

# Modelagem e Simulação de um Sistema de Estimulação Por Ondas Elétricas

STELUTTI, Lucas, Aluno do Curso de Engenharia Elétrica<sup>1</sup>, SABLON, Vicente I. B.<sup>2</sup>, Doutor em Engenharia Elétrica, FAESARELLA, Annete S.<sup>3</sup>, Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais.

<sup>1</sup>Universidade São Francisco, Campinas, Brasil, [lucasmagno@hotmail.com](mailto:lucasmagno@hotmail.com), <sup>2</sup>Universidade São Francisco, Campinas, Brasil, [vicente.sablon@usf.edu.br](mailto:vicente.sablon@usf.edu.br), <sup>3</sup>Universidade São Francisco, Itatiba, Brasil, [annete.faesarella@usf.edu.br](mailto:annete.faesarella@usf.edu.br).

*Abstract– This article presents a modeling and simulation of a muscle stimulation system by electric waves, applied to restore the mobility of patients in the process of bedridden, mainly in ICU patients. In view of the diversity of protocols for stimulation, by electric waves, applied to this group of patients, and also due to the fact that they do not have a consensus on the most correct modulation of electric waves, with regard to the effects of stimulation of contractions, accompanied by a minimum muscle fatigue, this investigation is performed here. It is proposed to develop a device prototype that promotes the desired electrical stimulation, but that is economically viable, giving access to the population, so that treatments can be performed at home, in cases of patients outside the ICU – Intensive Care Unit.*

**Keywords-- Electrical Stimulation System, ICU patients treatment, Muscle Fatigue .**

## I. INTRODUÇÃO

A utilização dos fundamentos da Engenharia Elétrica fora do ramo das ciências exatas já é uma realidade na sociedade atual e o uso da mesma em áreas da medicina se tornou mais eficaz ao passar dos anos, sendo essencial em algumas atividades do dia a dia. Nessa direção, nota-se que atualmente, a evolução tecnológica e avanços na medicina colocaram a taxa de sobrevivência em uma UTI – Unidade de Terapia Intensiva num patamar de 80%.

No caso de pacientes acamados, um dos métodos utilizados para que seu tônus muscular não seja perdido e que não seja provocada a atrofia muscular no tempo de internamento, é justamente a estimulação muscular por ondas elétricas.

Verificou-se que a atrofia resultante da perda de tônus muscular por acidentes ou doenças musculares prejudica diretamente a reabilitação de um paciente e ainda, que a imobilidade pode ser considerada o maior fator de intercorrências musculares, principalmente em membros inferiores a partir da primeira semana de internação.

Um método utilizado para impedir a imobilização dos membros inferiores é a estimulação muscular através de ondas elétricas neuromusculares, consistindo em uma atividade de contrações musculares por meio de ativações do nervo periférico e realizado através da aplicação de um estímulo elétrico com baixa tensão. A aplicação pode variar de 1 a 4kHz, com eletrodos posicionados na zona motora da musculatura requerida.

Com o objetivo de entender o funcionamento e propor um sistema de estimulação muscular por meio de ondas elétricas, o artigo apresenta um estudo a respeito dos protocolos de tratamento, no que diz respeito à modulação mais adequada das ondas elétricas e dos circuitos que mais se adaptam a tal propósito.

Apresenta-se um protótipo de um equipamento acessível à população, com viabilidade de uso doméstico, de um gerador de ondas elétricas aplicado justamente à eletroestimulação muscular.

## I. REFERENCIAL TEÓRICO

A técnica não invasiva da estimulação por ondas elétricas compreende a aplicação de corrente elétrica pela ação de eletrodos dispostos na superfície da pele em pontos motores específicos, de acordo com os músculos eleitos. Tal corrente eleva a permeabilidade da membrana muscular, o que produz um potencial elétrico de ação prolongada, levando a uma contração muscular eficaz [1].

