times: Effects of age, fall risk, and secondary tasks. *The Journals of Gerontology: Series A*, v. 62, n. 5, p. 537–542, 2007. Disponível em: <[+http://dx.doi.org/10.1093/gerona/62.5.537](http://dx.doi.org/10.1093/gerona/62.5.537)>. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 30.
- GLENCROSS, Denis J. 34 levels and strategies of response organization. *Advances in Psychology*, Elsevier, v. 1, p. 551–566, 1980. Citado na página 23.
- GOLDBERGER, Ary L et al. Physiobank, physiokit, and physionet. *Circulation*, Am Heart Assoc, v. 101, n. 23, p. e215–e220, 2000. Citado na página 24.
- GOLDBERGER, Ary L et al. Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Acad Sciences, v. 99, n. suppl 1, p. 2466–2472, 2002. Citado na página 24.

GOW, Brian J et al. Multiscale entropy analysis of center-of-pressure dynamics in human postural control: methodological considerations. *Entropy*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 17, n. 12, p. 7926–7947, 2015. Citado na página 39.

GRIMSTONE, Sarah K; HODGES, Paul W. Impaired postural compensation for respiration in people with recurrent low back pain. *Experimental brain research*, Springer, v. 151, n. 2, p. 218–224, 2003. Citado na página 19.

GRUBER, Allison H et al. Time-to-contact and multiscale entropy identify differences in postural control in adolescent idiopathic scoliosis. *Gait & posture*, Elsevier, v. 34, n. 1, p. 13–18, 2011. Citado na página 39.

HAMAOU, A et al. Does respiration perturb body balance more in chronic low back pain subjects than in healthy subjects? *Clinical Biomechanics*, Elsevier, v. 17, n. 7, p. 548–550, 2002. Citado na página 19.

HAMAOU, A; DO, Manh-Cuong; BOUISSET, S. Postural sway increase in low back pain subjects is not related to reduced spine range of motion. *Neuroscience letters*, Elsevier, v. 357, n. 2, p. 135–138, 2004. Citado na página 19.

HARRINGE, ML et al. Postural control measured as the center of pressure excursion in young female gymnasts with low back pain or lower extremity injury. *Gait & posture*, Elsevier, v. 28, n. 1, p. 38–45, 2008. Citado na página 19.

HELY, Mariese A et al. The sydney multicenter study of parkinson's disease: the inevitability of dementia at 20 years. *Movement disorders*, Wiley Online Library, v. 23, n. 6, p. 837–844, 2008. Citado na página 21.

HERMAN, Talia et al. Executive control deficits as a prodrome to falls in healthy older adults: a prospective study linking thinking, walking, and falling. *Journals of Gerontology Series A: Biomedical Sciences and Medical Sciences*, Oxford University Press, v. 65, n. 10, p. 1086–1092, 2010. Citado na página 22.

HUANG, Cheng-Wei et al. Measuring center of pressure signals to quantify human balance using multivariate multiscale entropy by designing a force platform. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 8, p. 10151–10166, 2013. Citado na página 39.

JANKOVIC, Joseph. Parkinson's disease: clinical features and diagnosis. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, BMJ Publishing Group Ltd, v. 79, n. 4, p. 368–376, 2008. Citado na página 21.

JANKOVIC, Joseph. Treatment of hyperkinetic movement disorders. *The Lancet Neurology*, Elsevier, v. 8, n. 9, p. 844–856, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 21.

KANG, Hyun Gu et al. Frailty and the degradation of complex balance dynamics during a dual-task protocol. *Journals of Gerontology Series A: Biomedical Sciences and Medical Sciences*, Oxford University Press, v. 64, n. 12, p. 1304–1311, 2009. Citado na página 39.

KUUKKANEN, Tiina M; MÄLKIÄ, Esko A. An experimental controlled study on postural sway and therapeutic exercise in subjects with low back pain. *Clinical rehabilitation*, SAGE Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 14, n. 2, p. 192–202, 2000. Citado na página 19.

