

AVANÇOS EM NEUROCIÊNCIA NA GUERRA – Utilização de tecnologias de estimulação cerebral e suas implicações éticas

GUSTAVO LICURSI DE MELO*
Capitão-Tenente

SUMÁRIO

Introdução
Contextualização
Discussão
Conclusão

INTRODUÇÃO

No contexto da guerra, a neurociência apresenta possibilidades de emprego militar com o intuito de aprimorar o desempenho cognitivo e físico de combatentes, tornando-os mais eficientes em operações militares por meio de emergente campo de pesquisa, com o cérebro sendo o objeto de estudo. Uma das tecnologias que

se destaca para este fim é a estimulação cerebral, que pode ser realizada por meio do uso de fármacos ou de equipamentos específicos de estimulação elétrica e magnética. O presente artigo se concentra nas duas últimas formas de estimulação.

Os avanços da aplicação neurocientífica na guerra e o uso de neurotecnologias têm o potencial de oferecer inúmeras vantagens para os militares, incluindo

* Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações pelo Centro Universitário Instituto de Educação Superior de Brasília (Iesb). Especialização em Neurociência e Comportamento pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS) – Escola de Ciências da Saúde e da Vida.

melhorias na vigilância e atenção, na memória, na tomada de decisão, na resolução de problemas e nas habilidades motoras, e também no controle cognitivo e comportamental. Além disso, a estimulação cerebral pode ser utilizada para tratar transtornos mentais, como o Transtorno de Estresse Pós-Traumático (Tept) em soldados que foram expostos a situações de combate, os quais possuem maior risco de desenvolver essa condição.

No entanto o uso de tecnologias de estimulação cerebral na guerra apresenta implicações éticas significativas, tendo em vista que as pesquisas e os estudos para a aplicação militar ainda são limitados. Até o momento da produção deste artigo, uma pesquisa na base de dados PubMed, que reúne registros de artigos de periódicos da base de dados Medline e registros únicos do PubMed, usando os termos *neuroscience* e *national security*, produziu apenas 27 resultados. Este número reflete a necessidade de se expandir o conhecimento sobre a aplicação da neurociência em operações militares e, ao mesmo tempo, de considerar as consequências éticas envolvidas na aplicação de neurotecnologias para uso militar.

No contexto da neuroestimulação, existe a possibilidade de serem utilizadas quatro tecnologias distintas para aplicação nesse campo. A estimulação magnética transcraniana (EMT) utiliza pulsos magnéticos para estimular o cérebro, enquanto a estimulação magnética transcraniana repetitiva (EMTr) é capaz de produzir efeitos de longa duração. Ambas as técnicas são

capazes de modular a atividade cerebral e têm potencial para melhorar o desempenho cognitivo. Por outro lado, a estimulação elétrica transcraniana envolve a aplicação de corrente elétrica para modificar a atividade neural em áreas específicas do cérebro. A intensidade da estimulação elétrica transcraniana deve ser cuidadosamente ajustada de acordo com o propósito do estudo, a fim de evitar efeitos colaterais indesejados. Da mesma forma, a intensidade ideal para a estimulação transcraniana por corrente contínua (ETCC) varia dependendo da tarefa cognitiva específica e de fatores individuais, sendo que intensidades moderadas podem ser mais eficazes do que intensidades mais altas para alcançar o

aprimoramento cognitivo desejado.

Algumas das preocupações atuais sobre o uso da neurotecnologia em ambiente militar e em combatentes giram em torno dos efeitos colaterais e a longo prazo da utilização dessas técnicas de estimulação cerebral

não invasiva, como a EMT ou a ETCC, além de ansios quanto a questões éticas relativas à utilização dessas tecnologias.

Portanto, é fundamental que o desenvolvimento e o uso de tecnologias de estimulação cerebral na guerra sejam guiados por princípios éticos sólidos e estudos com resultados consolidados. É necessário considerar cuidadosamente os possíveis impactos dessas tecnologias no campo de batalha, na vida do combatente e na sociedade em geral e trabalhar para garantir que elas sejam utilizadas de forma segura, responsável e justa, respeitando a integridade, a autonomia e a segurança dos militares.

Avanços científicos da neurociência aplicada à guerra e ao uso de tecnologias de estimulação cerebral têm potencial para aprimorar operações militares

CONTEXTUALIZAÇÃO

Os avanços científicos na área da neurociência aplicada à guerra e ao uso de tecnologias de estimulação cerebral têm potencial para aprimorar as operações militares. Diversos estudos têm investigado a capacidade de aprimoramento do desempenho dos militares, revelando a possibilidade de tornar os combatentes mais eficientes e capacitados para lidar com situações complexas e desafiadoras no campo de batalha. A aplicação de técnicas de estimulação cerebral pode beneficiar a atenção, a memória e a tomada de decisão, resultando em maior precisão nas ações e reações dos militares. Além disso, a tecnologia de estimulação neuromuscular pode ser empregada para melhorar a resistência física e mental, reduzindo a fadiga e permitindo que os militares mantenham-se alertas e produtivos por períodos prolongados.

A aplicação de tecnologias voltadas para aprimorar as funções cognitivas e do sistema nervoso deu origem ao conceito de “neuroaprimoramento”. Este termo se refere ao uso de neurotecnologias para aperfeiçoar o funcionamento cognitivo, emocional ou comportamental, mesmo quando essas funções não são clinicamente comprometidas. O neuroaprimoramento abrange uma variedade de intervenções e tecnologias que têm como propósito melhorar o desempenho humano além das capacidades habituais do indivíduo, ultrapassando os limites do que é considerado *naturalmente fisiológico*. Essa prática desperta tanto promessas quanto preocupações.

Uma pesquisa europeia de atitudes relacionadas à ciência e tecnologia relatou que 56% dos participantes (principalmente pesquisadores e parceiros do setor) aprovaram pesquisas destinadas a melhorar o desempenho humano, com maior consideração positiva pela estimu-

lação elétrica de baixa intensidade (tES) em comparação com os medicamentos para estes mesmos fins. Isso indica que existe interesse no uso de técnicas de estimulação cerebral não invasiva para aprimoramento cognitivo, apesar de ainda não ser uma maioria expressiva.