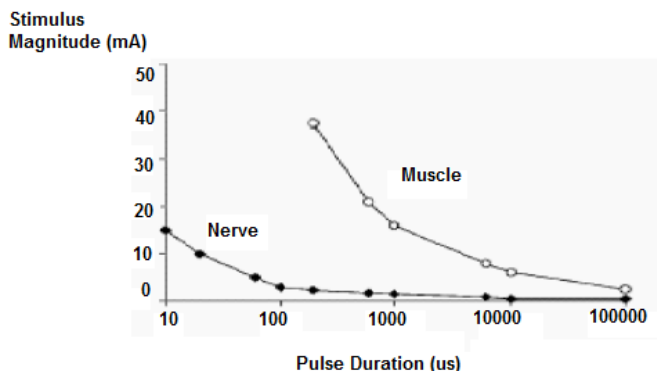
Com o intuito de compreender adequadamente a proposta, determinados conceitos físicos acerca da eletricidade necessitam ser formalizados, dessa maneira, tem-se que o bioeletromagnetismo é um fenômeno eletromagnético que acontece em organismos vivos. A diferença de potencial elétrico através das membranas das células do corpo possuem a capacidade de programar, processar e impulsionar pulsos elétricos no sistema nervoso [2].

Os tecidos biológicos têm uma capacidade condutora devido aos íons livres presentes neles, e quando expostos a uma diferença de potencial, se movimentam. Com essa movimentação de íons numa direção preferencial, se tem uma corrente elétrica e por conseguinte, um campo eletromagnético local, criado por ela [1].

Na medida em que a intensidade da corrente aumenta, maior será o campo eletromagnético em seu entorno, gerando-se ondas eletromagnéticas que se propagam de maneira oscilatória [3].

As ondas eletromagnéticas são mensuradas por pulsos, em unidades de ms ou  $\mu$ s, que equivalem à largura de fase da onda, ou à medida do local onde tem início até o local de término da onda. A cada pulso obtém-se uma quantidade de energia específica, já predeterminada, como mostra a figura 1.

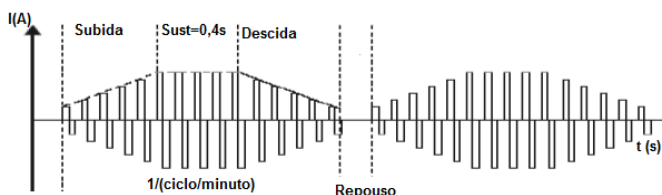
No caso de ser projetada no tempo, pode-se quantificar sua frequência, cuja unidade de medida é o Hz (hertz)[1].



**Figura 1** – Demonstrativo do tempo de pulso para atingir músculo [4].

Elevando-se a frequência da corrente elétrica aplicada, aumenta-se o estímulo sensorial [3].

A modulação é a técnica que modifica as características da portadora (sinal que contém as informações da onda elétrica) no que diz respeito às alterações combinadas de frequência, amplitude ou fase, conforme pode ser observado na figura 2.



**Figura 2** – Demonstrativo de modulação de um sistema de ondas elétricas [4].

Conforme realizadas as modulações, nota-se, nesse caso, que quanto maior o tempo de subida maior será a intensidade dos pulsos aplicados, para a descida, seguimos o mesmo parâmetro, conforme o mesmo for diminuindo, o processo de intensidade dos pulsos também diminuirá. Para controlar o tempo ao qual o pulso se manterá aplicando no paciente, verifica-se a área *Sust*, da figura 2, em que o ciclo do processo tem a duração de 0,4s.

As pesquisas de Hogenkamp, Mittelmeijer, Smits e Van Stralen [5], e de Ward [6], indicam que a modulação em *Bursts* (conjunto de pulsos) com duração curta em correntes alternadas com frequência média, possibilita uma melhor eficácia no estímulo sensorial e motor, uma vez que o limiar de ativação dos feixes nervosos reduz de forma proporcional à elevação da duração dos *Bursts*.

A adoção de uma modulação em rampa pode ser considerada quando o objetivo é impedir a fadiga precoce do músculo, sendo a frequência de 50Hz a mais indicada. Todavia, os feixes musculares de tipo I (epimíseo) são estimulados a uma frequência de 20 a 30Hz, sendo a

frequência de 20Hz, a mais acertada para esse fim. Já os feixes de tipo II (perimíseo) são estimulados entre 50 e 150Hz, sendo a frequência de 80Hz, a mais adequada. O aspecto do conforto do paciente, frente à aplicação dos pulsos, está relacionado com o tempo de aplicação e a fase dos pulsos [7].

