

Soluções alternativas para redução dos tremores patológicos da doença de Parkinson: Uma revisão do estado da arte

Alternatives solutions to reduce Parkinson's disease pathological tremors: A state-of-art review

Soluciones alternativas para la reducción de los temblores patológicos en la enfermedad de Parkinson: Una revisión del estado de la técnica

Recebido: 20/05/2021 | Revisado: 29/05/2021 | Aceito: 01/06/2021 | Publicado: 16/06/2021

Gabriel Silva Vieira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2429-4766>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: gabrielsv063@gmail.com

Antonio Almeida Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7130-8542>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: antonio.almeida@ufcg.edu.br

Renato Alexandre Costa de Santana

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7075-7709>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: renatoacs@ufcg.edu.br

Resumo

A doença de Parkinson é a segunda doença neurodegenerativa mais comum do mundo, sendo o tremor um dos seus principais sintomas. Os tratamentos existentes para o tremor possuem diversas restrições e efeitos colaterais que acabam limitando seu uso. Dessa forma surge a ideia de tratamentos alternativos, usando a engenharia, que sejam menos invasivos e sem efeitos colaterais. O escopo deste trabalho será apresentar e discutir as principais soluções envolvendo a engenharia para a redução de tremores patológicos que foram encontradas nos últimos anos. Para fins de seguir uma metodologia de pesquisa, foram utilizadas palavras-chaves para realizar buscas em alguns dos principais bancos de dados científicos, e com alguns filtros aplicados foi possível identificar 26 artigos que tratam sobre o tema que desejamos estudar. Como resultados foi possível perceber um aumento considerável do estudo sobre o tema nos últimos anos e observar a existência de 4 categorias de tratamentos alternativos: estimulação elétrica funcional (FES), atuadores mecânicos, sistemas amortecidos e materiais inteligentes. Após a pesquisa, concluiu-se que as soluções usando FES e atuadores mecânicos foram as mais estudadas e as que se encontram em fases mais avançadas de teste, já havendo produtos no mercado que utilizam a FES como tratamento para tremores patológicos.

Palavras-chave: Doença de Parkinson; Tremor; Tratamento.

Abstract

Parkinson's disease is the second most common neurodegenerative disease in the world, with tremor being one of its main symptoms. The existing treatments for tremors have several restrictions and side effects that end up limiting their use. Thus, the idea of alternative treatments, using engineering, arises, which are less invasive and without side effects. The scope of this work will be to present and discuss the main solutions involving engineering for the reduction of pathological tremors that have been found in recent years. For the purpose of following a research methodology, keywords were used to perform searches in some of the main scientific databases, and with some filters applied it was possible to identify 26 articles dealing with the topic we wish to study. As a result, it was possible to notice a considerable increase in the study of the subject in recent years and to observe the existence of 4 categories of alternative treatments: functional electrical stimulation (FES), mechanical actuators, damped systems, and intelligent materials. After the research, it was concluded that the solutions using FES and mechanical actuators were the most studied and those that are in more advanced stages of testing, having products on the market that use FES as a treatment for pathological tremors.

Keywords: Parkinson's Disease; Tremor; Treatment.

Resumen

La enfermedad de Parkinson es la segunda enfermedad neurodegenerativa más común en el mundo, siendo el temblor uno de sus principales síntomas. Los tratamientos existentes para los temblores tienen varias restricciones y efectos secundarios que terminan limitando su uso. Surge así la idea de tratamientos alternativos, mediante la ingeniería, menos invasivos y sin efectos secundarios. El alcance de este trabajo será presentar y discutir las principales soluciones de ingeniería para la reducción de temblores patológicos que se han encontrado en los últimos años. Con el propósito de

seguir una metodología de investigación, se utilizaron palabras clave para realizar búsquedas en algunas de las principales bases de datos científicas, y con algunos filtros aplicados fue posible identificar 26 artículos que tratan el tema que deseamos estudiar. Como resultado, se pudo notar un aumento considerable en el estudio sobre el tema en los últimos años y observar la existencia de 4 categorías de tratamientos alternativos: estimulación eléctrica funcional (FES), actuadores mecánicos, sistemas amortiguados y materiales inteligentes. Tras la investigación, se concluyó que las soluciones que utilizan FES y actuadores mecánicos fueron las más estudiadas y las que se encuentran en etapas más avanzadas de pruebas, teniendo en el mercado productos que utilizan FES como tratamiento de temblores patológicos.

Palabras clave: Enfermedad de Parkinson; Temblor; Tratamiento.

1. Introdução

A doença de Parkinson é a segunda doença neurodegenerativa mais comum do mundo, afetando de 2 a 3% da população com mais de 65 anos. É causada por uma redução da substância negra do cérebro o que provoca uma diminuição intensa da produção de dopamina. Essa redução causa comprometimento em algumas funções motoras, como: rigidez muscular, postura inclinada, marcha lenta e tremor (Poewe et al., 2017).

Como se trata de uma doença crônica e incurável, o tratamento do Parkinson é direcionado para a amenização dos seus sintomas, especialmente o tremor. Segundo (Campbell, 2014) “O tremor é uma série de movimentos oscilatórios, involuntários, relativamente rítmicos e sem finalidade aparente.”. Os tremores podem ser fisiológicos ou patológicos. Os tremores fisiológicos acontecem naturalmente em todas as pessoas e podem ser intensificados por ansiedade, medo, fadiga e etc. Tremores patológicos são associados a doenças, dentre as principais estão o mal de Parkinson e o tremor essencial (Elble, 2009).