- KYRIACOU, Stelios K et al. Nonlinear elastic registration of brain images with tumor pathology using a biomechanical model [mri]. *IEEE transactions on medical imaging*, IEEE, v. 18, n. 7, p. 580–592, 1999. Citado na página 23.
- LADYMAN, James; LAMBERT, James; WIESNER, Karoline. What is a complex system? *European Journal for Philosophy of Science*, Springer, v. 3, n. 1, p. 33–67, 2013. Citado na página 23.
- LAFOND, Danik et al. Postural control during prolonged standing in persons with chronic low back pain. *Gait & posture*, Elsevier, v. 29, n. 3, p. 421–427, 2009. Citado na página 19.
- LUOTO, Satu et al. Psychomotor speed and postural control in chronic low back pain patients: A controlled follow-up study. *Spine*, LWW, v. 21, n. 22, p. 2621–2627, 1996. Citado na página 19.
- MIENTJES, MIV; FRANK, JS. Balance in chronic low back pain patients compared to healthy people under various conditions in upright standing. *Clinical Biomechanics*, Elsevier, v. 14, n. 10, p. 710–716, 1999. Citado na página 19.
- MIRELMAN, Anat et al. Executive function and falls in older adults: new findings from a five-year prospective study link fall risk to cognition. *PloS one*, Public Library of Science, v. 7, n. 6, p. e40297, 2012. Citado na página 22.
- MOK, Nicola W; BRAUER, Sandra G; HODGES, Paul W. Hip strategy for balance control in quiet standing is reduced in people with low back pain. *Spine*, LWW, v. 29, n. 6, p. E107–E112, 2004. Citado na página 19.
- OLANOW, C Warren; STERN, Matthew B; SETHI, Kapil. The scientific and clinical basis for the treatment of parkinson disease (2009). *Neurology*, AAN Enterprises, v. 72, n. 21 Supplement 4, p. S1–S136, 2009. Citado na página 21.
- PICKERING, Ruth M et al. A meta-analysis of six prospective studies of falling in parkinson’s disease. *Movement Disorders*, Wiley Online Library, v. 22, n. 13, p. 1892–1900, 2007. Citado na página 21.
- POPA, Traian et al. Adaptive changes in postural strategy selection in chronic low back pain. *Experimental brain research*, Springer, v. 177, n. 3, p. 411–418, 2007. Citado na página 19.
- RAJPUT, AH; ROZDILSKY, B; ANG, L. Occurrence of resting tremor in parkinson’s disease. *Neurology*, AAN Enterprises, v. 41, n. 8, p. 1298–1298, 1991. Citado na página 21.
- RICHMAN, Joshua S; MOORMAN, J Randall. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, Am Physiological Soc, v. 278, n. 6, p. H2039–H2049, 2000. Citado na página 24.
- SALAVATI, Mahyar et al. Effect of dual-tasking on postural control in subjects with nonspecific low back pain. *Spine*, LWW, v. 34, n. 13, p. 1415–1421, 2009. Citado na página 19.

- SHANNON, Claude E; WEAVER, Warren; BURKS, Arthur W. The mathematical theory of communication. 1951. Citado na página 24.
- SMITH, Michelle; COPPIETERS, Michel W; HODGES, Paul W. Effect of experimentally induced low back pain on postural sway with breathing. *Experimental brain research*, Springer, v. 166, n. 1, p. 109–117, 2005. Citado na página 19.
- SPRINGER, Shmuel et al. Dual-tasking effects on gait variability: The role of aging, falls, and executive function. *Movement Disorders*, Wiley Online Library, v. 21, n. 7, p. 950–957, 2006. Citado na página 22.
- TANI, Go. Aprendizagem motora: tendências, perspectivas e problemas de investigação. Universidade da Coruña, 1998. Citado na página 23.
- THOMAS, Garth. The co-ordination and regulation of movements. *Psychocritiques*, v. 12, n. 9, p. 468, 1967. Citado na página 23.
- VOLPE, R Della et al. Changes in coordination of postural control during dynamic stance in chronic low back pain patients. *Gait & posture*, Elsevier, v. 24, n. 3, p. 349–355, 2006. Citado na página 19.
- WANG, Chenchen et al. Tai chi is effective in treating knee osteoarthritis: A randomized controlled trial. *Arthritis Care & Research*, Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company, v. 61, n. 11, p. 1545–1553, 2009. ISSN 1529-0131. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/art.24832>>. Citado na página 19.
- WANG, Chenchen et al. Tai chi is effective in treating knee osteoarthritis: a randomized controlled trial. *Arthritis Care & Research*, Wiley Online Library, v. 61, n. 11, p. 1545–1553, 2009. Citado na página 39.
- WANG, Chenchen et al. A randomized trial of tai chi for fibromyalgia. *New England Journal of Medicine*, v. 363, n. 8, p. 743–754, 2010. PMID: 20818876. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1056/NEJMoa0912611>>. Citado na página 19.
- WANG, Chenchen et al. A randomized trial of tai chi for fibromyalgia. *New England Journal of Medicine*, Mass Medical Soc, v. 363, n. 8, p. 743–754, 2010. Citado na página 39.
- WAYNE, Peter M et al. Complexity-based measures inform effects of tai chi training on standing postural control: cross-sectional and randomized trial studies. *PloS one*, Public Library of Science, v. 9, n. 12, p. e114731, 2014. Citado na página 39.
- WAYNE, Peter M et al. Tai chi training may reduce dual task gait variability, a potential mediator of fall risk, in healthy older adults: cross-sectional and randomized trial studies. *Frontiers in human neuroscience*, Frontiers Media SA, v. 9, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 40.
- WILCOXON, Frank. Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics bulletin*, JSTOR, v. 1, n. 6, p. 80–83, 1945. Citado na página 35.
- WINTER, David A. Human balance and posture control during standing and walking. *Gait & posture*, Elsevier, v. 3, n. 4, p. 193–214, 1995. Citado na página 19.

