

DESAFIOS NA IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA DIRIGIDA EM PLATAFORMAS MARÍTIMAS

Challenges in implementing directed-energy systems on maritime platforms

paulo Jorge Duda de Moraes¹ , Davi Pontes Nacaratti² , Rubens Cavalcante da Silva² 

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise integrada sobre a utilização de plataformas marítimas para acomodação de sistemas de energia dirigida baseados em *lasers* de alta potência. São discutidos aspectos da propagação atmosférica, efeitos físicos limitantes, como turbulência, cintilação e *thermal blooming*, além dos requisitos de infraestrutura elétrica e térmica necessários à integração segura e eficaz desses sistemas. O estudo abordou também o dimensionamento de módulos ópticos e de potência e a previsão dos custos envolvidos na operação, avaliando *inputs* como sistemas de arrefecimento e estabilização de tiro e *outputs* relacionados à entrega de energia dirigida à velocidade da luz, sem os efeitos colaterais típicos de armamentos convencionais.

Palavras-chave: Energia dirigida. Plataformas marítimas. Propagação atmosférica. Dimensionamento de sistemas. Previsão de custos.

Abstract: This work presents an integrated analysis of the use of maritime platforms to host directed-energy systems based on high-power lasers. It discusses aspects of atmospheric propagation, limiting physical effects such as turbulence, scintillation, and thermal blooming, as well as the electrical and thermal infrastructure requirements for the safe and effective integration of such systems. The study also addresses the sizing of optical and power modules and the projection of operational costs, evaluating inputs such as cooling and fire-control stabilization systems, and outputs related to the delivery of directed energy at the speed of light, without the collateral side effects typical of conventional weapons.

Keywords: Directed energy. Maritime platforms. Atmospheric propagation. System sizing. Cost forecasting.

1. Centro de Coordenação de Estudos da Marinha em São Paulo, São Paulo, SP - Brasil.

2. Centro Tecnológico da Marinha no Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ - Brasil.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de tecnologias de energia dirigida (*directed energy weapons* – DEW), em especial os *lasers* de alta potência (*high-energy laser* – HEL), transformou-se em uma das fronteiras mais promissoras da pesquisa contemporânea em ciência e defesa. Em plataformas marítimas, tais sistemas encontram um campo singular de aplicação, tanto pela posição estratégica que o mar oferece quanto pela disponibilidade de infraestrutura capaz de sustentar experimentos e protótipos em larga escala.

Os *lasers* de alta potência oferecem vantagens táticas significativas em combate, principalmente relacionadas à velocidade e à eficácia contra ameaças aéreas. O feixe de um *laser* atinge o alvo quase instantaneamente, o que elimina a necessidade de calcular trajetórias complexas de interceptação exigidas por mísseis. Uma vez focado, o *laser* pode causar danos incapacitantes em segundos e, após neutralizar uma ameaça, pode ser redirecionado para um novo alvo quase imediatamente. Essa capacidade de resposta rápida é complementada pela habilidade de acompanhar e manter o feixe em mísseis que realizam manobras radicais, superando potencialmente as capacidades dos sistemas de defesa antiaérea convencionais (O’rouke, 2024).

Além da sua letalidade e velocidade, os DEWs destacam-se pela precisão e flexibilidade de emprego, permitindo uma escalada de força controlada. Por serem armas de engajamento de precisão, o *laser* afeta exclusivamente o local que atinge, evitando danos colaterais a objetos próximos. Essa característica amplia o leque de respostas graduais, que vão além da destruição. O sistema pode ser utilizado para detectar e monitorar alvos ou para aplicar efeitos não letais, como o bloqueio reversível de sensores eletro-ópticos. Dessa forma, o operador pode emitir advertências, causar danos limitados ou, por fim, infligir danos incapacitantes, adaptando a resposta à natureza da ameaça.

Entre as aplicações dos *lasers* de alta potência, destaca-se a recarga remota de baterias, na qual o aumento da potência é condição essencial para a viabilidade tecnológica e cuja demanda cresce de forma exponencial. Pesquisas nessa área têm se intensificado, especialmente no contexto de *drones* com operação contínua, conforme evidenciado por Choi *et al.* (2016) e Jaafar e Yanikomeroglu (2021). Para tornar essa tecnologia aplicável, é necessário não apenas ampliar a potência disponível, mas também aumentar a distância entre a fonte

emissora e o receptor. Nesse cenário, o estudo dos fenômenos associados à interação fluido-laser, bem como suas correções por óptica adaptativa, torna-se fundamental para viabilizar sua implementação prática.