Os autores conduziram um estudo comparativo utilizando um protocolo de treino ativo apendicular com estimulação muscular por ondas elétricas, em sujeitos com Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica severa, estes se encontravam acamados e intubados por período prolongado [8]. O protocolo testado para a estimulação muscular por ondas elétricas compreendeu a aplicação de um impulso quadrado bifásico com eletrodos superficiais. Cada uma das sessões foi iniciada com estímulos a uma frequência de 8Hz e 25ms de largura de pulso, por cinco minutos, depois foi aplicada uma frequência 35Hz e largura de impulso de 35ms ao longo de 25 minutos de duração. Os autores puderam concluir que aconteceu um aumento na força muscular periférica nos grupos avaliados, principalmente no subgrupo submetido à eletroestimulação associada. Também pode ser observado que o grupo submetido à estimulação muscular por ondas elétricas foi capaz de movimentar-se do leito à uma cadeira próxima, em um período menor de tempo, quando comparado aos demais.

Com isso, percebe-se que a principal vantagem da utilização de estimuladores por ondas elétricas é o bem estar e qualidade de vida, observados na tratativa de pacientes acamados, podendo reduzir o tempo de internação. Contudo, quando da alta hospitalar, o ideal seria que o paciente continuasse com as sessões de eletroestimulação, até que esteja capaz de, por si mesmo, praticar alguma atividade que promova a mobilidade muscular conquistada com o método de tratamento citado. Porém, a inviabilidade financeira do tratamento muitas vezes coloca em risco de se perder o progresso conquistado durante o período de internação do paciente.

### III. METODOLOGIA

Para o processo de estimulação por ondas elétricas, foi necessário entender sua funcionalidade e em qual momento um ser humano necessitaria de tal processo. Para isso, desenvolveu-se o mapa conceitual da figura 3, capaz de expor o tema abordado de uma forma cronológica.

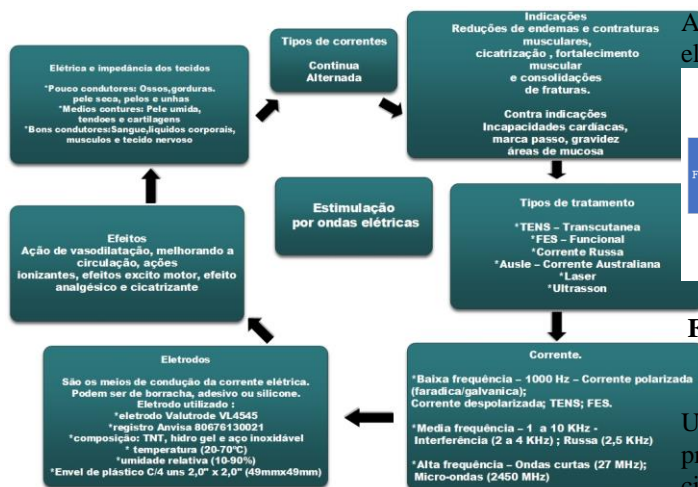


Figura 3 – Mapa conceitual do processo de eletroterapia

Inicia-se o processo de modelagem do primeiro circuito aplicando a computação física (*Physical Computing*), definida como a capacidade de associar dados analógicos e digitais através de um processo chamado transdução. A transdução consiste na conversão de formas de energia física em tensão elétrica variável, e recebe este nome devido ao elemento de conversão chamado transdutor.

O elemento que torna esse processo possível é o microcontrolador, que faz a mediação entre os *inputs* e *outputs* analógicas e digitais permitindo a configuração das relações entre ambos os fluxos de energia. Ao ser associado a sensores e atuadores, é possível a obtenção de diferentes resultados na medida em que permite a manipulação de várias *interfaces* ao mesmo tempo.

A computação física é formada por elementos de *hardware* e *software*. O desenvolvimento de ambos vem se tornando cada vez mais facilitado devido ao surgimento e popularização de dispositivos como Arduino, que permitem a sua implementação de forma descomplicada, assim, o uso do Arduino, será capaz de simular as formas de onda aplicadas durante um tratamento. Este processo irá simular a condição dos tipos de onda no período de tempo *Ton* e *Toff* do processo, podendo observar as formas de pulsos:

- Pulsos isolados positivos e negativos
- Pulsos monofásicos
- Trens de pulso
- Pulsos bifásicos

A figura 4 mostra o diagrama em blocos do circuito de eletroestimulação idealizado.