WOOD, BH et al. Incidence and prediction of falls in parkinson's disease: a prospective multidisciplinary study. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, BMJ Publishing Group Ltd, v. 72, n. 6, p. 721–725, 2002. Citado na página 21.

YOGEV-SELIGMANN, Galit; HAUSDORFF, Jeffrey M; GILADI, Nir. Do we always prioritize balance when walking? towards an integrated model of task prioritization. *Movement Disorders*, Wiley Online Library, v. 27, n. 6, p. 765–770, 2012. Citado na página 22.

ZHANG, Yi-Cheng. Complexity and $1/f$ noise. a phase space approach. *Journal de Physique I*, EDP Sciences, v. 1, n. 7, p. 971–977, 1991. Citado na página 24.

ZHOU, Diange et al. Effects of transcranial direct current stimulation (tdcs) on multiscale complexity of dual-task postural control in older adults. *Experimental brain research*, Springer, v. 233, n. 8, p. 2401–2409, 2015. Citado na página 39.

ZHOU, Junhong et al. The complexity of standing postural sway associates with future falls in community-dwelling older adults: The mobilize boston study. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group, v. 7, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 39.

Apêndices

APÊNDICE A – Testes e resultados para a comparação Entre Sessões

O objetivo desses testes era observar se haveria alguma diferença significativa entre as tarefas no pré e no pós tratamento, bem como saber se as tarefas seriam executadas de forma significativamente diferente antes e depois do tratamento, desconsiderando a separação dos grupos diferentes.

Os resultados mostram que assim agrupados, não há diferença significativa na complexidade da execução das tarefas simples e duplas antes ou depois do tratamento (Figuras 16 e 17).