Apesar de seu potencial, a eficácia dos DEWs em ambiente naval é condicionada por limitações físicas e ambientais inerentes à tecnologia. A principal delas é a exigência de linha de visada direta, o que impede o engajamento de alvos além do horizonte ou ocultos por ondas. Além disso, a propagação do feixe é severamente impactada por condições atmosféricas, como vapor d’água, fumaça e outras partículas que absorvem ou refletem a luz, enquanto a turbulência pode desfocar o feixe, reduzindo seu alcance efetivo e impedindo a operação em condições de chuva ou neblina. O disparo contínuo do *laser* também pode aquecer o ar em sua trajetória, efeito conhecido como *thermal blooming*, que diminui sua eficácia, especialmente contra alvos em aproximação direta (O’rouke, 2015).

Do ponto de vista tático e operacional, a implementação de *lasers* embarcados enfrenta desafios adicionais relacionados à saturação, contramedidas e segurança. Como um *laser* só pode engajar um alvo por vez, sua capacidade de neutralizar ataques de saturação com múltiplos alvos simultâneos é limitada. A eficácia contra alvos individuais também pode ser comprometida por contramedidas como blindagens, superfícies refletivas ou agentes de ocultação. Por fim, existem riscos significativos de danos colaterais, pois o feixe pode se propagar no espaço, ameaçando aeronaves e satélites, e a luz do *laser* pode causar danos permanentes à visão humana a distâncias muito maiores que o alcance efetivo da arma.

A inserção dessas tecnologias no ambiente naval traz consigo desafios de natureza física, operacional e logística, envolvendo desde a propagação do feixe *laser* em condições atmosféricas adversas até a integração de módulos de alta potência com sistemas de suporte, refrigeração e estabilidade de plataforma (Sprangle *et al.*, 2015; Peñano *et al.*, 2009; Nelson, 2016).

A literatura científica consolidou avanços significativos sobre os mecanismos de propagação atmosférica de feixes de *laser* de alta energia, identificando fatores como turbulência, absorção molecular e interferência por aerossóis como determinantes na eficiência de transmissão a longas distâncias. Estudos demonstram que, mesmo em janelas espectrais favoráveis, a interação entre aerossóis marítimos e feixes intensos pode gerar *thermal blooming* e dispersão, limitando a potência efetivamente entregue ao alvo (Sprangle, 2009).

Uma alternativa encontrada, dada a complexidade do sistema e os diversos componentes ambientais e tecnológicos que promovem interferência na propagação da energia dirigida, consiste na obtenção de soluções computacionais capazes de representar a propagação do feixe. Modelos computacionais são capazes de representar a absorção do meio, o desfocamento do laser e os efeitos não lineares deletérios (Morrill, 2018). A implementação desses modelos computacionais possibilita a análise isolada ou conjunta dos efeitos que degradam a entrega de potência.

A introdução desses sistemas nos meios navais representa um dos maiores desafios da engenharia naval contemporânea. Diferentemente das armas cinéticas, os *lasers* de alta potência impõem demandas severas a infraestruturas já sobrecarregadas, como a geração de energia e o gerenciamento térmico. A baixa eficiência dos *lasers*, em torno 45%, implica que parcela substancial da energia é convertida em calor, o qual precisa ser continuamente removido. Além disso, a eficácia da arma depende de integração profunda com os sistemas de combate do navio para o controle preciso do feixe, superando vibrações e turbulência atmosférica. Em suma, a implementação de DEWs exige abordagem multidisciplinar que abrange energia, refrigeração, controle tático e segurança operacional.

Para quantificar esses desafios, o presente trabalho analisa os requisitos de implementação de um sistema DEW a laser de 60 kW, similar ao instalado no USS Preble pela Marinha dos Estados Unidos da América (EUA). A análise detalha as estimativas de potência, volume, peso e custo (*Size, Weight, Power, and Cost – SWaP-C*) dos subsistemas essenciais, utilizando como base componentes comerciais, como os módulos de *laser* da IPG Photonics e sistemas de refrigeração com água gelada em malha fechada. Ao decompor o sistema em seus principais componentes — incluindo módulos ópticos, *chiller*, sistema de controle e possível gerador dedicado — o estudo estabelece base concreta para avaliar o impacto real da integração dessa tecnologia em uma plataforma naval, servindo como estudo de caso para futuras implementações (Marin, 2022).

2. OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é discutir a utilização de plataformas marítimas como base para a integração de sistemas de energia dirigida de alta potência, abordando:

- efeitos atmosféricos críticos na propagação do feixe;
- requisitos de energia e refrigeração compatíveis com plataformas marítimas;
- dimensionamento integrado de *inputs* (energia, refrigeração, estabilização) e *outputs* (energia dirigida no alvo).

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho fundamenta-se em três eixos principais: a formulação teórica da propagação de feixes de *laser*, a análise dos mecanismos de interação com a atmosfera que acarretam perda de energia e o dimensionamento dos requisitos necessários para a integração do sistema em plataformas marítimas.

3.1. EFEITOS DE INTERAÇÃO COM A ATMOSFERA

A literatura aponta que a interação com a atmosfera pode reduzir de forma significativa a eficiência de transmissão a longas distâncias. A análise metodológica expressa essas perdas em termos percentuais da potência entregue ao receptor, possibilitando comparar o desempenho sem correção e com técnicas de mitigação. A propagação de feixes de HEL na atmosfera foi analisada a partir da equação paraxial da onda:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \frac{i}{2k} \nabla_{\perp}^2 A - \frac{1}{2} \alpha A + i k n_2 |A|^2 A \quad (1)$$

onde $A(x, y, z)$ é a envoltória do campo, $k = 2\pi/\lambda$ é o número de onda, α é o coeficiente de absorção e n_2 é o coeficiente não linear associado ao *thermal blooming* e à cintilação.

A Equação 1 trata-se de uma equação diferencial parcial não linear, a qual deve ser interpretada como as alterações da amplitude A ao longo do eixo axial z , que promovem:

- um achatamento dessa amplitude, representado pelo primeiro termo à direita da igualdade;
- uma perda de potência devido à absorção do meio, correspondente ao segundo termo à direita da igualdade;
- e, por fim, o terceiro termo à direita da igualdade representa os fenômenos de alteração de amplitude decorrentes da variação da temperatura do meio, que modifica o índice de refração, como ocorre no *thermal blooming* e na cintilação.

O efeito conhecido como *thermal blooming*, para o qual já existem simulações desenvolvidas (De Moraes *et al.*, 2022), ocorre quando um feixe de *laser* se propaga através de um meio absorvente, de modo que ocorrem mudanças nos campos de temperatura e densidade do ar nas proximidades do feixe de HEL, (De Moraes *et al.*, 2022). Essa mudança de temperatura induz uma variação no índice de refração n , com isso, há perda de foco do feixe de laser (Smith, 1977). A Figura 1 apresenta um modelo esquemático do que esse efeito acarreta tanto na trajetória quanto no foco do laser.

A importância de compreender esse efeito aumentou desde que a potência dos *lasers* se tornou suficientemente alta para aquecer o meio. Como consequência, as pesquisas sobre esse fenômeno têm crescido de forma linear (Perry *et al.*, 1999; Sentoku *et al.*, 2000; Carroll, 2011; Su *et al.*, 2023).

A propagação de feixes de HEL descrita a partir da equação paraxial da onda (Equação 1) permite identificar como a difração, a absorção molecular e os termos não lineares, como o *thermal blooming* e a cintilação, afetam a distribuição de energia ao longo da trajetória do feixe.

Quanto ao fenômeno da cintilação, inerente à propagação do feixe de laser na atmosfera, este é ocasionado por flutuações de temperatura do meio de propagação. Trata-se de um fenômeno de caráter deletério; no entanto, existem técnicas para sua correção por meio da utilização de espelhos deformáveis, células de Bragg, entre outras (Hardy, 1978; Roggemann; Lee, 1998).