Dessa forma, é importante levar em consideração as implicações éticas da utilização da neurotecnologia no meio militar, no contexto da aplicação indevida ou excessiva de estimulação cerebral, principalmente quanto aos danos causados ao cérebro, uma vez que os efeitos colaterais e a longo prazo ainda não são completamente compreendidos. Assim como ocorreu na Guerra Fria com a “corrida espacial”, a utilização de neurotecnologia no meio militar pode levar a uma escalada tecnológica entre nações, em que cada país visa desenvolver tecnologias cada vez mais avançadas. Na militarização da neurociência, isso poderia levar a uma “corrida neurotecnológica”. Se a neurotecnologia se tornar uma nova forma de competição militar, pode haver um aumento significativo no desenvolvimento de tecnologias envolvendo o sistema nervoso e o cérebro, principalmente. Em contrapartida, também aumentariam as tensões entre países, levando à busca por tecnologias cada vez mais invasivas e perigosas, elevando significativamente os danos colaterais, tanto físicos quanto psicológicos, para os envolvidos nas pesquisas.

DISCUSSÃO

A utilização de tecnologias de estimulação cerebral na guerra tem sido objeto de discussão em diversos círculos acadêmicos e políticos. Se por um lado essas tecnologias podem ajudar a tornar os militares mais eficientes e capazes de lidar com situações complexas e desafiadoras

em operações militares, por outro, o uso de tecnologias de estimulação cerebral para aprimorar o desempenho humano acima das capacidades habituais do indivíduo ultrapassa os limites éticos e pode levar a consequências imprevisíveis.

A questão ética central é se o uso de neurotecnologias no meio militar é justificado em termos de seus benefícios potenciais e se esses benefícios superam os riscos e as implicações éticas envolvidas. É importante considerar as implicações de longo prazo da utilização de tecnologias de estimulação cerebral no meio militar. Dessa forma, a comunidade científica e as autoridades governamentais devem trabalhar juntas para estabelecer um quadro ético e regulatório para a utilização de tecnologias de estimulação cerebral nesse meio.

Tecnologias de estimulação cerebral

Dois dos métodos modernos de estimulação cerebral não invasiva utilizados para neuroaprimoramento são a estimulação magnética transcraniana repetitiva (EMTr) e a estimulação elétrica transcraniana, os quais diferem na forma como fornecem estimulação. O EMTr usa pulsos magnéticos para estimular o cérebro, enquanto a ETCC usa uma corrente elétrica direta de baixa intensidade.

Atualmente, esses métodos são amplamente utilizados na neurociência cognitiva para estudar e modular o desempenho cerebral em condições patológicas e normais, podendo ser usados para caracterizar as relações causais entre redes cerebrais e comportamentos. A hipótese geral sugere

que a aplicação de estimulação cerebral não invasiva em uma região cerebral específica pode modular as *performances* cognitiva e comportamental subjacentes associadas a essa região.

Estimulação Magnética Transcraniana

O princípio da estimulação magnética transcraniana (EMT) é baseado na Lei da Indução Eletromagnética de Faraday, que permite gerar campos magnéticos por meio da entrega de breves pulsos de corrente em uma bobina posicionada sobre o couro cabeludo do indivíduo (Figura 1, à esquerda). Esse campo magnético transpassa o crânio e produz uma corrente elétrica de baixa intensidade induzida por um campo elétrico, o qual interage diretamente com os axônios no córtex-alvo, estimulando os neurônios no cérebro pela despolarização de axônios mielinizados.

A EMT requer controle preciso do campo magnético e

de sua orientação em relação ao cérebro. A bobina deve ser posicionada sobre a área-alvo do cérebro com precisão submilimétrica, e a intensidade e a duração da estimulação devem ser cuidadosamente calibradas para alcançar o efeito desejado sem causar prejuízos. Os avanços nessa tecnologia levaram ao desenvolvimento de novos protocolos e dispositivos que podem melhorar os resultados do tratamento e reduzir os efeitos colaterais. Por exemplo, alguns dispositivos EMT agora incorporam monitoramento EEG em tempo real para ajustar os parâmetros de estimulação com base no estado do cérebro, enquanto outros usam vários protocolos

A questão central é se o uso de neurotecnologias no meio militar é justificado por seus benefícios e se estes superam riscos e implicações éticas

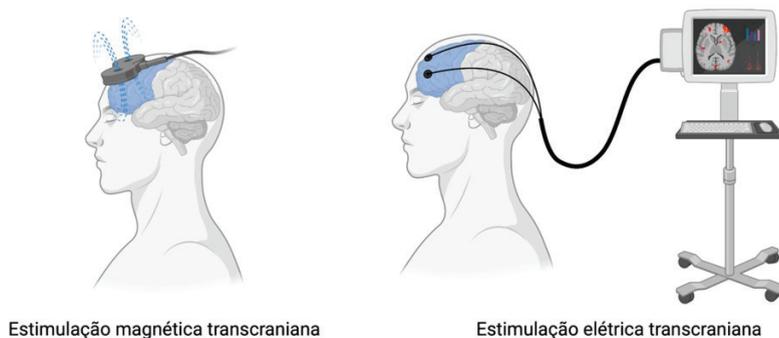


Figura 1 – Representação da aplicação das duas tecnologias de estimulação cerebral não invasiva. À esquerda, a estimulação magnética transcraniana com bobina; à direita, a estimulação elétrica transcraniana com eletrodos

em uma única sessão para aumentar a confiabilidade e a duração dos efeitos.

A estimulação magnética transcraniana repetitiva (EMTr) tem a capacidade de induzir efeitos que persistem após o período de estimulação. Frequências baixas de EMTr (1 Hz) são capazes de diminuir a atividade neural, enquanto frequências mais altas são consideradas capazes de aumentar a atividade da área cerebral-alvo. Além disso, a EMTr pode modular a atividade de regiões cerebrais interconectadas com a área-alvo. Apesar dos mecanismos específicos que levam a essas mudanças ainda não terem sido completamente determinados, acredita-se amplamente que eles reflitam alterações no potencial sináptico por meio da modulação dos estados de despolarização ou hiperpolarização dos neurônios, resultando em mudanças na plasticidade sináptica semelhantes à depressão ou potencialização de longo prazo, necessárias para a neuroplasticidade.