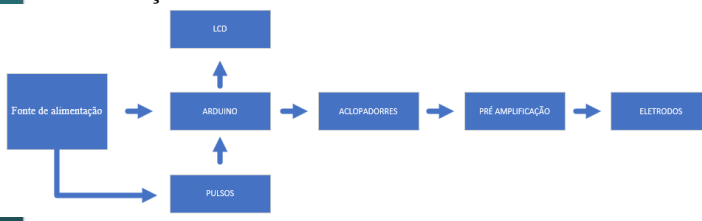


Figura 4 – Diagrama de bloco de um circuito de estimulação com Arduino

Utilizando a linguagem de programação em C++, inicia-se o processo de criação do código responsável em comandar o circuito logico. Após o processo de criação da linguagem, foi realizado a compilação do programa, utilizando Arduino IDE, foi transferido o código fonte para o sistema lógico.

A montagem foi realizada de uma forma onde é possível selecionar os pulsos, simulando cada aspecto de um instrumento de estimulação por ondas elétricas.

A modelagem conta com um botão de tipo de onda onde capaz de selecionar o pulso em relação ao tempo, seguido do circuito logico (Arduino), responsável pelo controle de todo o sistema, levando o sinal a um LCD e aos acopladores responsáveis por isolar o sistema lógico do sistema de potência.

A pré-amplificação do sistema é constituída por transistores bipolares, responsáveis pelo alto ganho de corrente no circuito.

A modelagem proposta, é fundamentada num um circuito amplificador, possuindo uma fonte de tensão limitada em 1 A, devido ao fato de correntes acima deste valor serem prejudiciais ao ser humano, principalmente por se tratar de um sistema caseiro. Tem-se na saída do circuito, um regulador de tensão.

Por fim, é realizada uma comparação entre os valores de mercado dos componentes utilizados e um equipamento profissional, bem como sua funcionalidade.

#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O circuito construído para a modelagem dos pulsos é mostrado na figura 5.

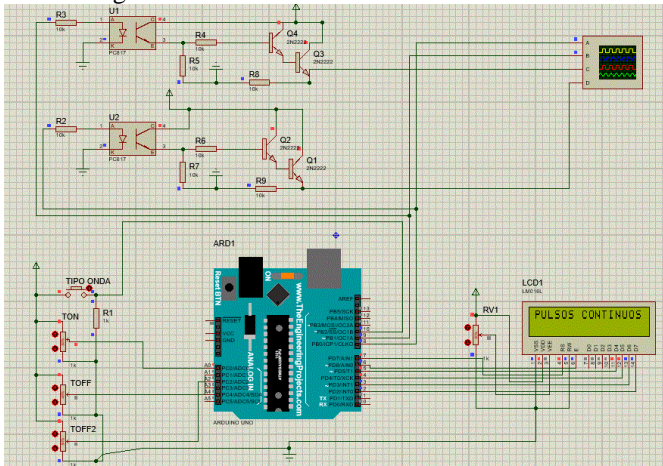


Figura 5 – Circuito para pulsos contínuos

Com esse circuito, pode-se observar, por meio da figura 6, a funcionalidade do modelo na forma dos pulsos gerados.

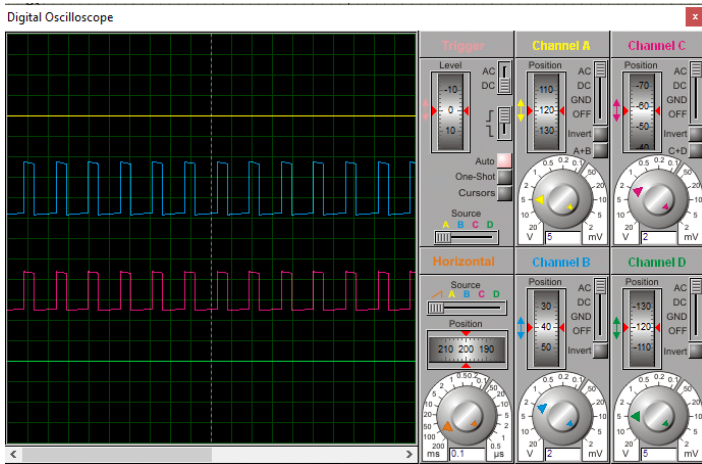


Figura 6 – Forma de onda contínua no tempo

Na segunda fase da modelagem, foi incluído o circuito amplificador e o regulador de tensão, mostrados na figura 7.