O tratamento mais difundido atualmente é o medicamentoso, no qual os principais fármacos utilizados são a levodopa e os agonistas dopaminérgicos. Entretanto o uso contínuo da levodopa causa tolerância e sensibilização, além disso agrava outros sintomas da doença como a rigidez muscular. Desse modo, em pacientes mais jovens e com tremores mais leves aconselha-se o uso dos agonistas dopaminérgicos, estes por sua vez, podem causar efeitos cognitivos como: sedação excessiva, sonhos vívidos, alucinações e comportamentos impulsivos (Golan et al., 2009).

Outro tratamento é uma técnica cirúrgica chamada deep brain stimulation (DBS), na qual é inserido um eletrodo no cérebro do paciente que fará uma estimulação elétrica responsável por reduzir os tremores. No entanto, por ser um procedimento invasivo, e conseqüentemente apresentar riscos ao paciente, é recomendado apenas para pacientes com estágios avançados da doença e que não apresentem respostas a outros tratamentos (Armstrong & Okun, 2020).

Como forma alternativa de tratamento, surgem as tecnologias ligadas à engenharia que buscam encontrar soluções eficazes que sejam minimamente invasivas e não tragam efeitos colaterais ao seu usuário. Deste modo, o escopo deste trabalho será apresentar e discutir as principais soluções envolvendo a engenharia para a redução de tremores patológicos que foram encontradas nos últimos anos e, por fim, compará-las destacando suas vantagens e desvantagens.

2. Metodologia

Esta pesquisa se trata de uma revisão bibliográfica integrativa, onde serão avaliadas variáveis de natureza quantitativa, redução do tremor e peso, e variáveis de natureza qualitativa, conforto, aplicabilidade e portabilidade. Foi seguida a metodologia sugerida por (Botelho et al., 2011), primeiramente foi definido a delimitação do estudo, em seguida, escolhidos os critérios de inclusão e exclusão, identificados os artigos pertinentes, categorizados os artigos escolhidos, analisados e interpretados os resultados e, por fim, apresentados de forma sintetizada os conhecimentos obtidos com a pesquisa.

Tabela 1 - Trabalhos selecionados.

Título do artigo	Autores	no	Revista
Evaluation of a controlled-energy-dissipation orthosis for tremor suppression	et al.		Journal of Electromyography and Kinesiology
Wearable Tremor-suppression Orthosis	ky e Rosen		Journal of Rehabilitation Research and Development
Tremor suppression using functional electrical stimulation: a comparison between digital and analog controllers	et al.		IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering
Tremor Suppression Through Impedance Control	et al.		IEEE Transactions On Rehabilitation Engineering
Design and Validation of a Rehabilitation Robotic Exoskeleton for Tremor Assessment and Suppression	et al.		IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering
Electrical stimulation for the suppression of pathological tremor	é Maneski et al.		Medical & Biological Engineering & Computing
Neural oscillator based control for pathological tremor suppression via functional electrical stimulation	et al.		Control Engineering Practice
Tremor Suppression by Rhythmic Transcranial Current Stimulation	et al.		Current Biology
Design and Characterization of a Small-Scale Magnetorheological Damper for Tremor Suppression	al.		IEEE/ASME Transactions on Mechatronics
Robust Controller for Tremor Suppression at Musculoskeletal Level in Human Wrist	et al.		IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering
Online Tremor Suppression Using Electromyography and Low-Level Electrical Stimulation	et al.		IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering
Repetitive control of functional electrical stimulation for induced tremor suppression	n et al.		Mechatronics
Adaptive Suppression of Severe Pathological Tremor by Torque Estimation Method	et al.		IEEE/ASME Transactions on Mechatronics
System identification for FES-based tremor suppression	et al.		European Journal of Control
Voluntary-Driven Elbow Orthosis with Speed-Controlled Tremor Suppression	adt e Menon		Frontiers in Bioengineering and Biotechnology
Electrical Stimulation of Afferent Pathways for the Suppression of Pathological Tremor	sen et al.		Frontiers in Neuroscience
Design and validation of a novel mechatronic transmission system for a wearable tremor suppression device	t al.		Robotics and Autonomous Systems
Modeling and experimental study of a hand tremor suppression system	e Afsharfard		Mechanism and Machine Theory
Vib-bracelet: a passive absorber for attenuating forearm tremor	al.		Medical & Biological Engineering & Computing
Simulação de Um Dispositivo Giroscópio Absorvedor do Tremor da Doença de Parkinson	de Sá et al.		II Simpósio de pós-graduação em engenharia mecânica da universidade federal de campina grande: Coletânea de artigos
Adaptive notch filter for pathological tremor suppression using permanent magnet linear motor	an e Richer		Mechatronics
An Acute Randomized Controlled Trial of Noninvasive Peripheral Nerve Stimulation in Essential Tremor	et al.		Neuromodulation: Technology at the Neural Interface
Wrist tremor suppression based on repetitive control with multi-muscle electrical stimulation	et al.		IFAC-PapersOnLine
Design of a lightweight passive orthosis for tremor suppression	e et al.		Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation
Tremor-Active Controller for Dielectric Elastomer-Based Pathological Tremor Suppression	e Kauffman		IEEE/ASME Transactions on Mechatronics
Nonlinear passive tremor control of human arm	vadkoohi et al.		Mechanical Systems and Signal Processing
A wearable elbow exoskeleton for tremor suppression equipped with rotational semi-active actuator	et al.		Mechanical Systems and Signal Processing

Fonte: Autores.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram identificados artigos científicos, utilizando as ferramentas de busca: Scopus, Scielo e Google Acadêmico, no período de 1990 a 2021, aplicando as palavras chave “Tremor suppression”, “Pathological tremor”, “Tremor control” com isso foram selecionados, pelos títulos e resumos, os trabalhos relacionados ao nosso tema. Foi usado o critério de exclusão: artigos de baixa relevância, publicados em revistas com fator de impacto menor que 1. Dentre estes ainda foi adicionado o trabalho de (Dantas de Sá et al., 2019) devido a sua relevância no tema pesquisado. A

tabela 1 mostra os artigos escolhidos, seus autores, o ano e a revista em que foram publicados.