Com o intuito de realizar a neuromodulação, é necessário aplicar pulsos repetitivos de estimulação magnética transcraniana (EMT) em uma região cerebral específica com determinado intervalo de tempo. Cada pulso único de EMT é

gerado a partir de uma corrente elétrica breve (~100-300 μ s) e intensa (~8000 A), que percorre uma bobina, resultando em um campo magnético rapidamente variável. Esse campo magnético, que não sofre atenuação pelo crânio, induz, por sua vez, uma corrente elétrica secundária no cérebro. A intensidade da corrente elétrica induzida pelo EMT diminui proporcionalmente à distância da bobina e pode afetar diretamente as regiões corticais situadas a alguns centímetros abaixo desta, dependendo do tipo de bobina utilizado.

A intensidade ideal para a EMT, visando ao aprimoramento cognitivo, pode variar dependendo de fatores individuais e da função cognitiva específica sendo alvo. No entanto algumas diretrizes gerais podem ser seguidas. Normalmente, a intensidade da EMT é determinada com base no limiar motor do indivíduo, que é a intensidade mínima necessária para provocar uma resposta motora em um músculo-alvo. Para fins de aprimoramento cognitivo, a EMT é frequentemente aplicada com uma intensidade de 80 a 120% do LM do indivíduo.

É crucial considerar que a intensidade ideal para a EMT pode variar, dependendo da idade, da estrutura cerebral e de

outros fatores do indivíduo. Portanto, é recomendado consultar um especialista em EMT para determinar a intensidade mais adequada para suas necessidades e seus objetivos específicos.

Estimulação Elétrica Transcraniana

O princípio da estimulação elétrica transcraniana é bastante diferente da EMTr, pois consiste em aplicar eletrodos diretamente no couro cabeludo do sujeito (Figura 1, à direita). Uma corrente elétrica fraca de corrente contínua transcraniana (ETCC), de corrente contínua oscilatória lenta ou de corrente alternada (ETCA) flui através do cérebro entre os eletrodos de ânodo e cátodo. Esse fluxo de corrente modula a atividade neural nas áreas-alvo e a conectividade dentro de uma rede interconectada. O efeito da ETCC pode durar além do período de estimulação. Sabe-se que o ânodo aumenta a excitabilidade da área alvo, e o cátodo a inibe. Embora os mecanismos exatos subjacentes aos efeitos da ETCC permaneçam desconhecidos, estudos farmacológicos destacaram mudanças no potencial de membrana neuronal em repouso e modificações sinápticas ligadas à atividade glutamatérgica (receptor NMDA) e GABAérgica. Esses achados foram recentemente apoiados em um estudo que utilizou espectroscopia de ressonância magnética para relatar mudanças em GABA e glutamato após a estimulação cerebral não invasiva.

A estimulação elétrica transcraniana (tES) é geralmente considerada indolor, embora possa haver algumas sensações incômodas associadas à aplicação dos eletrodos. Grande parte dos indivíduos submetidos à tES relatam apenas uma sensação leve e indolor de formigamento na área em que os eletrodos são fixados. Todavia, em situações incomuns, podem ocorrer dores de cabeça, desconforto

ou irritação na pele no local em que os eletrodos são aplicados. A intensidade da corrente aplicada na tES pode variar, dependendo do tipo de estimulação utilizada e do objetivo do estudo. Geralmente, a intensidade varia de 0,5 a 2 mA para a ETCC e de 1 a 2 mA para a ETCA, com o tempo variando de cinco a 20 minutos nos estudos mais recentes. É importante ressaltar que a intensidade deve ser cuidadosamente ajustada para evitar efeitos colaterais indesejados.

A intensidade ideal para estimulação transcraniana por corrente contínua (ETCC) para aprimorar as funções cognitivas depende da tarefa específica e de fatores individuais. Constatou-se que uma intensidade moderada com 1 mA/25 cm² de ETCC foi ótima para melhorar o desempenho em uma tarefa de correspondência estímulo-resposta, em comparação com uma dose mais baixa de 0,7 mA/25 cm² ou uma dose mais alta de 2 mA/25 cm². No entanto deve-se considerar que os efeitos da ETCC no aprimoramento cognitivo podem não seguir uma curva dose-resposta linear. Isso significa que intensidades mais altas não necessariamente levam a resultados melhores, e a intensidade ideal pode depender de fatores como diferenças individuais, atividade cerebral e função cognitiva específica sendo alvo.

Efeitos da estimulação cerebral

Por meio de estimulação cerebral não invasiva, como aquelas citadas no tópico anterior, a atividade neuronal em áreas específicas do cérebro pode ser modulada, resultando em aprimoramentos no desempenho cognitivo e motor. Os efeitos desse tipo de estimulação para indivíduos saudáveis variam de acordo com o tipo de técnica utilizada, a área do cérebro estimulada e a duração da estimulação.

Estudos têm indicado que a EMT pode melhorar o desempenho em tarefas que envolvam habilidades motoras, como precisão e velocidade de movimento, além de melhorar a memória e a atenção. Já a estimulação elétrica transcraniana tem sido associada a melhorias em tarefas que envolvem tomada de decisão, memória de trabalho e aprendizado.

No próximo tópico serão abordados estudos que indicam que a estimulação cerebral não invasiva pode melhorar o desempenho de indivíduos saudáveis em tarefas motoras e cognitivas, incluindo atenção, impulsividade, tomada de risco, memória de trabalho e planejamento.

Habilidades motoras

A primeira aplicação da EMT foi no córtex motor humano, localizado no lobo frontal. A maioria desses estudos de estimulação cerebral não invasiva para aprimoramento motor visaram ao córtex motor primário (M1), uma região conhecida por estar envolvida no controle motor e no aprendizado de sequências motoras.

Estudos testaram a capacidade da estimulação cerebral não invasiva em melhorar a precisão das funções motoras em indivíduos saudáveis. Aplicando-se ETCC anódica sobre o córtex motor primário, foi possível aprimorar a precisão do movimento da mão não dominante. Com a aplicação de EMTr ativa sobre a mesma região, foi possível observar uma melhora significativa da precisão do movimento de ambas as mãos. Esses resultados puderam ser observados até 30 minutos após a estimulação.

A estimulação cerebral não invasiva também pode promover força, aceleração e resistência motora, tanto em membros superiores quanto inferiores. A ETCC anódica sobre o córtex motor direito acoplado à ETCC catódica sobre a área

supraorbital esquerda possibilitou aumento da força no movimento da perna. Esses efeitos duraram mais de 60 minutos após o término da sessão de estimulação. Outro estudo explorou os efeitos da ETCC anódica sobre o córtex motor direito acoplado à ETCC catódica sobre o ombro direito na resistência muscular em indivíduos saudáveis, usando um paradigma que exigia contração isométrica submáxima do flexor do cotovelo esquerdo. Eles descobriram que, em comparação com o arranjo oposto dos eletrodos ou condições falsas, a ETCC anódica aumentou significativamente a resistência dos participantes (contração voluntária máxima).