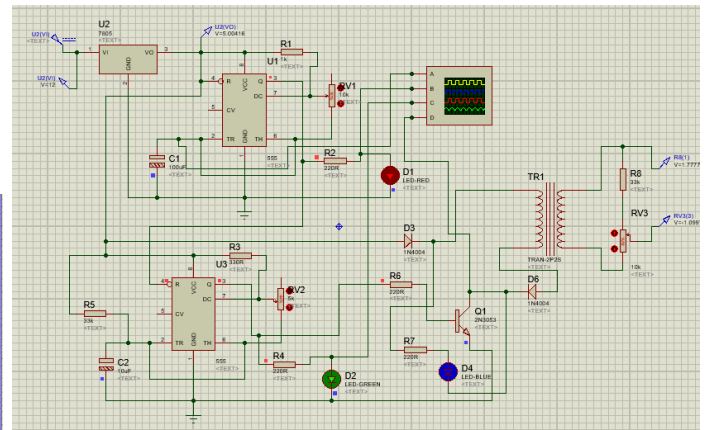


Figura 7 – Sistema completo

Por não possuir um sistema lógico atuando como controlador dos sinais, a configuração é feita através de potenciômetros capazes de realizar a variação da frequência do circuito. A forma de onda produzida pelo circuito da figura 7 é apresentada na figura 8.

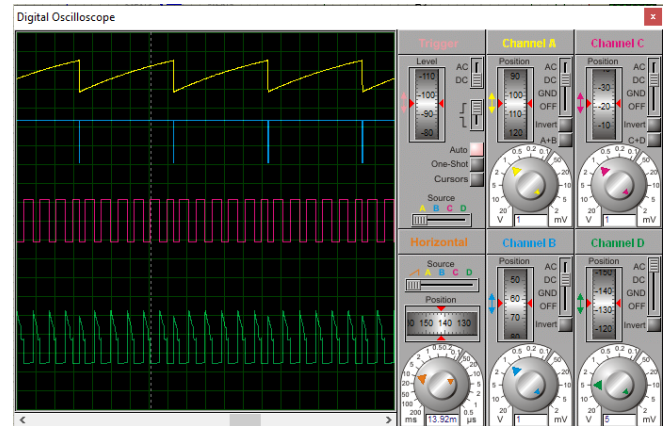


Figura 8 – Formas de onda do sistema completo

O gasto total para a montagem de um protótipo, demonstra a viabilidade do mesmo para aplicação caseira na sociedade.

O valor de futuros testes, homologação e demais tratativas não foram considerados no projeto, porém na tabela 1, verifica-se o gasto total de montagem dos dois protótipos (circuitos de pulsos e circuito amplificador e regulador de tensão).

**Tabela 1** – Relação de preços dos componentes do circuito com Arduino [9]

Componentes	Valor em (US\$)	Quantidade utilizada
Arduino Uno	3,33	1
Potenciômetro	2,99	4
Botão Switch	0,5	1
Resistor 1 Kohms	0,3	2
Resistor 10 Kohms	0,3	8
Foto acoplador	0,12	2
PC817	6,90	4
Transistor 2N222	3,90	1
LCD 0161		

**Tabela 2** – Relação de preços dos componentes do circuito amplificador [9].

Componentes	Valor em (US\$)	Quantidade Utilizada
Resistor 33 Kohms	0,2	1
Resistor 330 Ohms	0,3	1
Resistor 220 Ohms	0,1	4
Led	0,2	3
Potenciômetro 10 Kohms	3,00	2
Potenciômetro 5 Kohms	2,99	1
Diodo 1N4004	0,5	2
Transistor 2N3053	0,5	1
CI 555	0,5	5
CI regulador 7805		1
Transformador 200mA a 1A	12,00	1
Capacitor 10 uF	0,2	1
Capacitor 100 uF	0,2	1

O objetivo principal do artigo foi alcançado, pois foram averiguados os principais aspectos da importância da eletroestimulação muscular com a finalidade de restabelecer a mobilização do paciente em processo de acamação.