Neste artigo, são apresentadas as soluções numéricas calculadas teoricamente para um laser de alta potência que incorporam as interações dos efeitos aerodinâmicos e do eletromagnetismo. O *solver* desenvolvido consiste no conjunto das equações de *Navier-Stokes* e da equação paraxial (Sprangle; Peñano; Hafizi, 2006; Peñano; Sprangle; Hafizi, 2006), acopladas a uma distribuição de flutuações de temperatura (Smith, 1977; Hardin; Johnston; Lane, 1999; Strasburg; Harper, 2004;

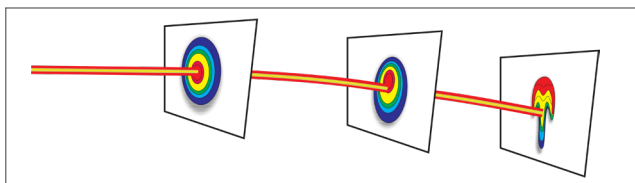


Figura 1. Modelo esquemático da propagação de um feixe de energia dirigida com o efeito *thermal blooming* acentuado.

Sriam; Kearney, 2007; Beghi; Cenedese; Masiero, 2008), decomposta em uma base ponderada no domínio espectral, baseada na teoria de Kolmogorov (Kolmogorov, 1991). A propagação do feixe de *laser* na direção axial foi descrita utilizando o *split step fourier method* (Arsenović; Dimitrijević; Jelenković, 2019), com emprego do algoritmo da transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform – FFT) (Frigo; Johnson, 1998). O modelo deste trabalho baseou-se na suposição de que o raio *laser* é a única fonte de energia no ambiente, sendo suficientemente intenso para que outras interferências possam ser desprezadas. No entanto, essa potência não possui capacidade de alterar as propriedades do meio em nível molecular.

Para exemplificar a forma como a evolução será apresentada neste trabalho, apresenta-se a Figura 2. O modelo esquemático demonstra os efeitos esperados com o aumento da robustez do modelo. A Figura 2A apresenta a evolução do laser no espaço sem interação com a atmosfera. Espera-se que a propagação de um feixe com perfil gaussiano, nesse regime, apresente como característica o achatamento do pico de intensidade e o conseqüente alargamento da distribuição transversal, conforme ilustrado nas Figuras 2B e 2C. Apesar dessa modificação no formato espacial, a energia total do feixe é conservada radialmente.

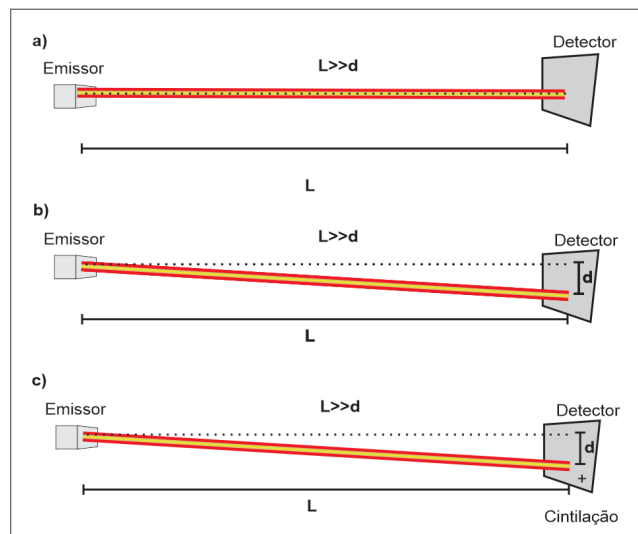


Figura 2. Modelo esquemático para propagação de um feixe de *laser* na atmosfera. L é a distância entre o emissor e o detector e d é a distância entre o ponto de maior intensidade do *laser* e o eixo axial. a) Sem interação do feixe de *laser* com o meio de propagação. b) Com interação do feixe de *laser* com o meio de propagação. c) Com a interação do feixe de *laser* com o meio de propagação, considerando os fenômenos estocásticos (De Moraes, 2023).

Portanto, se for realizada a integração transversal do feixe de *laser*, o resultado será o mesmo ao longo do eixo axial. Ou seja, há redução da densidade de energia do laser ao se propagar.