3. Resultados

Analisando os trabalhos apresentados, podemos dividir em categorias quanto ao princípio de solução utilizado: Estimulação elétrica funcional (Brittain et al., 2013; Copur et al., 2016; Dideriksen et al., 2017; Dosen et al., 2015; Freeman et al., 2015; Gillard et al., 1999; Pahwa et al., 2019; Popović Maneski et al., 2011; D. Zhang et al., 2011, 2011), atuador mecânico (Abbasi & Afsharfard, 2018; Arnold et al., 1993; Dantas de Sá et al., 2019; Herrnstadt & Menon, 2016; Pledgie et al., 2000; Rocon et al., 2007; Taheri et al., 2014, 2015; Zahedi et al., 2021; Zamanian & Richer, 2019; Zhou et al., 2017), sistemas amortecidos (Buki et al., 2018; Case et al., 2013; Fromme et al., 2020; Kotovsky & Rosen, 1998; Ture Savadkoohi et al., 2021) e materiais inteligentes (Abbasi & Afsharfard, 2018; Kelley & Kauffman, 2020).

Entende-se por estimulação elétrica funcional (FES) como o método que utiliza corrente elétrica de baixa tensão para emitir sinais elétricos aos músculos mais superficiais. Os sinais elétricos enviados aos músculos farão com que eles “acionem”, e quando aplicados de forma contrária ao tremor, funcionam como atuadores na supressão do tremor.

Entende-se por atuador mecânico sistemas que transformem outros tipos de energia em energia mecânica, esta pode ser entregue de forma angular (motores) ou linear (atuadores lineares).

Entende-se por sistemas amortecidos aqueles que utilizam de forças de amortecimento inerentes aos materiais para reduzir os tremores. Também são considerados nesta classificação os absorvedores dinâmicos, que são sistemas massa-mola-amortecedor sintonizados para atuar numa determinada faixa de frequências.

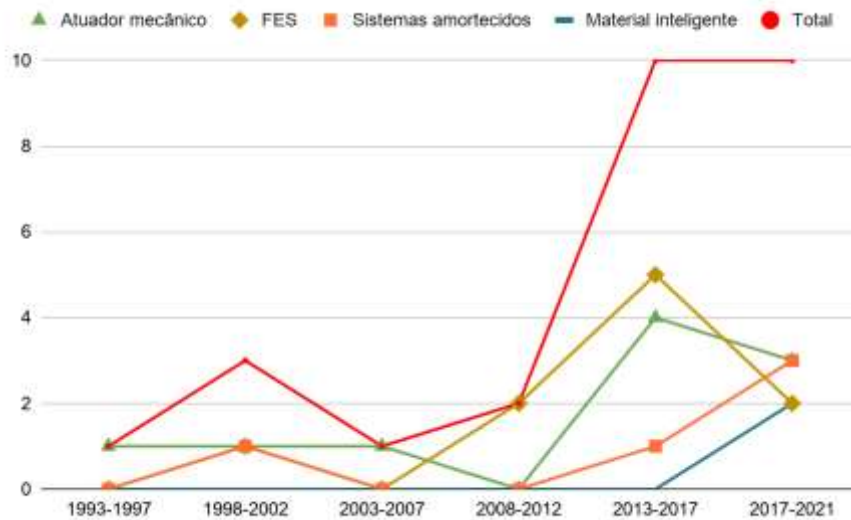
Entende-se por materiais inteligentes aqueles capazes de responder, modificando suas propriedades, de forma controlável e reversível a estímulos externos, estes podem ser de natureza elétrica, térmica ou mecânica.

Progressão histórica

Para uma análise da evolução da pesquisa no assunto estudado, foi construído o gráfico da figura 1, onde podemos ver a quantidade de pesquisas realizadas em cada período de 5 anos. Pelo gráfico, observamos que o período onde houveram maior quantidade de pesquisas foi 2013-2017, entretanto como essa pesquisa foi realizada em fevereiro de 2021 é provável que o quinquênio de 2017-2021 venha a superar essa marca à medida que novos trabalhos forem publicados.

Até o ano de 2017, houve predominância de soluções do tipo FES e atuador mecânico. No período seguinte percebemos uma melhor distribuição entre os tipos de solução e o aparecimento da utilização dos materiais inteligentes.

Figura 1 - Progressão histórica de artigos publicados.



Fonte: Autores.

Estimulação elétrica funcional

A FES, de modo geral, é feita ao aplicar-se um estímulo elétrico nos músculos do antebraço, como exceção temos o trabalho de (Brittain et al., 2013) no qual é aplicado um estímulo transcranial. O estímulo é feito através de eletrodos usando uma fonte de corrente constante que pode variar de 1mA a 20mA. A frequência da janela de estimulação deve ser igual a frequência de tremor do paciente. No entanto, apesar de utilizarem a mesma técnica é possível constatar peculiaridades no trabalho de cada autor.

No artigo de (Gillard et al., 1999) foram comparados estímulos elétricos, digitais e analógicos. Os experimentos foram realizados em três pessoas saudáveis imitando tremores. Foi verificado que o controle digital ofereceu uma atenuação média de 84% comparado a 65% do controle analógico.