Em relação aos objetivos específicos, também foram alcançados, uma vez que foram verificados os aspectos conceituais sobre a estimulação por ondas elétricas; avaliados estudos relevantes sobre os efeitos da eletroestimulação em pacientes, além das vantagens e desvantagens do método de tratamento.

Em virtude do dinâmico e contínuo progresso tecnológico e científico da área médica intensivista, a sobrevivência de pacientes graves tem aumentado substancialmente. Entre as intercorrências derivadas de uma

internação prolongada, a debilidade adquirida parece ser uma das complicações neuromusculares que acometem cerca de 30% a 60% dos pacientes internados em unidades de tratamento intensivo. Dentre as metodologias usadas pelos profissionais do ramo médico, a eletroestimulação tem recebido atenção, pois consegue preservar ou impedir sequelas durante o período de tratamentos intensivos.

Conclui-se que a eletroestimulação em pacientes críticos, pode ser um método exequível e eficaz, complementar aos recursos disponibilizados durante o processo de recuperação para o restabelecimento da mobilidade precoce em UTI's.

Apesar de ser necessário considerar que existe uma diversidade importante de protocolos para a estimulação por ondas elétricas e das técnicas de avaliação serem limitadas às comparações entre os grupos, não existe consenso no que tange à modulação mais acertada, de forma a estimular contrações fortes acompanhadas de um mínimo de fadiga do músculo. Isto posto, as evidências atuais que tratam dos efeitos da estimulação muscular por ondas elétricas em relação ao paciente severamente acometido ainda é limitada, em virtude da escassez de trabalhos publicados sobre o tópico. Assim, sugere-se que novos estudos sejam conduzidos com delineamentos metodológicos específicos e essencialmente em amostras com perfis específicos.

Verificou-se que o tratamento envolvendo a estimulação por ondas elétricas pode ser uma opção a ser considerada em indivíduos com um importante comprometimento funcional, pela sua similaridade com o movimento ativo.

Constatou-se que o procedimento relacionado à estimulação por ondas elétricas parece otimizar a situação física desses sujeitos, tendo uma repercussão positiva em relação à função pulmonar e à capacidade funcional, o que possibilita uma melhor performance física em sujeitos afetados por uma série de disfunções.

Após a avaliação das evidências encontradas, parece ser possível afirmar que a estimulação elétrica neuromuscular é uma metodologia associada a um custo reduzido e de eficácia confiável. A técnica parece ser bem tolerada por muitos pacientes e não provocar efeitos adversos, durante ou mesmo depois de sua aplicação. Um dos maiores diferenciais da técnica é a prontidão de sua utilização, uma vez que não é dependente da cooperação do afetado, sendo usada em UTI's. O músculo quadríceps é um dos músculos mais tratados pela terapia, possivelmente por seu tamanho e posição, o que facilita a aplicação da metodologia, uma vez que o paciente crítico, frequentemente, assume uma posição de decúbito dorsal no leito. Afora isso, também é um músculo diretamente envolvido nas principais tarefas da vida diária, tais como a deambulação e as transferências.

A maior parte dos trabalhos publicados nesta revisão sistemática é favorável à adoção da estimulação elétrica neuromuscular, por ser uma metodologia simples e eficaz, que



resulta em efeitos positivos no ganho de força e volume muscular de sujeitos internados em UTI.

Apesar da escassez de trabalhos que abordam essa temática, se faz necessária a continuidade destas pesquisas, sendo imprescindível a adoção de parâmetros e critérios para os protocolos do tipo de corrente elétrica utilizada, quanto ao método de análise e dos programas de tratamento, incluindo início e término da terapia, duração do tratamento e das sessões, número de sessões semanais e músculos alvo. É importante atentar à investigação dos efeitos da estimulação elétrica neuromuscular depois de recebida a alta hospitalar, bem como seu impacto na qualidade de vida do paciente.

Alguns trabalhos com maior rigor metodológico parecem ser necessários, a fim de estabelecer acerca das modificações morfológicas criadas em músculos depois da estimulação por ondas elétricas, a fim de mensurar a eficácia da metodologia nos mais distintos perfis clínicos de pacientes.