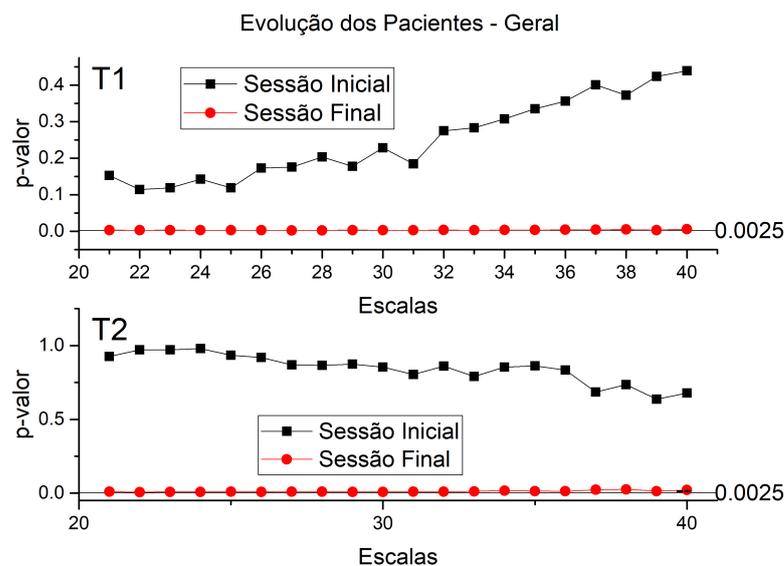


Figura 16: Em T1, são exibidas as curvas de p-valor resultado da comparação da tarefa dupla de Contagem (CR) com a tarefa simples. Em preto a o resultado do teste feito na sessão inicial, em vermelho na sessão final. Em T2, são exibidas as curvas de p-valor resultado da comparação da tarefa dupla *Star Movement*(SM) com a tarefa simples. Em preto, o resultado do teste feito na sessão inicial, em vermelho na sessão final.

A figura 18 mostra as curvas de entropia média comparadas entre as sessões. O objetivo era observar se poder-se-ia detectar alguma alteração na complexidade do equilíbrio entre as sessões independente da separação dos grupos

A figura 19 exhibe o resultado dos testes longitudinais. Não se observou diferença significativa para nenhuma das tarefas em nenhuma das escalas.

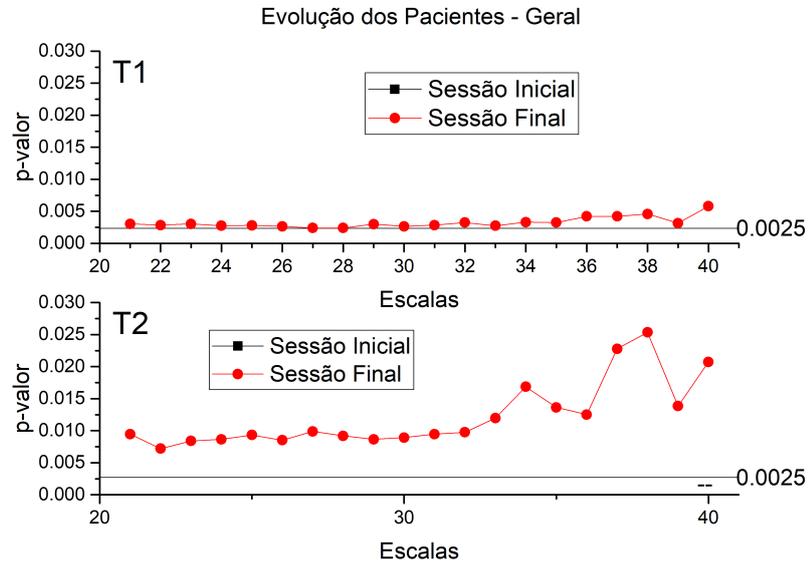


Figura 17: Numas escala menor, se pode observar que não há diferença significativa entre as tarefas duplas e simples no pós tratamento.

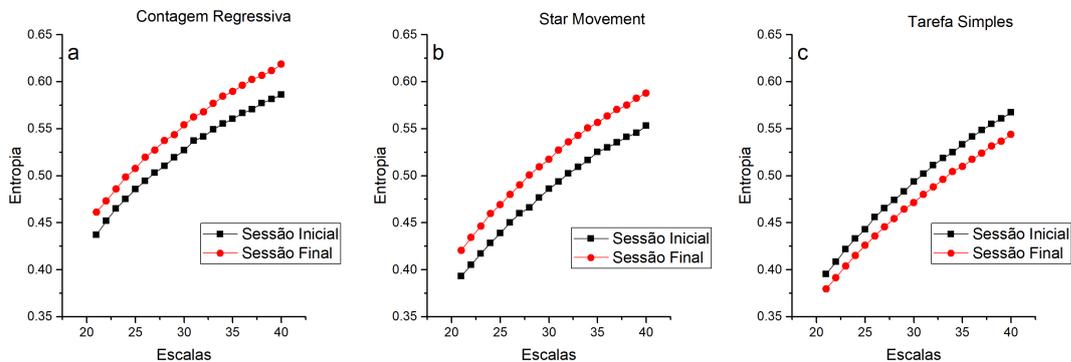


Figura 18: Comparação das curvas de entropia média avaliada de cada tarefa avaliada entre as sessões.