Em (Popović Maneski et al., 2011) foi testado a utilização de estimulação fora de fase e com eletrodos multi-pad para reduzir a fadiga muscular. Os resultados foram obtidos para sete pacientes com Parkinson e tremor essencial. Seis deles apresentaram uma melhora média de 67% enquanto 1 não apresentou nenhuma melhora com a estimulação.

No trabalho de (D. Zhang et al., 2011) são usados sinais eletromiográficos como feedback do sistema de estímulo. Com eles, é possível prever a frequência que acontece o tremor. Não foram feitos testes em pacientes, mas simulações com sinais eletromiográficos de (Moore & Bronte-Stewart, 2005).

No estudo feito por (Brittain et al., 2013), é proposto um estímulo transcranial como método para redução do tremor, diferindo das demais soluções aqui apresentadas; esta se aproxima mais à DBS, com o diferencial de não necessitar de intervenção cirúrgica. A técnica foi testada em cinco pacientes que apresentaram uma redução média de 50% dos tremores de repouso.

(Dosen et al., 2015) deu continuidade ao conceito de (D. Zhang et al., 2011), testando em 6 pacientes a utilização da FES associada a um feedback com a EMG. Para o tratamento dos sinais, foi implementado uma transformada iterativa de Hilbert. Os resultados apontam que houve uma melhora média de 57% quando usando apenas o estímulo e de 42% quando estimulando e gravando os sinais de EMG.

(Freeman et al., 2015) combina linearização e controle repetitivo para tentar melhorar a técnica da FES. Os testes foram feitos em 9 adultos saudáveis, nos quais foram induzidos tremores. Os resultados obtidos pelo autor apresentam uma redução

média de 41% na frequência de pico.

Em (Copur et al., 2016) é identificado o sistema e foi desenvolvido um modelo de controle SISO para ser aplicado na FES para redução de tremores patológicos. Foram feitos testes experimentais com 4 participantes para validar o modelo e determinar parâmetros. Segundo os resultados obtidos, o modelo foi capaz de prever com uma acurácia acima de 60% em todos os participantes.

Foi proposto em (Dideriksen et al., 2017) uma investigação para verificar qual a maneira mais eficaz de aplicar a corrente elétrica. Foram usados eletrodos de superfície e intramusculares com correntes variando de 3 a 12mA para o primeiro e de 1 a 4mA para o segundo, e feedback através de sinais EMG. O estudo foi feito em 9 pacientes, onde se obteve uma redução significativa em 6 deles, resultando numa supressão média de 52% do tremor. Com uma redução maior do que a apresentada por (Dosen et al., 2015), este estudo indica que a criação de protocolos de estímulo elétrico pode melhorar o desempenho da técnica.

(Pahwa et al., 2019) fez um estudo para validar a eficácia e a segurança da utilização do método de estimulação elétrica dos nervos periféricos. Foi feito um estudo randomizado com 77 pacientes, onde 40 deles receberam tratamento com o aparelho Cala One, referente a patente (Altman et al., 2019), e os outros 37 receberam tratamento falso. O tremor foi avaliado antes e depois do tratamento e os critérios levados em consideração foram score da espiral de Arquimedes, score de tremor dos membros superiores e a avaliação clínica global de impressão da melhora em relação às atividades do dia a dia. Os resultados dessa pesquisa apontam que não houve melhora significativa no score da espiral de Arquimedes, mas houve uma melhora significativa no score de tremor dos membros superiores ($p=0,017$) 49% na redução do tremor nos que receberam o tratamento e de 27% nos que receberam o tratamento falso ($p=0,001$). Quanto à avaliação clínica da melhora 88% dos pacientes que usaram o tratamento perceberam uma melhora no tremor contra 62% dos que receberam o tratamento falso ($p=0,019$). Nenhum evento adverso significativo foi reportado.

Em uma pesquisa recente, usando o mesmo aparelho da pesquisa de (Pahwa et al., 2019), (Isaacson et al., 2020) fez um estudo prospectivo com 263 pacientes que adquiriram o produto final. Nesses testes foram verificados que 92% dos pacientes apresentaram alguma melhora, 54% dos pacientes apresentaram uma redução de mais de 50% do tremor e 25% dos pacientes apresentaram uma redução de mais de 70% dos tremores.

No trabalho de (Z. Zhang et al., 2019) foi proposto um novo método de estímulo usando controle repetitivo aplicado em múltiplos músculos. O objetivo é diminuir a fadiga muscular causada pela corrente elétrica e melhorar a efetividade de supressão. Os resultados foram obtidos a partir de simulação usando um sistema desenvolvido pelo autor e apontam reduções de até 87,23% com um par de eletrodos e 78,84% com dois pares de eletrodo, comparando com os métodos tradicionais de estímulo foram obtidos 65,68% e 54,54% para 2 e 1 pares de eletrodos respectivamente.

Atuadores mecânicos

As soluções utilizando atuadores mecânicos fazem uso da força mecânica entregue por estes para contrabalancear a força dos tremores. Podendo ser realizado de modo direto, atuando sobre a mão ou antebraço do paciente, ou de modo indireto, quando o atuador é usado para atuar sobre um sistema que será responsável pela estabilização. Esta técnica é a que nos leva às soluções mais variadas dentre todas.

(Arnold et al., 1993) propôs uma órtese que pode ser montada sobre uma mesa ou cadeira. Esta é composta de um sistema de freios que permite o amortecimento dos tremores em 3 graus de liberdade. Os resultados mostram reduções estatisticamente significativas em 4 dos 5 pacientes que participaram dos testes, apresentando diminuição do nível do tremor na ordem de 80%.

O artigo de (Pledgie et al., 2000) propõe o uso de um braço robótico PHANTOM anexado à uma cadeira de rodas e controlado por um método que utiliza a impedância da interface homem-máquina como feedback de um sistema de segunda

ordem. O experimento foi realizado com 4 pacientes, obtendo uma redução média de 14,391dB, ao definir a meta do sistema para 20dB.