Uma revisão sistemática e a síntese das melhores evidências constataram que a aplicação isolada de uma única sessão de estimulação anódica por corrente contínua transcraniana (ETCC) no cerebelo, no córtex motor primário (M1) e na área motora suplementar pode melhorar o equilíbrio em indivíduos saudáveis. Além disso, há evidências consistentes de que a estimulação catódica por ETCC, a estimulação contínua de rajada theta e a estimulação magnética transcraniana repetitiva não são eficazes no equilíbrio.

Embora a estimulação cerebral não invasiva tenha demonstrado melhorar o desempenho motor e cognitivo em indivíduos saudáveis e tenha o potencial de ajudar os combatentes a acelerar o treinamento, a aquisição de conhecimento e a manutenção, a otimização e o aprimoramento do desempenho, é importante considerar os potenciais riscos e benefícios do uso dessas tecnologias em contextos militares. O uso de estimulação cerebral não invasiva em ambientes militares levanta implicações morais e legais que precisam ser abordadas antes de qualquer implementação.

Esse tipo de aplicação apresenta potenciais benefícios na inibição da fadiga em

militares durante tarefas extenuantes. Os resultados dos estudos têm demonstrado que a estimulação cerebral não invasiva pode promover o aumento da resistência muscular, da aceleração e da força, tanto em membros superiores quanto inferiores. Além disso, a aplicação de técnicas como a ETCC anódica sobre regiões específicas do córtex motor humano tem mostrado melhorias no desempenho motor e na precisão dos movimentos. Esses efeitos podem ser especialmente relevantes em tarefas militares que exigem esforço físico prolongado, contribuindo para a redução da fadiga e, conseqüentemente, para o aumento do desempenho e da eficácia dos militares em situações desafiadoras. No entanto é necessário realizar mais pesquisas para validar e aprofundar o entendimento dos mecanismos subjacentes à inibição da fadiga pela estimulação cerebral não invasiva, bem como avaliar sua eficácia em condições militares reais.

Habilidades atencionais

A atenção é um processo cognitivo central que é amplamente reconhecido como um precursor de uma variedade de outras funções cognitivas. Pode ser caracterizada como a habilidade de direcionar persistentemente os recursos cognitivos para informações relevantes, enquanto simultaneamente filtra ou ignora informações endógenas ou exógenas não salientes. Os processos de atenção abrangem desde a capacidade de responder a estímulos sensoriais específicos até os processos cognitivos superiores de flexibilidade mental, permitindo respostas simultâneas a múltiplas tarefas.

No contexto do aprimoramento da atenção focalizada, habilidade de concentrar o foco atencional em um estímulo específico, diversos estudos têm empregado a ETCC e a rEMT sobre o córtex parietal posterior

(CPP), uma região cerebral de relevância nessa função cognitiva. Por exemplo, uma única sessão de rEMT de baixa frequência aplicada no CPP direito ou esquerdo demonstrou potencial para facilitar a detecção de estímulos apresentados no mesmo lado da estimulação. No entanto observou-se que o mesmo protocolo de rEMT prejudicou a detecção de estímulos apresentados no campo visual oposto ao local estimulado. Além disso, a aplicação de ETCC anódica no CPP direito, em combinação com ETCC catódica sobre o músculo deltoide contralateral, foi capaz de melhorar a atenção em relação a estímulos auditivos apresentados no campo auditivo esquerdo, oposto ao local de estimulação.

No que se refere à atenção seletiva, que é a capacidade de direcionar recursos atencionais para um estímulo específico, apesar da presença de estímulos distratores ou concorrentes, há um foco de estudos no córtex frontal inferior direito (CFId) e no córtex parietal posterior (CPP). A Tarefa de Detecção de Ameaça – *Darwars Ambush!* tem sido utilizada como um cenário de treinamento em pesquisas e simulações para avaliar a capacidade dos indivíduos de detectar e responder a situações de ameaça em um ambiente virtual, originalmente desenvolvida para treinar soldados americanos em seu caminho para o Iraque. Nessa tarefa, os participantes são expostos a alvos ameaçadores e não ameaçadores, escondidos em situações virtuais realistas, como uma bomba camuflada sob um monte de pedras.

Estudos realizados no início da década de 2010 investigaram os efeitos da ETCC no desempenho da Tarefa de Detecção de Ameaça *Darwars Ambush!*. Os participantes que receberam ETCC ativa, com anódica sobre o CFId direito ou o CPP direito e catódica sobre o braço superior contralateral, apresentaram um

desempenho superior em comparação com aqueles que receberam ETCC simulada. Houve maior identificação correta de alvos ameaçadores, redução no número de falsos alarmes e uma curva de aprendizado mais rápida. Além disso, essas melhorias no desempenho foram mantidas por um período de 24 horas após a estimulação. Esses estudos reforçam a associação entre a ETCC, aprimoramento da atenção seletiva e aumento do estado de alerta.

Impulsividade

Estudos envolvendo estimulação cerebral não invasiva demonstram que a EMT pode ser utilizada na modulação do comportamento impulsivo. Tais estudos têm como região-alvo principal o córtex pré-frontal dorsolateral (CPFdl). Os efeitos dessa estimulação foram testados, utilizando-se os efeitos produzidos pela EMT nessa região por meio da tarefa de Desconto de Atraso (*Delay Discounting task*), a qual permite avaliar a preferência dos indivíduos por recompensas menores e imediatas ou por recompensas maiores e adiadas.

Em estudo realizado com indivíduos saudáveis, verificou-se que aqueles que receberam Estimulação Theta Burst contínua (ETBc, técnica de EMT conhecida por diminuir a excitabilidade neural) sobre o CPFdl direito apresentaram uma tendência maior em escolher recompensas maiores e adiadas em comparação aos momentos em que receberam estimulação simulada ou Estimulação Theta Burst intermitente (ETBi) sobre o mesmo local (CHO *et al.*, 2012).