3.2. CORREÇÃO POR ÓPTICA ADAPTATIVA

A óptica adaptativa é incorporada à modelagem como técnica capaz de compensar, em tempo real, as alterações introduzidas pela atmosfera. O procedimento de correção consiste na utilização de sensores de frente de onda, capazes de obter as distorções do feixe; para a correção propriamente dita, são empregados equipamentos de óptica adaptativa, como espelhos deformáveis, capazes de introduzir a fase conjugada necessária para restaurar a colimação. O controle em malha fechada desses sensores e atuadores permite recuperar parcela significativa da energia degradada e aumentar a fração efetivamente entregue ao alvo nos diversos ambientes de operação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ANÁLISE TEÓRICA DA PROPAGAÇÃO DO FEIXE

A título de exemplificação, a Figura 3 apresenta a evolução temporal da solução da Equação 1. Para esta simulação,

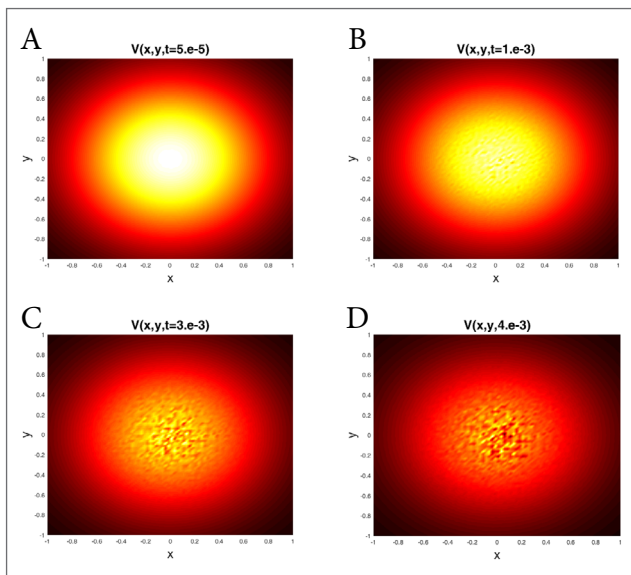


Figure 3. Evolução ao longo do eixo axial da amplitude $A(x,y)$, equação (1), com o fenômeno de cintilação (De Moraes, 2023).

considerou-se que o meio apresentava uma absorção $\alpha = 10^{-8} \text{ km}^2/\text{J}$, sendo os efeitos decorrentes da propagação da energia dirigida em um ambiente com cintilação. A potência nominal do laser é de $P = 31,3 \text{ [kW/cm}^2\text{]}$, e o meio apresenta temperatura ambiente de $T = 27^\circ\text{C}$. Observa-se que a inclusão do efeito de cintilação na evolução temporal promove, na solução, à medida que o feixe se propaga, aumento de pontos escuros. Tal fenômeno decorre de alterações no índice de refração do meio, promovidas por flutuações de temperatura.

Portanto, dada a possibilidade de obtenção da resposta da evolução da energia dirigida em sua interação com o meio de propagação, é possível antever esses efeitos deletérios e corrigi-los por meio de sensores e atuadores, via técnicas de óptica adaptativa.

4.2. CORREÇÃO E RECUPERAÇÃO COM ÓPTICA ADAPTATIVA

A mesma formulação teórica que descreve os efeitos deletérios também fornece a base para sua correção. Técnicas de óptica adaptativa compensam, em tempo real, as aberrações atmosféricas, atuando sobre a fase do feixe. Com isso, é possível recuperar de 60 a 80% da potência degradada em decorrência dos efeitos não lineares da propagação (Nelson, 2016). A Figura 4 apresenta um modelo esquemático do processo de correção da frente de onda. De forma geral, é necessário um sensor capaz de medir as distorções introduzidas na propagação atmosférica do feixe. Essas informações são enviadas a um sistema de controle, que as traduz em comandos para os atuadores do espelho deformável. Esse tipo de espelho possui a capacidade de ajustar, em tempo real, a superfície refletora em diversos segmentos, compensando as aberrações ópticas e preservando a qualidade do feixe.

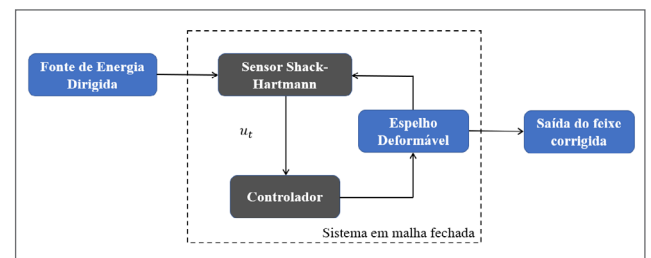


Figure 4. Fluxograma: a frente de onda é medida pelo Sensor, processada pelo Controlador, corrigida pelo Espelho Deformável e realimentada ao Sensor.