(Rocon et al., 2007) desenvolveu e testou um exoesqueleto com objetivo de minimizar os tremores nos membros superiores. O sistema é composto de atuadores mecânicos, sensores e uma estrutura metálica que se prende ao braço do paciente. Foi constatado nos experimentos, realizados em 10 pacientes com Parkinson e tremor essencial, que aplicando um controle ativo é possível reduzir em média 82% do tremor.

Foi desenvolvida em (Taheri et al., 2014) uma órtese para estimar e reduzir os efeitos dos tremores do pulso. Esta é composta de dois atuadores pneumáticos lineares e uma estrutura que permite que estes se conectem ao pulso do paciente. Os testes foram realizados em uma bancada experimental, simulando tremores dois tipos de tremores (Parkinson e tremor essencial), e apontam para uma redução de 97,5% - 99,2% com efeitos mínimos nos movimentos intencionais.

Continuando seu trabalho em (Taheri et al., 2015) é utilizado o mesmo sistema do trabalho anterior, mas neste são utilizados dados de tremores de 10 pacientes para que sejam simulados na bancada. Nesses experimentos o autor aponta redução de 96,8% à 98,8% para a frequência do tremor e de 52,7% à 82,0% para a segunda harmônica.

A órtese de (Herrstadt & Menon, 2016) possui um grau de liberdade e foi projetada para reduzir os tremores do antebraço, utilizando um motor de supressão controlado por PID e com feedback de um transdutor de força. Os testes foram realizados em bancada experimental usando os dados de tremor presente em (Pledgie et al., 2000). Nestes foram obtidas reduções de mais de 99% da densidade do sinal com comprometimento de menos de 1% da componente intencional.

Em (Zhou et al., 2017) é proposta uma luva com sensores e conectada através de cabos a uma caixa onde se encontram os atuadores, usando controle PID para as variáveis da velocidade e posição. Foram simulados os tremores de 7 pacientes usando uma bancada experimental para validação do protótipo. Deste modo foi identificado um erro médio em relação ao movimento voluntário de 12,37%, obtendo uma performance inferior à de outros trabalhos (Rocon et al., 2007; Taheri et al., 2014).

Foi proposto em (Dantas de Sá et al., 2019) um dispositivo giroscópio para atenuar os tremores em um grau de liberdade. Este consiste de um disco de alumínio de 120mm acoplado a um motor elétrico com rotação de 4200 RPM. A rotação da massa do cilindro causa um efeito de estabilização no braço do paciente, este efeito foi simulado em ambiente computacional, considerando um tremor de 7 Hz. Os resultados apontam redução de 70,8%.

No trabalho de (Zamanian & Richer, 2019) foi usada uma órtese com motores lineares de imã permanente (MLIP) e um filtro notch com um estimador de frequência adaptativa. Para minimizar os efeitos indesejados de forças intrínsecas devido ao uso do MLIP foi desenvolvido um modelo de forças dinâmicas desse motor. Para os experimentos foi usado uma bancada para simular os sinais de tremores, previamente adquiridos, de pacientes com doença de Parkinson e tremor essencial. Foi aplicada a transformada de wavelet para analisar os sinais dos tremores e a performance do controlador no domínio tempo-frequência. Os resultados experimentais mostraram uma supressão média de 97,0% na primeira componente de frequência e de 79,8% na segunda componente de frequência. Também foi observado uma resistência de 0,36N ao movimento voluntário causado pelo MLIP.

Em (Zahedi et al., 2021) foi usada uma configuração de exoesqueleto com um atuador rotacional semi-controlável baseado em fluido magnetoreológico para reduzir os tremores do antebraço. A performance do sistema foi avaliada através de simulações e experimentos. Os resultados mostraram uma redução de 61,55% da velocidade angular e 61,68% da aceleração.

Sistemas amortecidos

Os sistemas amortecidos fazem uso das propriedades de amortecimento de alguns materiais para suprimir os movimentos voluntários ou de absorvedores dinâmicos de vibrações, estes são sistemas secundários massa-mola-amortecedor

no qual sua frequência de ressonância está sintonizada a frequência de trabalho do sistema principal.

(Kotovskiy & Rosen, 1998) construíram uma órtese vestível usando uma viga viscosa. O amortecimento do sistema é obtido pelo amortecimento de uma camada restritiva de duas placas finas de metal com silicone líquido entre elas, responsável pelo amortecimento do cisalhamento. Os resultados de redução dos tremores não são apresentados neste trabalho.

O trabalho de (Case et al., 2013) explora o desenvolvimento e a efetividade de amortecedores magneto-reológicos de baixa escala. O amortecimento do sistema pode ser controlado a partir de uma corrente elétrica que passa por uma bobina ao redor do cilindro no qual o fluido se encontra, gerando assim um campo magnético, que passa pelo fluido e altera suas propriedades. Os resultados foram obtidos a partir de simulação computacional e com bancada para caracterizar o amortecedor, entretanto não são apresentados resultados para capacidade de redução de tremor.

(Buki et al., 2018) apresenta um dispositivo absorvedor passivo para atenuar o tremor de pronação/supinação, denominado Vib-bracelet. Baseia-se nos princípios da absorção de vibração dinâmica e está sintonizado com a frequência do tremor. Os protótipos foram fabricados e testados em um modelo mecânico do antebraço humano. Simulações e experimentos demonstram a eficiência do dispositivo em atenuar vibrações na faixa de 4 a 6 Hz, que é a faixa de frequência do tremor observado, com atenuação de amplitude máxima de 86%.