No estudo que investigou o efeito da estimulação transcraniana por corrente contínua (ETCC) sobre o comportamento de direção veicular, foram utilizados ânodos e cátodos aplicados sobre o córtex pré-frontal dorsolateral (CPFdl) esquerdo e

direito. Os participantes foram submetidos a um simulador de direção e tiveram seus comportamentos registrados, incluindo distância em relação ao veículo à frente e velocidade. Os resultados indicaram que os participantes que receberam ETCC anódica nos hemisférios esquerdo e direito apresentaram um comportamento de direção mais cuidadoso e menos impulsivo em comparação com a condição de linha de base.

Esses achados, em conjunto com estudos anteriores sobre a inibição da atenção, sugerem que a EMT pode desempenhar um papel relevante na redução de comportamentos impulsivos. A estimulação direcionada ao CPFdl, por meio de técnicas como ETBc e ETCC anódica, mostrou-se promissora para a modificação desse tipo de comportamento. No entanto é necessário realizar mais investigações para aprofundar o entendimento dos mecanismos subjacentes à modulação do comportamento impulsivo pela ETCC, bem como avaliar sua eficácia em populações clínicas com desregulação do controle impulsivo.

A aplicação da estimulação cerebral não invasiva para modular o comportamento impulsivo em contextos militares pode ter implicações significativas. De acordo com os resultados apresentados, é possível que a EMT possa desempenhar um papel relevante na redução de comportamentos impulsivos, sendo utilizada para aprimorar o controle comportamental, ser útil no treinamento e seleção de pessoal, contribuir para o gerenciamento de riscos e promover resiliência e bem-estar dos militares. No entanto são necessárias mais pesquisas para validar e aprofundar os mecanismos subjacentes à modulação do comportamento impulsivo pela EMT, bem como avaliar sua eficácia em situações de combate que exijam o controle impulsivo por parte dos militares.

Tomada de risco

Os efeitos da ETCC aplicada sobre o CPFdl em indivíduos saudáveis foram explorados na tomada de risco utilizando a tarefa analógica do balão (Balloon Analog Risk Task – Bart). Nessa tarefa, os participantes precisam acumular dinheiro inflando um balão computadorizado, enfrentando o risco crescente de o balão explodir e perder o ganho acumulado.

Utilizando-se da ETCC com ambos os eletrodos sobre o CPFdl, com o ânodo sobre a região direita ou esquerda, acoplado com o cátodo sobre a parte contralateral, foi observado um estilo de resposta mais conservador e avesso ao risco, constatado pela diminuição do número de inflações, o que não foi observado durante a estimulação simulada e a estimulação unilateral ativa, com o ânodo sobre o CPFdl direito ou esquerdo acoplado com cátodo sobre a área supraorbitária contralateral.

A estimulação transcraniana por corrente alternada (ETCA) pode ter o efeito comportamental oposto ao da ETCC na tarefa do balão, aumentando a exposição ao risco em indivíduos saudáveis. Participantes que receberam ETCA anódica em uma frequência de 6,5 Hz sobre o CPFdl esquerdo, acoplada com cátodo sobre o córtex temporal direito, exibiram maior tomada de risco, constatado pelo aumento do número de inflações de balões que não explodiram, em comparação com os participantes que receberam estimulação simulada e aqueles que receberam ETCA anódica sobre o CPFdl direito, acoplada com cátodo sobre o córtex temporal esquerdo.

Os efeitos da estimulação magnética transcraniana na tomada de risco também

foram investigados com a Tarefa de Risco. Nesta tarefa, os participantes precisam escolher entre duas opções que representam diferentes níveis de risco e recompensas. Indivíduos que receberam EMTr aplicada sobre o CPFdl direito exibiram um estilo de tomada de decisão mais arriscado em comparação com aqueles que receberam EMTr sobre o CPFdl esquerdo ou estimulação simulada. A ETCC também pode reduzir a tomada de risco usando a mesma tarefa. Participantes que receberam ETCC, com o ânodo sobre o CPFdl direito acoplado com cátodo sobre o CPFdl esquerdo, exibiram uma redução na tomada de risco e na sensibilidade à recompensa em comparação com os participantes que receberam ETCC simulada. Além disso, os participantes que receberam estimulação

ativa foram mais rápidos em fazer suas escolhas em comparação com os participantes que receberam estimulação simulada. Esses estudos sugerem que, dependendo da

região estimulada, é possível modular comportamentos impulsivos e a tomada de risco, fazendo com que o indivíduo aceite mais, ou menos, os riscos envolvidos.

Os impactos da estimulação transcraniana na tomada de risco em combatentes em um ambiente militar podem ser significativos. Com base nos resultados mencionados, a aplicação adequada dessa técnica poderia influenciar o comportamento dos combatentes, tornando-os mais cautelosos e propensos a adotar estratégias de menor risco durante as operações. Isso poderia resultar em decisões mais ponderadas e uma abordagem mais conservadora diante de situações arriscadas, o que pode ser vantajoso em termos de segurança e eficá-

Os impactos da estimulação transcraniana na tomada de risco em combatentes podem ser significativos

cia nas missões militares. Por outro lado, dependendo das configurações específicas da estimulação transcraniana utilizada, poderia haver um aumento na disposição dos combatentes em assumir riscos, o que, em alguns casos, pode ser desejado em operações específicas. No entanto é importante ressaltar que a aplicação desse tipo de neuroaprimoramento deve ser cuidadosamente avaliada e controlada, levando em consideração os protocolos de segurança e ética, bem como as características individuais dos combatentes e as demandas da missão.

Memória de trabalho

A memória de trabalho, que desempenha um papel crucial no comportamento humano, refere-se à habilidade cognitiva de reter temporariamente informações para a execução de tarefas, envolvendo uma rede cerebral complexa, especialmente a rede fronto-temporal, que inclui o córtex pré-frontal dorsolateral (CPFdl). Para avaliar as capacidades da memória de trabalho, é comumente utilizada a Tarefa de Sternberg. Nessa tarefa, os participantes são solicitados a identificar um item previamente apresentado (seja verbal ou não verbal) entre outros distratores.

Estudos relataram que indivíduos saudáveis apresentaram um desempenho mais rápido na Tarefa de Sternberg quando submetidos à estimulação transcraniana por corrente contínua anódica (ETCC) no CPFdl esquerdo, juntamente à estimulação catódica no CPFdl direito, em comparação com a estimulação simulada. Esses resultados foram posteriormente confirmados em pesquisas que empregaram estimulação magnética transcraniana de alta frequência (EMTr) nos hemisférios CPFdl esquerdo e direito. Observou-se que os participantes apresentaram um desempenho mais rápido

(embora não mais preciso) na tarefa após a aplicação da EMTr ativa em comparação com a EMT simulada.