O desempenho da correção está diretamente relacionado à robustez do sistema de controle, que pode variar desde estratégias mais simples, como o controle proporcional, até abordagens mais avançadas, como o controle preditivo, no qual parâmetros atmosféricos são incorporados ao modelo de atuação. Além disso, a arquitetura de correção pode evoluir de um único espelho deformável para uma configuração composta por múltiplos espelhos, ampliando significativamente a capacidade de compensação das perturbações da frente de onda.

Assim, sendo possível estimar quais componentes são necessários para a propagação e correção da energia dirigida, resta determinar quais sistemas são necessários para alimentar esses componentes, bem como dimensionar, em termos físicos e orçamentários, a implementação desse sistema.

4.3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ENERGIA DIRIGIDA

A introdução de DEW em plataformas marítimas representa um dos maiores desafios de engenharia naval contemporânea. Diferentemente de mísseis ou armas cinéticas, que dependem principalmente de espaço para armazenamento e logística de munição, os lasers de alta potência exigem capacidade elétrica estável, sistemas de gerenciamento térmico eficientes e integração profunda com a arquitetura de comando e controle do navio. Navios de combate modernos já operam no limite de sua infraestrutura energética, com sensores multifuncionais, radares de varredura eletrônica ativa, sistemas de comunicação de alta largura de banda e motores elétricos que consomem grande parte da geração disponível. Assim, a decisão entre utilizar a rede elétrica existente ou instalar geradores dedicados deve ser avaliada caso a caso, dependendo da classe do navio e da margem de potência disponível em operações reais de combate.

A gestão térmica constitui fator de criticidade equivalente à disponibilidade de energia elétrica na operação de *lasers* de fibra. A eficiência desses sistemas, atualmente na faixa de 40 a 50%, implica que parcela substancial da energia é dissipada na forma de calor. A extração contínua dessa energia térmica depende de sistemas de água gelada, que frequentemente já operam no limite de capacidade para suprir as demandas de radares e outros equipamentos críticos.

Além da gestão térmica, a integração desses sistemas requer o uso de óptica de direcionamento, controle do feixe e, quando necessário, óptica adaptativa, a fim de manter a precisão em ambientes sujeitos a vibrações e turbulência atmosférica.

Paragarantir eficácia, sensores de rastreamento e algoritmos de apontamento devem estar conectados diretamente aos sistemas de combate do navio, possibilitando resposta rápida contra alvos móveis. A estrutura deve ser projetada para resistir à maresia, às vibrações constantes e às limitações de espaço, enquanto medidas de segurança devem assegurar a proteção da tripulação contra riscos ópticos e eletromagnéticos. Em síntese, a implementação desses sistemas exige abordagem multidisciplinar que envolva energia, refrigeração, estabilidade, controle, integração tática e segurança operacional.

Esta seção estabelece a relação fundamental entre a potência óptica desejada (saída) e a potência elétrica necessária (entrada) para o funcionamento de um sistema de energia dirigida em plataformas marítimas. Para o estudo de caso apresentado neste artigo, considera-se o sistema instalado pela US Navy no USS Preble (DDG 88), desenvolvido pela Lockheed Martin, que emprega um laser de 60 kW. Considera-se, ainda, eficiência do sistema *laser* de 45%.

Para análise de volume e peso, considera-se o *laser* comercial YLR Series, da IPG Photonics. A saída monomodo pode atingir até 3 kW, integrável por meio de colimador ou conector QBH, com qualidade óptica $M^2 < 1.1$. O comprimento de onda padrão é 1.070 nm. Pacotes compactos em *rack* de 19" são oferecidos como solução econômica e adaptável para integração em linhas de produção. A dimensão volumétrica nominal de cada módulo de 3 kW é de 448 x 798 x 177 mm, resultando em volume de 0,0633 m³ e peso aproximado de 80 kg. Para uma potência de 60 kW, seriam necessários 20 módulos, totalizando 1,266 m³ de volume e peso aproximado de 1.600 kg (IPG Photonics, 2025).