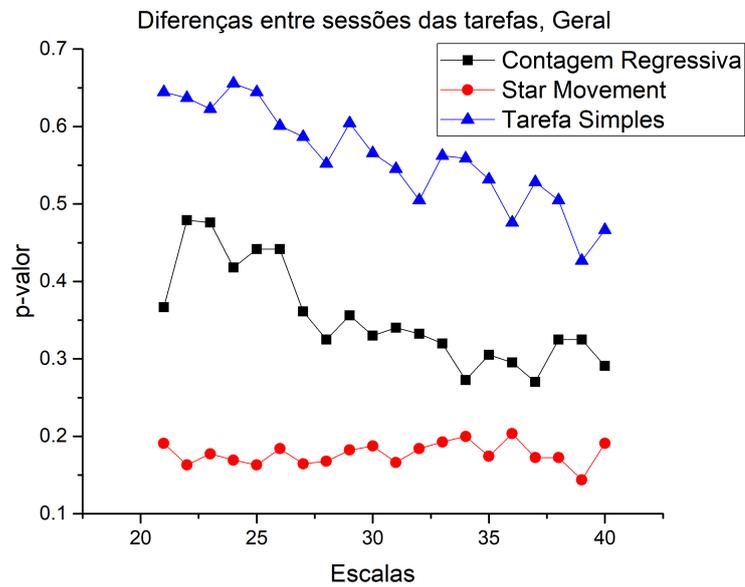


Figura 19: Curvas de p-valores para os testes entre sessões das tarefas. Nenhuma dos pontos alcançou o nível de significância exigido $\alpha = 0.0025$.

APÊNDICE B – Avaliação longitudinal das tarefas por tipo de tratamento

O objetivo desse teste era identificar dentro de cada grupo como se comportava a complexidade de uma determinada tarefa ao longo do tempo. Esperava-se que devido a propriedade degenerativa da doença de Parkinson houvesse uma perda de complexidade na execução das tarefas.

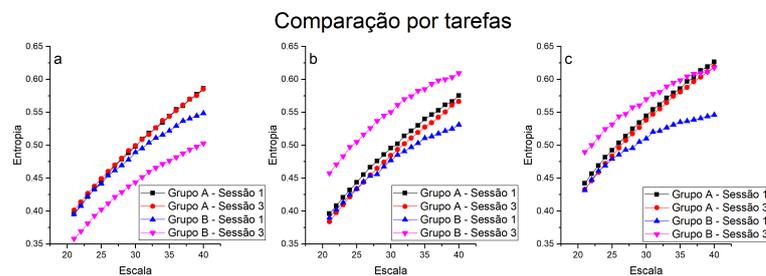


Figura 20: O Gráfico mostra as curvas de entropia em cada tarefa para os dois grupos.

A figura 20 mostra as curvas de entropia que foram comparadas, exibindo todas as curvas referentes a uma determinada tarefa num mesmo gráfico. A figura 21 mostra as curvas de p-valor resultado dos testes. há de se notar que embora não haja diferença significativa em nenhum dos testes, há uma notável diferença entre os dados referentes ao grupo Tai Chi (A) e do grupo convencional (B). Enquanto aquele se mantém quase totalmente na faixa entre 0.8 e 1 este está sistematicamente abaixo e talvez a diferenciação apareça eventualmente, numa investigação mais longa.

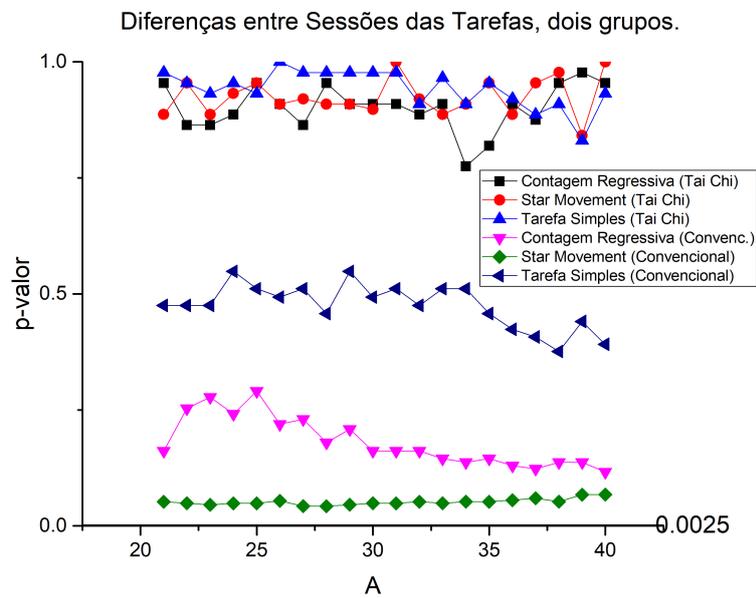


Figura 21: Nenhuma das curvas permite inferir diferença significativa entre os dados.