Além disso, foi observado que a ETCC aplicada no CPFdl esquerdo também melhora a memória de trabalho, conforme medido pela tarefa de sequência de dígitos inversa. Nessa tarefa, os participantes são apresentados a sequências aleatórias de números de 0 a 9, que devem ser repetidos na ordem inversa. Uma abordagem mais próxima da vida cotidiana foi adotada ao adaptar o paradigma de aprendizado de localização de objetos para o estudo da memória de trabalho. Nessa versão adaptada, os participantes devem aprender as posições precisas de edifícios em um mapa de ruas, observando uma série de associações corretas e incorretas entre os edifícios (objetos) e as posições no mapa (localizações).

Resultados indicam que a precisão (ou seja, a porcentagem de recordações corretas de objeto-localização) melhorou quando os participantes receberam ETCC ativa (anódica sobre a junção temporoparietal direita e catódica sobre a área supraorbitária contralateral), em comparação com a ETCC simulada, durante essa tarefa em indivíduos idosos saudáveis (idade média de 62 anos). É interessante notar que esses efeitos foram observados mesmo após uma semana (ou seja, recordação livre atrasada). Esses achados sugerem que a estimulação não invasiva do cérebro pode aprimorar o desempenho da memória de trabalho de curto prazo em indivíduos saudáveis.

Levando em consideração os resultados dos estudos mencionados, é possível discutir algumas considerações teóricas sobre a aplicação da estimulação transcraniana em um contexto militar. A estimulação transcraniana poderia ser utilizada como parte de um programa de treinamento cognitivo para soldados. Por

exemplo, antes de uma missão crítica que exija alta demanda de memória de trabalho, os soldados poderiam receber sessões de ETCC sobre o CPFdl para aumentar temporariamente suas habilidades de memória de trabalho.

A aplicação da estimulação transcraniana também poderia ser combinada com outras estratégias cognitivas e de treinamento, como técnicas mnemônicas e treinamento específico da memória de trabalho. Essa abordagem integrada poderia fortalecer ainda mais os efeitos da estimulação transcraniana e promover melhorias duradouras no desempenho da memória de trabalho dos soldados.

Planejamento

O planejamento é um processo cognitivo que envolve a capacidade de organizar e estruturar ações e comportamentos de forma sequencial e ordenada, com o propósito de alcançar um resultado desejado, o que envolve uma rede cerebral ampla, incluindo o córtex pré-frontal dorsolateral (CPFdl). A Tarefa da Torre de Londres é um paradigma amplamente utilizado na área da psicologia cognitiva para avaliar as habilidades de planejamento e solução de problemas. Nessa tarefa, os participantes devem mentalmente planejar uma sequência de movimentos, a partir de um estado inicial, até alcançar um estado objetivo (fase de pensamento inicial) e, em seguida, executar esses movimentos um por um (fase de execução). Alguns estudos sugerem que a neuroestimulação pode aprimorar as habilidades de planejamento nessa tarefa cognitiva.

Um estudo investigou o efeito da ETCC aplicada no CPFdl esquerdo durante a realização dessa tarefa, utilizando um desenho cruzado. Os participantes apresentaram maior velocidade (com a ETCC catódica) e maior precisão (com a

ETCC anódica) ao completarem o quebra-cabeça (planejamento e execução) em comparação com a estimulação simulada. A precisão foi calculada como o número de soluções corretas dividido pelo número total de tentativas. Um estudo mais recente relatou que a ETBc aplicada no CPFdl esquerdo reduziu o tempo de pré-planejamento (fase de pensamento inicial) sem afetar o desempenho na Tarefa da Torre de Londres, enquanto o ETBi aplicado na mesma área cerebral aumentou a velocidade de execução.

Além disso, esse tipo de estimulação transcraniana também pode reduzir o tempo de reação na resolução de problemas na Tarefa de Raciocínio Analógico. Nessa tarefa, os participantes devem identificar analogias entre dois conjuntos de imagens de formas geométricas coloridas apresentadas simultaneamente. Os participantes foram mais rápidos em detectar analogias quando receberam EMTr no CPFdl esquerdo em comparação com a estimulação no CPFdl direito e a estimulação simulada, sem afetar as taxas de erro.

Esses resultados indicam que a estimulação não invasiva, especialmente direcionada ao CPFdl, também pode ter efeitos positivos no planejamento. No contexto militar, o planejamento estratégico desempenha um papel fundamental nas operações, exigindo a habilidade de dividir comportamentos em etapas para alcançar objetivos específicos. Estudos anteriores demonstraram que o córtex pré-frontal dorsolateral (CPFdl) faz parte da rede cerebral associada ao planejamento. Nesse sentido, a estimulação transcraniana não invasiva (NIBS) tem surgido como uma técnica promissora para aprimorar a capacidade de planejamento em indivíduos saudáveis, e seu potencial pode ser estendido para aplicação no contexto militar.

Essa abordagem pode ser empregada em diversas atividades, como treinamentos prévios, planejamento de campanhas militares, treinamento de líderes e exercícios de treinamento individual. Ao aplicar a estimulação transcraniana nesses contextos, espera-se melhorar a eficiência do planejamento, acelerar a identificação de seqüências de ações e aprimorar a tomada de decisões em situações complexas.

Preocupações éticas

A busca por métodos que melhorem o desempenho humano no campo de batalha não é nova. Ao longo da história, as nações têm procurado maneiras de maximizar as habilidades físicas e mentais dos soldados para obter vantagem estratégica. A utilização de técnicas de estimulação cerebral não invasiva surge, então, como uma potencial ferramenta para maximizar o desempenho cognitivo e motor dos combatentes.

No entanto neuroaprimoramentos lidam com o cérebro humano, provavelmente o sistema biológico mais complexo e menos compreendido, com implicações para a identidade moral e pessoal, e, assim, apresentam riscos, tanto médicos quanto metafísicos. Apesar dos possíveis benefícios em termos de aumento de atenção, memória, tomada de decisão e habilidades motoras, a aplicação da estimulação cerebral no contexto militar também desperta preocupações éticas significativas.

Uma das preocupações éticas diz respeito às limitações fisiológicas e cognitivas do aprimoramento cerebral. Embora a estimulação cerebral não invasiva possa oferecer melhorias temporárias no desem-

penho cognitivo e motor, há limitações inerentes ao funcionamento do cérebro humano. O aprimoramento proporcionado por essa técnica pode ser limitado em termos de alcance e magnitude. Além disso, existem diferenças individuais na resposta à estimulação cerebral, o que significa que alguns indivíduos apresentariam resultados diferentes dos esperados.