(Fromme et al., 2020) propôs o conceito de uma órtese leve e flexível, usando uma estrutura preenchida com ar, que pode ser inflada ou desinflada de acordo com a necessidade do usuário. Quanto maior a quantidade de ar, maior o amortecimento fornecido pela órtese. O teste foi realizado em um único paciente durante a realização de atividades como pegar um copo, derramar água e desenhar uma espiral. Foi percebida uma melhora de 74% a 82% do tremor.

O estudo de (Ture Savadkoobi et al., 2021) apresenta um modelo matemático para o desenvolvimento e determinação de parâmetros de absorvedores dinâmicos de vibrações de natureza não linear para aplicação na redução de tremores patológicos.

Materiais inteligentes

O sistema proposto por (Abbasi & Afsharfard, 2018) se trata de uma colher funcional que faz o uso de materiais piezoelétricos como sensores, atuadores e coletores de energia. A energia gerada nos piezoelétricos devido ao tremor do paciente é usada para energizar o sistema. Os resultados obtidos através de testes em bancada experimental sugerem uma redução de 80% do tremor enquanto comendo para uma faixa de 3-12Hz.

(Kelley & Kauffman, 2020) sugerem o uso de elastômeros dielétricos como atuadores para supressão de tremores patológicos. Neste estudo é feito o uso de um método de controle que atua apenas no tremor, permitindo ao paciente realizar movimentos voluntários sem resistência do sistema. Essa abordagem de controle faz uso da baixa impedância dos elastômeros para compensar sua baixa força. O controlador aplica um filtro para estimar a frequência do tremor e um feedback adaptativo para minimizar a influência no movimento voluntário. O modelo foi testado apenas em ambiente computacional, onde apresentou uma redução de 90% para movimentos involuntários lentos e de 50% para movimentos rápidos.

4. Discussão

Efetividade na redução do tremor

Comparando os tipos de solução apresentados podemos observar que os atuadores eletromecânicos são aqueles que possuem maior capacidade de supressão do tremor, alcançando reduções da ordem de 90% (Herrnstadt & Menon, 2016; Taheri et al., 2015), entretanto apresentam limitações sua utilização devido ao elevado peso, volume e consumo de energia.

A solução usando material inteligente (Kelley & Kauffman, 2020) também apresentou, em simulação computacional, uma redução da ordem de 90% para tremores lentos e de 50% para tremores rápidos, porém ainda é necessário que sejam feitos testes em humanos para uma melhor avaliação de sua eficácia. No trabalho de (Abbasi & Afsharfard, 2018) foi encontrada em

bancada experimental uma redução de até 80%, entretanto como se trata de uma colher funcional, tem possibilidades limitadas de uso no tratamento.

Os sistemas amortecidos conseguiram alcançar supressões da ordem de 80% sem a necessidade de uma fonte de alimentação, porém apenas os trabalhos de (Buki et al., 2018; Fromme et al., 2020) trazem resultados da sua utilização. Além disso em (Buki et al., 2018), como se trata de um absorvedor dinâmico, deve ser sintonizado a frequência de tremor de cada paciente para que seja eficaz. Em (Fromme et al., 2020) há uma dificuldade do movimento voluntário devido ao volume de ar.

Para a solução através da FES sua efetividade na supressão é inferior às das soluções anteriores, sendo da ordem de 50% de supressão para a maioria dos casos, no entanto essa melhora ainda é comparável a dos farmacoterápicos de primeira-linha para tremor essencial (Hedera et al., 2013; Isaacson et al., 2020; Zesiewicz et al., 2008).

Aplicabilidade como produto

Quanto à aplicabilidade como um produto, a estimulação de nervo periférico é a única já comercializada, e esta é feita pela empresa Cala Health através da patente (Altman et al., 2019), também é a que apresenta os resultados mais sólidos, sendo testada com quantidades significativas de pessoas, sendo um dos testes (Pahwa et al., 2019) duplo cego envolvendo pacientes e médicos. O custo de aquisição do aparelho é de 3.200,00 USD mais uma taxa de manutenção mensal de 157,00 USD (Cala Trio, 2020), o que pode ser um limitador para aquisição individual no Brasil.

Dos trabalhos envolvendo atuadores mecânicos, apenas os mais antigos apresentaram testes em humanos (Arnold et al., 1993; Pledgie et al., 2000; Rocon et al., 2007). Os mais recentes apresentam testes feitos em laboratório, com equipamentos que simulam tremores (Herrnstadt & Menon, 2016; Taheri et al., 2014, 2015; Zamanian & Richer, 2019; Zhou et al., 2017), ainda em fase de protótipos.

Dentre os trabalhos de sistemas amortecidos (Buki et al., 2018; Fromme et al., 2020) tem resultados experimentais com bancadas que simulam tremores e há aqueles que não apresentaram resultados na redução do tremor (Case et al., 2013; Kotovsky & Rosen, 1998; Ture Savadkoohi et al., 2021).

A ausência de testes para as duas soluções anteriores poderia alterar os resultados apresentados, como também mostrar problemas em relação ao conforto do usuário. Isso pode ser reforçado ao analisarmos os dispositivos testados por (Rocon et al., 2007), (Herrnstadt & Menon, 2016) e (Buki et al., 2018), que ocupam quase todo o braço do usuário, e/ou devido serem pesados: 129 g (Zhou et al., 2017), 290 g (Herrnstadt & Menon, 2016), 260-500 g (Buki et al., 2018). Também deve-se observar que para os atuadores mecânicos ainda há a necessidade de fontes de energia para a alimentação do sistema, que podem comprometer ainda mais em relação ao peso, volume e autonomia.