APÊNDICE C – Testes e Resultados da comparação das tarefas nas diferentes sessões do grupo Tai Chi Chuan (Grupo A)

Comparou-se aqui as tarefas duplas com a tarefa simples para o grupo Tai Chi chuan.

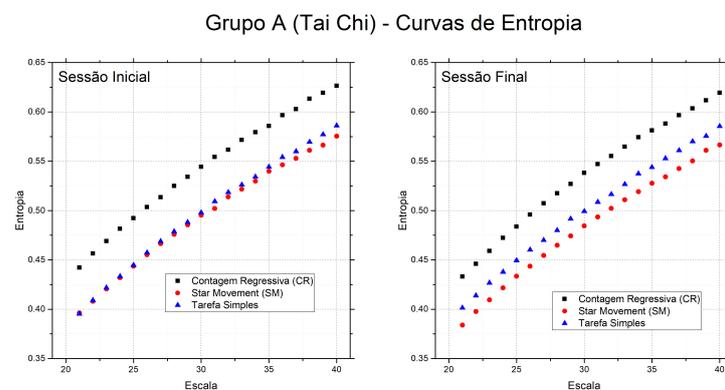


Figura 22: Exibe as curvas de entropia média nas duas sessões, inicial e final, para cada uma das três tarefas.

A figura 22 mostra as curvas de entropia média das tarefas comparadas dentro das sessões para o grupo Tai Chi(Gurpo A). A figura 23 mostra o resultado dos testes, explicitando que não houve diferença significativa.

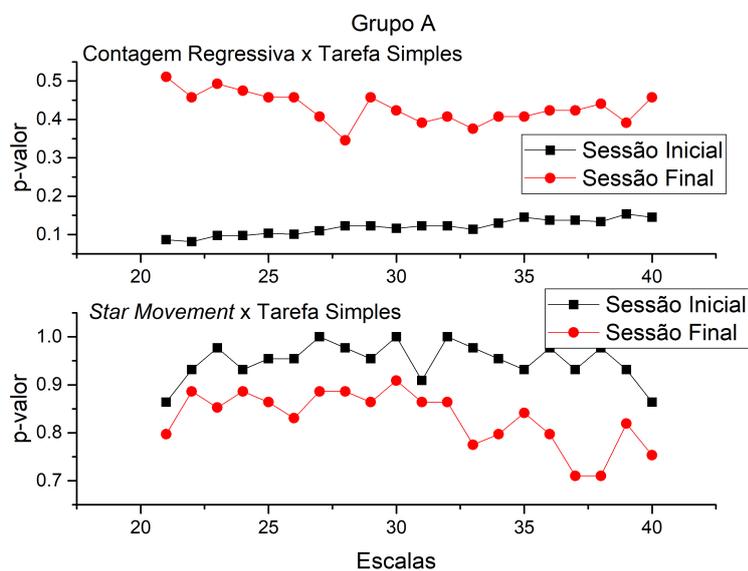


Figura 23: Os gráficos mostram as comparações das tarefas duplas com a tarefa simples nas sessões inicial e final. Nenhum dos testes ficou abaixo do limiar de significância

APÊNDICE D – Testes e Resultados da comparação das tarefas nas diferentes sessões do grupo Convencional (Grupo B)

Detalhamento dos resultados do teste do Grupo B (convencional). A figura 24 exibe as curvas de entropia para as tarefas nas respectivas sessões. Os resultados são exibidos nas figuras 25 e 26