Outra limitação ética importante a ser considerada é a possibilidade de efeitos colaterais adversos da estimulação cerebral. Embora a segurança dessa técnica tenha sido relatada em diversos estudos, ainda há incertezas em relação aos potenciais efeitos a longo prazo, bem como aos efeitos adversos individuais imprevisíveis. A exposição prolongada a cor-

rentes elétricas ou campos magnéticos pode afetar negativamente a saúde e a integridade do cérebro, o que levanta preocupações sobre a segurança e o bem-estar dos indivíduos submetidos a essa tecnologia,

especialmente em um contexto militar.

Adicionalmente, a possibilidade de utilização da estimulação cerebral não invasiva para fins coercitivos ou manipulativos é outro fator preocupante. Se essa tecnologia for aplicada sem o consentimento informado e livre dos indivíduos, poderia ser usada para modificar e controlar o comportamento dos soldados, violando sua autonomia e dignidade. Além disso, a capacidade de aumentar seletivamente certas habilidades cognitivas e motoras poderia ser explorada para fins de dominação militar, desequilibrando as relações de poder entre nações ou mesmo entre civis e militares.

As nações têm procurado maneiras de maximizar as habilidades físicas e mentais dos soldados para obter vantagem estratégica

Limitações fisiológicas e cognitivas do aprimoramento cerebral

As limitações fisiológicas e cognitivas do aprimoramento cerebral são importantes considerações éticas no contexto da estimulação cerebral não invasiva. Embora essa técnica possa oferecer melhorias temporárias no desempenho cognitivo e motor, existem limitações inerentes ao funcionamento do cérebro humano que precisam ser levadas em consideração.

Primeiramente, é importante reconhecer que o cérebro humano é extremamente complexo e ainda não completamente compreendido. Embora a estimulação cerebral possa proporcionar benefícios em termos de aumento de atenção, memória, tomada de decisão e habilidades motoras, seu potencial de aprimoramento é limitado em termos de alcance e magnitude. Isso significa que não se pode esperar que essa técnica transforme um indivíduo em um super-humano, com habilidades excepcionais muito além do que é considerado normal ou típico para a capacidade humana.

Além disso, é importante considerar as diferenças individuais na resposta à estimulação cerebral. Cada pessoa possui um cérebro único e pode responder de maneira diferente à estimulação. Isso implica que nem todos os indivíduos podem se beneficiar igualmente dos resultados esperados por ocasião da aplicação dessas técnicas de estimulação cerebral. Essas diferenças individuais podem ser influenciadas por fatores genéticos, idade, saúde mental e outros aspectos da biologia e experiência pessoais.

Dessa forma, é crucial ter expectativas realistas sobre os limites do aprimoramento cognitivo e motor. Embora a técnica possa proporcionar melhorias significativas em certas áreas psicológicas e comportamentais, não se pode esperar que ela seja capaz de superar completamente as

limitações inerentes ao funcionamento individual do cérebro de cada indivíduo.

Efeitos colaterais adversos

Outro aspecto importante a ser considerado são os potenciais efeitos colaterais adversos relativos à exposição prolongada às técnicas de estimulação elétrica ou magnética do cérebro. Embora essas técnicas tenham sido estudadas em termos de segurança, ainda existem incertezas sobre os efeitos a longo prazo e os efeitos adversos individuais imprevisíveis, principalmente no que se refere à utilização em pessoas saudáveis.

A exposição prolongada a correntes elétricas ou a campos magnéticos utilizados na estimulação cerebral pode ter impactos negativos na saúde e na integridade do cérebro. Embora sejam necessários mais estudos para entender completamente esses efeitos, existe a preocupação de que a estimulação cerebral repetida ou intensa possa causar danos ou efeitos indesejados, ou mesmo irreversíveis, no cérebro, quando utilizada por longos períodos.

Não obstante, os efeitos colaterais podem variar de pessoa para pessoa. Enquanto alguns indivíduos podem não experimentar efeitos adversos significativos, outros poderiam desenvolver sintomas indesejados, como dores de cabeça, tontura, náusea, confusão mental ou desconforto extremo durante ou após a estimulação. Esses efeitos colaterais individuais imprevisíveis podem afetar a aceitabilidade e a segurança da técnica, especialmente em um contexto militar, em que a saúde e o bem-estar dos soldados são prioridades.

Portanto, é fundamental realizar mais pesquisas com este intuito, a fim de avaliar cuidadosamente os potenciais efeitos colaterais da estimulação cerebral

não invasiva, por meio da utilização de correntes elétricas e campos magnéticos, e certificar-se de que a segurança dos indivíduos submetidos a essa técnica seja adequadamente monitorada, objetivando garantir e proteger a integridade física e mental do combatente.

Coerção e manipulação

A possibilidade de utilização da estimulação cerebral para fins coercitivos ou manipulativos é uma preocupação ética significativa. Caso essa tecnologia seja utilizada sem o consentimento livre e informado das pessoas, poderia ser empregada para alterar e manipular até mesmo o comportamento dos soldados, infringindo sua autonomia e até mesmo sua dignidade.

A capacidade de aumentar seletivamente certas habilidades cognitivas e motoras poderia ser explorada para fins de dominação militar. Isso poderia desequilibrar as relações de poder entre nações e gerar preocupações sobre a justiça e a igualdade no campo de batalha. O uso não ético da tecnologia poderia levar a uma situação em que alguns soldados têm acesso a aprimoramentos cognitivos e motores, enquanto outros não, resultando em uma desigualdade injusta. Todavia é importante observar que este aspecto não se restringe exclusivamente à capacidade tecnológica, mas também à utilização ética dessa capacidade, respeitando os parâmetros normativos estabelecidos para esse propósito.

É essencial garantir que a utilização da estimulação cerebral não invasiva seja baseada em princípios éticos sólidos, como o consentimento informado, a privacidade e a equidade. Os protocolos de pesquisa e aplicação devem ser estabelecidos de forma transparente e ética, garantindo que os indivíduos sejam informados dos riscos e benefícios envolvidos e tenham

a liberdade de consentir ou recusar participar dos procedimentos.