Os materiais inteligentes prometem reduções significativas nos tremores, garantindo o conforto do usuário, entretanto os testes de (Kelley & Kauffman, 2020) ainda se encontram em fase computacional. Para (Abbasi & Afsharfard, 2018), apesar de já haver testes em bancada experimental, a utilização de seu conceito é limitada, pois, como se trata de uma colher funcional, apenas reduz o tremor durante a atividade de comer.

5. Conclusão

Foi possível observar diversas formas de resolução para o problema de Parkinson e as formas alternativas de reduzir tremores patológicos, somando um total de 27 artigos científicos avaliados. Dentre eles podemos identificar 4 categorias principais e as características intrínsecas a cada uma.

As duas soluções que foram mais estudadas são a da estimulação de nervo periférico (FES) e as que utilizam atuadores mecânicos. A primeira é a categoria mais promissora para aplicação e comercialização, já sendo um produto que pode ser adquirido nos Estados Unidos pela Cala Health, e possui boas bases de evidência para sua eficácia e segurança de uso, embora

ainda apresente um custo relativamente alto para os padrões de uso em países como o Brasil.

Os atuadores mecânicos, apesar de se esperar uma maior atenuação dos tremores, ainda não se encontram em fase de comercialização, e se faz necessário mais estudos em seres humanos para demonstrar sua eficácia e segurança de uso.

As soluções de sistemas amortecidos e materiais inteligentes ainda se encontram em fases iniciais de desenvolvimento, mas podem se tornar formas de se conseguir maiores reduções nos tremores com menor peso e volume.

Como sugestão para trabalhos futuros, o desenvolvimento de um equipamento de baixo custo que aplique a solução FES, pois é a que apresenta a melhor base de evidências científicas, entretanto ainda não se encontra difundida devido ao custo de compra para o usuário.

Referências

- Abbasi, M., & Afsharfard, A. (2018). Modeling and experimental study of a hand tremor suppression system. *Mechanism and Machine Theory*, 126, 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.04.009>
- Altman, T., Delp, S., Paderi, J., Rajasekhar, V., & Rosenbluth, K. (2019). *Devices for controlling tremor* (European patent office Patent N° EP3498332A1).
- Armstrong, M. J., & Okun, M. S. (2020). Diagnosis and Treatment of Parkinson Disease: A Review. *JAMA*, 323(6), 548. <https://doi.org/10.1001/jama.2019.22360>
- Arnold, A. S., Rosen, M. J., & Aisen, M. L. (1993). Evaluation of a controlled-energy-dissipation orthosis for tremor suppression. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 3(3), 131–148. [https://doi.org/10.1016/S1050-6411\(05\)80001-X](https://doi.org/10.1016/S1050-6411(05)80001-X)
- Botelho, L. L. R., Cunha, C. C. de A., & Macedo, M. (2011). O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. *Gestão e Sociedade*, 5(11), 121–136. <https://doi.org/10.21171/ges.v5i11.1220>
- Brittain, J.-S., Probert-Smith, P., Aziz, T. Z., & Brown, P. (2013). Tremor Suppression by Rhythmic Transcranial Current Stimulation. *Current Biology*, 23(5), 436–440. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.01.068>
- Buki, E., Katz, R., Zacksenhouse, M., & Schlesinger, I. (2018). Vib-bracelet: A passive absorber for attenuating forearm tremor. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 56(5), 923–930. <https://doi.org/10.1007/s11517-017-1742-7>
- Cala Trio. (2020). *Patient FAQs*. Cala Trio. <https://calatrio.com/patients/frequently-asked-questions/>
- Campbell, W. W. (2014). *DeJong: O exame neurológico* (7ª ed, Vol. 1–1). Guanabara Koogan.
- Case, D., Taheri, B., & Richer, E. (2013). Design and Characterization of a Small-Scale Magnetorheological Damper for Tremor Suppression. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(1), 96–103. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2011.2151204>
- Copur, E. H., Freeman, C. T., Chu, B., & Laila, D. S. (2016). System identification for FES-based tremor suppression. *European Journal of Control*, 27, 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2015.12.003>
- Dantas de Sá, M. R., Fonseca Júnior, A. W. N. da, Nascimento, A. M. do, & Silva, A. A. (2019). Simulação de Um Dispositivo Giroscópio Absorvedor do Tremor da Doença de Parkinson. In *II Simpósio de pós-graduação em engenharia mecânica da universidade federal de campina grande: Coletânea de artigos* (1º ed). Poisson.
- Dideriksen, J. L., Laine, C. M., Dosen, S., Muceli, S., Rocon, E., Pons, J. L., Benito-Leon, J., & Farina, D. (2017). Electrical Stimulation of Afferent Pathways for the Suppression of Pathological Tremor. *Frontiers in Neuroscience*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00178>
- Dosen, S., Muceli, S., Dideriksen, J. L., Romero, J. P., Rocon, E., Pons, J., & Farina, D. (2015). Online Tremor Suppression Using Electromyography and Low-Level Electrical Stimulation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 23(3), 385–395. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2014.2328296>
- Elble, R. J. (2009). Tremor: Clinical Features, Pathophysiology, and Treatment. *Neurologic Clinics*, 27(3), 679–695. <https://doi.org/10.1016/j.ncl.2009.04.003>
- Freeman, C. T., Sampson, P., Burrige, J. H., & Hughes, A.-M. (2015). Repetitive control of functional electrical stimulation for induced tremor suppression. *Mechatronics*, 32, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.10.008>
- Fromme, N. P., Camenzind, M., Riener, R., & Rossi, R. M. (2020). Design of a lightweight passive orthosis for tremor suppression. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 17(1), 47. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00673-7>
- Gillard, D. M., Cameron, T., Prochazka, A., & Gauthier, M. J. A. (1999). Tremor suppression using functional electrical stimulation: A comparison between digital and analog controllers. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 7(3), 385–388. <https://doi.org/10.1109/86.788474>
- Golan, D., Tashjian, A., J. Armstrong, E., & W. Armstrong, A. (2009). *Princípios de farmacologia: A base fisiopatológica da farmacoterapia* (3ª ed).
- Hedera, P., Cibulčík, F., & Davis, T. L. (2013). Pharmacotherapy of Essential Tremor. *Journal of Central Nervous System Disease*, 5, JCNDS.S6561. <https://doi.org/10.4137/JCNDS.S6561>
- Herrnstadt, G., & Menon, C. (2016). Voluntary-Driven Elbow Orthosis with Speed-Controlled Tremor Suppression. *Frontiers in Bioengineering and*