## VI. CONCLUSÕES

A técnica da estimulação muscular por ondas elétricas é utilizada no fortalecimento muscular de sujeitos com intolerância aos treinos ou impossibilitados de cooperar com a movimentação ativa. A estimulação muscular por ondas elétricas usando correntes com média frequência, ao ser comparada com o movimento ativo, parece ativar aproximadamente 30% a 40% mais unidades motoras.

No âmbito comercial, a corrente do tipo russa, a eletroestimulação funcional (FES) e a interferencial parecem ser as mais usadas em protocolos de eletroestimulação. Entretanto, constantemente se busca uma corrente capaz de uma estimulação sensorial confortável sem reduzir os benefícios eletrofisiológicos ou a própria estimulação motora.

O desenvolvimento de uma modelagem para um sistema de eletroestimulação ressaltou a possibilidade de criação de um futuro protótipo capaz de realizar as mesmas funcionalidades de um equipamento profissional, tornando assim, um mercado acessível ao consumidor final. O custo de criação de um protótipo não passaria de R\$ 200,00 (duzentos reais) para um simulador de pulsos utilizando um nível lógico (Arduino) como o principal componente, e R\$ 80,00 (oitenta reais) para criação de um amplificador de sinais. Para fim de estudos não foram elaborados protótipos neste momento da pesquisa, impossibilitando um estudo mais profundo de vantagens e riscos dos mesmos durante seu funcionamento.

Assim, em síntese, o presente estudo analisou as principais vantagens da estimulação por ondas elétricas no processo de reabilitação funcional. Sugere-se, ainda, que outros estudos sejam desenvolvidos para discutir e fortalecer o tema da presente pesquisa, levando-se em consideração a evolução da sociedade e do mercado, bem como os principais autores no segmento de Engenharia Elétrica, com ênfase para as áreas de Medicina e Fisioterapia.

[1] SOUZA, Edson Flavio de, **Efeitos da eletroestimulação neuromuscular em pacientes críticos: uma revisão de literatura**. 2016. 38 f. Monografia (Programa de Aprimoramento Profissional em Fisioterapia Cardio-Respiratória). Secretaria de Estado da Saúde, Departamento de Cirurgia e Anatomia, Hospital das Clínicas, Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2016.

[2] PULLAR, C. E., **The physiology of bioelectricity in development, tissue regeneration and cancer**, CRC press, 2016.

[3] HAYES, Karen W. **Manual de agentes físicos: recursos fisioterapêuticos**. 1. ed. Porto Alegre: Artmed, 2003. 212 p. ISBN-10 8573078871. ISBN-13 978-8573078879.

[4] SANTORO, P. C., **Estimulação Elétrica Neuromuscular e Funcional**, Indaiatuba, São Paulo, Brasil, 2018.

[5] HOGENKAMP, M.; MITTELMEIJER, E.; SMITS, I.; VAN STRALEN, C. **Interferential Therapy B. V.** Delft: Enraf-Nonius, 1987.

[6] WARD, Alex R. **Electrical stimulation using kilohertz-frequency alternating current**. Physical Therapy, v. 89, n. 2, p. 181-190, fev. 2009. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/7a1c/c1b49105833486ac65ac3b7ad6d567273a86.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2019.

[7] ROBERTSON, Valma J.; IOANNOU, Harry. **The effect of duty cycle and frequency on muscle torque production using kilohertz frequency range alternating current**. Medical Engineering & Physics, [s. l.], v. 26, n. 7, p. 569–579, out. 2004. DOI 10.1016/j.medengphy.2004.04.007.

[8] ZANOTTI, Ercole; FELICETTI, Guido; MAINI, Maurizio; FRACCHIA, Claudio. **Peripheral muscle strength training in bed bound patients with COPD receiving mechanical ventilation: effect of electrical stimulation**. Clinical Investigations in Critical Care, CHEST Journal, Glenview, v. 124, n. 1, p. 292-296, jul. 2003. DOI 10.1378/chest.124.1.292. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/ef81/28c390b5554da8db70c3aebb74c996a157e1.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2019.

[9] Alldatashet.com, acesso em 22/1/2020.