A regulamentação adequada também desempenha um papel importante na prevenção de abusos. Leis e diretrizes devem ser estabelecidas para garantir que a estimulação cerebral não invasiva seja utilizada de maneira ética e responsável, protegendo os direitos e o bem-estar dos militares envolvidos.

Elaboração de normas éticas

A aplicação da estimulação cerebral não invasiva no âmbito militar levanta a necessidade de estabelecer normas éticas adequadas para orientar seu uso responsável e garantir a proteção dos direitos e do bem-estar dos indivíduos envolvidos. Essas normas éticas são essenciais para evitar abusos, minimizar riscos e promover a equidade na utilização dessa tecnologia. Neste tópico, abordaremos a importância e os principais aspectos das normas éticas para a aplicação da estimulação cerebral não invasiva no contexto militar.

Uma das razões fundamentais para a elaboração de normas éticas específicas é a natureza única e potencialmente invasiva da estimulação cerebral não invasiva. Essa técnica envolve a manipulação direta do cérebro humano, o órgão mais complexo e sensível do corpo humano. Portanto, é essencial estabelecer diretrizes claras que garantam a segurança e a saúde dos indivíduos submetidos a essa tecnologia. As normas devem definir protocolos de segurança, procedimentos de monitoramento e avaliação dos riscos, a fim de minimizar e mitigar possíveis efeitos colaterais adversos.

Além disso, as normas éticas devem abordar a questão do consentimento informado e livre dos indivíduos. A estimulação cerebral não invasiva é uma intervenção que afeta diretamente o

funcionamento do cérebro e, portanto, é crucial garantir que os indivíduos estejam plenamente informados sobre os procedimentos, riscos e benefícios envolvidos. O consentimento informado deve ser obtido de maneira transparente, assegurando que as pessoas tenham autonomia e liberdade de decisão. Além disso, deve-se levar em consideração a possibilidade de coerção ou pressão indevida sobre os indivíduos, especialmente em um contexto militar hierárquico, garantindo que o consentimento seja genuíno e voluntário.

Outro aspecto importante das normas éticas é a equidade e a justiça no acesso e na utilização da estimulação cerebral não invasiva. É necessário evitar disparidades injustas que possam surgir se essa tecnologia estiver disponível apenas para uma elite militar, agravando ainda mais as desigualdades sociais. As normas devem garantir que a distribuição e o acesso aos aprimoramentos cognitivos e motores proporcionados pela estimulação cerebral não invasiva sejam equitativos e estejam em conformidade com princípios de justiça distributiva. Isso pode envolver a implementação de políticas de democratização do acesso à tecnologia ou o estabelecimento de critérios claros e transparentes para sua aplicação.

Ademais, as normas éticas devem abordar questões relacionadas à responsabilidade e à transparência. Deve-se estabelecer uma prestação de contas clara e definir a responsabilidade dos profissionais envolvidos na aplicação da estimu-

lação cerebral não invasiva. Além disso, é importante garantir a transparência em relação a procedimentos, resultados e possíveis efeitos colaterais, promovendo a divulgação e o compartilhamento de conhecimento científico nesse campo.

Por fim, a elaboração de normas éticas para a aplicação da estimulação cerebral não invasiva no contexto militar deve ser um esforço colaborativo e multidisciplinar. A participação de especialistas em ética, neurociência, direito, medicina e militares é essencial para considerar todas as perspectivas relevantes e garantir uma abordagem abrangente. Essas normas devem ser dinâmicas e atualizadas à medida

que o conhecimento científico avança e os novos desafios éticos surgem.

CONCLUSÃO

A aplicação da neurociência e das tecnologias de estimulação cerebral no âmbito militar é um campo de estudo que apresenta perspectivas pro-

missoras, considerando os potenciais benefícios para os combatentes, ao mesmo tempo em que suscita questões éticas relevantes. Os avanços científicos nesse domínio possuem a capacidade de aprimorar tanto o desempenho cognitivo quanto o físico dos militares, conferindo-lhes maior eficácia em operações militares de natureza complexa.

O neuroaprimoramento, como conceito emergente, possibilita o aprimoramento das funções cognitivas e comportamentais além dos limites naturais do indivíduo. Isso desperta tanto promessas quanto

**Regulamentações
são fundamentais
para assegurar que a
neurotecnologia aplicada
no meio militar obedeça a
princípios éticos, garantindo
a proteção de indivíduos e
a segurança global**

preocupações, e é fundamental considerar cuidadosamente os impactos dessas tecnologias no campo de batalha, na vida dos combatentes e na sociedade em geral.

Embora as técnicas de estimulação cerebral não invasiva, como a estimulação magnética transcraniana e a estimulação elétrica transcraniana, tenham demonstrado potencial para melhorar o desempenho cognitivo, existem preocupações sobre os efeitos colaterais e a longo prazo dessas intervenções. Além disso, o desenvolvimento e o uso dessas tecnologias devem ser pautados por princípios éticos sólidos, garantindo a segurança, a responsabilidade e o respeito à integridade e à autonomia dos militares.

Ainda há uma necessidade de expandir o conhecimento científico sobre a aplicação da neurociência em operações militares, bem como de aprofundar a discussão sobre as consequências éticas dessa prática. A escassez de pesquisas

nessa área destaca a importância de investir em estudos e resultados consolidados para embasar decisões e regulamentações.

É essencial evitar uma “corrida neurotecnológica” no meio militar, na qual as nações competem pelo desenvolvimento de tecnologias cada vez mais invasivas e perigosas. Em vez disso, deve-se buscar um equilíbrio entre o avanço científico e o respeito pelos princípios éticos, garantindo que as tecnologias de estimulação cerebral sejam utilizadas de forma segura, responsável e justa, visando ao benefício dos militares sem comprometer sua integridade física e mental.

No cenário atual, a discussão e o estabelecimento de regulamentações adequadas são fundamentais para assegurar que a aplicação da neurotecnologia no meio militar seja guiada por princípios éticos sólidos e baseada em pesquisas confiáveis, garantindo a proteção dos indivíduos envolvidos e a segurança global.

📁 CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:
 <CIÊNCIA E TECNOLOGIA>; Tecnologia; Pesquisa;
 <GUERRA>; Guerra;
 <SAÚDE>; Efeito de Guerra; Estresse; Medicina; Pesquisa;
 <VALORES>; Ética;

REFERÊNCIAS

Devido à extensão da lista de Referências Bibliográficas, os interessados em obtê-la podem entrar em contato pelo *email*: licursi@marinha.mil.br.