Biotechnology, 4. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2016.00029>

Isaacson, S. H., Peckham, E., Tse, W., Waln, O., Way, C., Petrossian, M. T., Dahodwala, N., Soileau, M. J., Lew, M., Dietiker, C., Luthra, N., Agarwal, P., Dhall, R., Morgan, J., Calakos, N., Zesiewicz, T. A., Shamim, E. A., Kumar, R., LeWitt, P., ... Pahwa, R. (2020). Prospective Home-use Study on Non-invasive Neuromodulation Therapy for Essential Tremor. *Tremor and Other Hyperkinetic Movements*, 10(0), 29. <https://doi.org/10.5334/tohm.59>

Kelley, C. R., & Kauffman, J. L. (2020). Tremor-Active Controller for Dielectric Elastomer-Based Pathological Tremor Suppression. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 25(2), 1143–1148. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2020.2972884>

Kotovsky, J., & Rosen, M. J. (1998). Wearable Tremor-suppression Orthosis. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 35(4), 26.

Moore, G., & Bronte-Stewart, H. (2005). The poetics of tremor. In *Modeling in the neuroscience: From biological systems to neuromimetic robotics* (p. 581–597).

Pahwa, R., Dhall, R., Ostrem, J., Gwinn, R., Lyons, K., Ro, S., Dietiker, C., Luthra, N., Chidester, P., Hamner, S., Ross, E., & Delp, S. (2019). An Acute Randomized Controlled Trial of Noninvasive Peripheral Nerve Stimulation in Essential Tremor. *Neuromodulation: Technology at the Neural Interface*, 22(5), 537–545. <https://doi.org/10.1111/ner.12930>

Pledgie, S., Barner, K. E., Agrawal, S. K., & Rahman, T. (2000). Tremor suppression through impedance control. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 8(1), 53–59. <https://doi.org/10.1109/86.830949>

Poewe, W., Seppi, K., Tanner, C. M., Halliday, G. M., Brundin, P., Volkman, J., Schrag, A.-E., & Lang, A. E. (2017). Parkinson disease. *Nature Reviews Disease Primers*, 3(1), 17013. <https://doi.org/10.1038/nrdp.2017.13>

Popović Maneski, L., Jorgovanović, N., Ilić, V., Došen, S., Keller, T., Popović, M. B., & Popović, D. B. (2011). Electrical stimulation for the suppression of pathological tremor. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 49(10), 1187–1193. <https://doi.org/10.1007/s11517-011-0803-6>

Rocon, E., Manto, M., Pons, J., Camut, S., & Belda, J. M. (2007). Mechanical suppression of essential tremor. *The Cerebellum*, 6(1), 73–78. <https://doi.org/10.1080/14734220601103037>

Taheri, B., Case, D., & Richer, E. (2014). Robust Controller for Tremor Suppression at Musculoskeletal Level in Human Wrist. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 22(2), 379–388. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2013.2295034>

Taheri, B., Case, D., & Richer, E. (2015). Adaptive Suppression of Severe Pathological Tremor by Torque Estimation Method. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(2), 717–727. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2317948>

Ture Savadkoohi, A., Lamarque, C.-H., & Goossaert, C. (2021). Nonlinear passive tremor control of human arm. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 146, 107041. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107041>

Zahedi, A., Wang, Y., Martinez-Hernandez, U., & Zhang, D. (2021). A wearable elbow exoskeleton for tremor suppression equipped with rotational semi-active actuator. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 157, 107674. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107674>

Zamanian, A. H., & Richer, E. (2019). Adaptive notch filter for pathological tremor suppression using permanent magnet linear motor. *Mechatronics*, 63, 102273. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2019.102273>

Zesiewicz, T. A., Elble, R., Louis, E. D., Hauser, R. A., Sullivan, K. L., Dewey, R. B., Ondo, W. G., Gronseth, G. S., & Weiner, W. J. (2008). Practice Parameter: CME Therapies for essential tremor. *American Academy of Neurology*, 14.

Zhang, D., Poignet, P., Widjaja, F., & Tech Ang, W. (2011). Neural oscillator based control for pathological tremor suppression via functional electrical stimulation. *Control Engineering Practice*, 19(1), 74–88. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.08.009>

Zhang, Z., Chu, B., Liu, Y., Ren, H., & Owens, D. H. (2019). Wrist tremor suppression based on repetitive control with multi-muscle electrical stimulation**This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61803344, 61473265) and the Innovation Research Team of Science & Technology of Henan Province (No. 17IRTSTH-N013). *IFAC-PapersOnLine*, 52(29), 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.617>

Zhou, Y., Naish, M. D., Jenkins, M. E., & Trejos, A. L. (2017). Design and validation of a novel mechatronic transmission system for a wearable tremor suppression device. *Robotics and Autonomous Systems*, 91, 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.12.009>