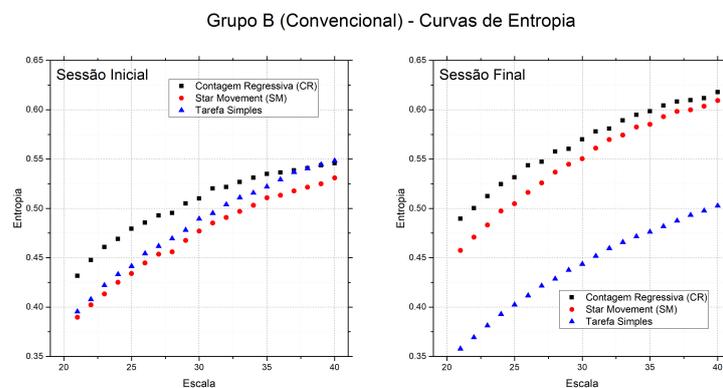


Figura 24: Gráficos mostram para as sessões inicial e final as curvas de entropia referente às diferentes tarefas.

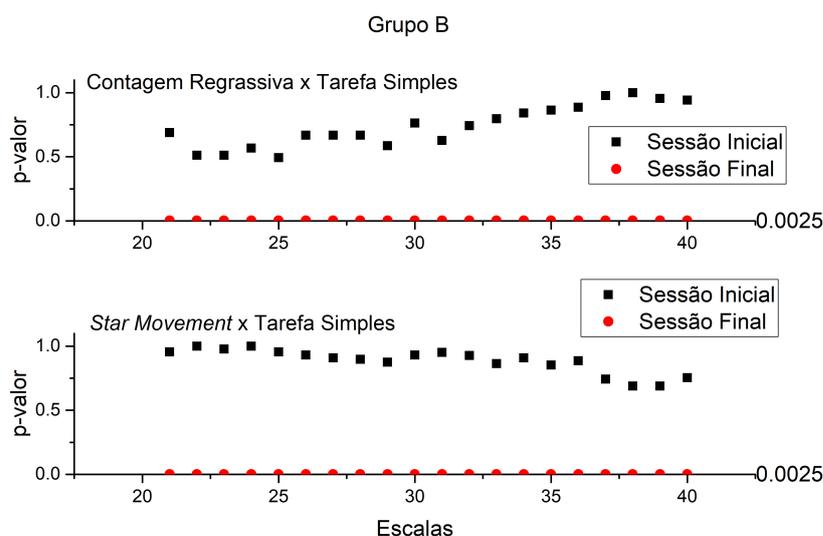


Figura 25: Comparação entre tarefas duplas e simples para o Grupo B (Tratamento convencional). Os testes das sessões iniciais não exibem diferença significativa.

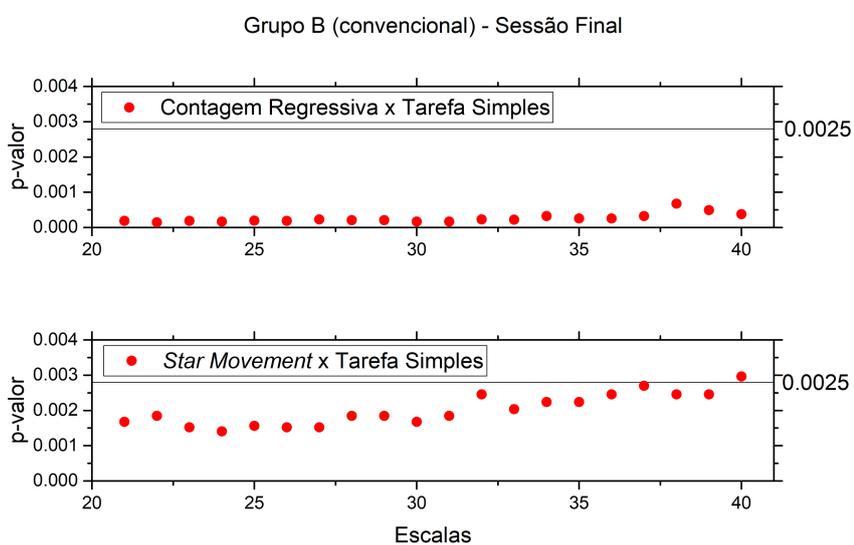


Figura 26: Gráficos exibem numa escala mais adequada o resultado dos testes entre tarefas simples e dupla para a sessão final apenas. As duas comparações exibem diferenças significativas.