As características de refrigeração de cada módulo são: temperatura da água entre 21 e 25°C, pressão de 2,5 a 3,5 bar, vazão de 20 a 25 L/min e capacidade de resfriamento de 3,6 kW. Essas especificações podem ser encontradas comercialmente em empresas nacionais, como a Transcalor, utilizada como base para o cálculo de volume e peso. O volume ocupado por um *chiller* com capacidade de refrigeração de aproximadamente 20 TR, ou 60.000 kcal/h, e vazão de 16.000 m³/h é de 1.810 x 824 x 2.327 mm, resultando em volume aproximado de 3,5 m³ e peso de 700 kg (Transcalor, 2025).

O subsistema de controle é responsável por gerenciar a operação segura e precisa do sistema, supervisionando funções de monitoramento, segurança, alinhamento e refrigeração. Inclui modulação e controle de potência do *laser*, gestão do

fluxo de água e da temperatura nos módulos, rastreamento do feixe por meio de mecanismos de gimbals e espelhos, interface de usuário e sistemas de intertravamento de segurança. Além disso, integra-se a outros sistemas da plataforma, como radares e redes de missão, e realiza diagnósticos para manutenção preditiva. Estima-se que a potência elétrica média consumida por esse subsistema varie entre 3 e 5 kW, dependendo da quantidade de sensores, atuadores e unidades de processamento em operação simultânea. O volume estimado é da ordem de 1 a 1,5 m³, com peso aproximado de 150 a 200 kg, incluindo painéis, unidades de processamento e atuadores.

O subsistema óptico destina-se à óptica adaptativa e ao monitoramento do feixe, mantendo sua qualidade e estabilidade durante a operação. Inclui espelhos deformáveis, sensores de frente de onda, cintilômetros, detectores de potência e câmeras para avaliação da qualidade do feixe (M², perfil de intensidade e alinhamento), permitindo correções em tempo real contra distorções térmicas, turbulência atmosférica ou vibrações da plataforma. Estima-se que o consumo elétrico médio desse subsistema seja relativamente baixo, da ordem de 2 a 4 kW, dependendo da complexidade dos sensores, atuadores e sistemas de processamento associados. O volume ocupado por esses módulos ópticos é estimado em 0,5 a 0,7 m³, com peso aproximado de 50 a 80 kg, considerando montagens, espelhos deformáveis, sensores e *hardware* de leitura. Apesar de representar uma fração pequena da potência total do sistema, este subsistema é crítico para garantir que o feixe entregue ao alvo mantenha precisão, coerência e potência eficaz.

Além dos subsistemas principais, é necessário considerar periféricos e cabeamento, que incluem painéis de distribuição elétrica, conversores, controladores auxiliares, cabos de fibra óptica para comunicação dos sensores e cabos elétricos para alimentação e comando dos atuadores. Estima-se que a potência consumida pelos periféricos seja relativamente baixa, da ordem de 1 a 2 kW, principalmente para iluminação, instrumentação e circuitos auxiliares. O volume estimado ocupado pelos periféricos e cabeamento é de aproximadamente 1 a 1,2 m³, distribuído em *racks* e bandejas de cabeamento, com peso de 50 a 100 kg, dependendo do tipo e comprimento dos cabos e da densidade de *racks*.

Considerando a potência elétrica total estimada dos módulos de *laser*, do *chiller*, do sistema de controle, da óptica adaptativa e dos periféricos, a demanda total de energia aproxima-se de 180 kW. Para operação confiável e levando em conta perdas, fator de potência, picos de consumo e fatores de

segurança, recomenda-se um gerador com capacidade nominal em torno de 300 kVA, fornecendo energia elétrica trifásica com estabilidade para cargas críticas. O volume estimado de um gerador desse porte é da ordem de 4 a 6 m³, ocupando espaço em uma cabine ou contêiner, enquanto o peso aproximado varia entre 2,5 e 3,5 toneladas, dependendo do tipo de motor, alternador e sistema de isolamento acústico ou térmico.

A montagem mecânica inclui estruturas de suporte para os módulos de laser, racks do sistema de controle, estruturas de engrenagens, parafusos de montagem, entre outros componentes. Para estimar o volume, considerou-se o espaço físico necessário para acomodar cada subsistema, incluindo margem para circulação de ar e manutenção, resultando em aproximadamente 2 a 2,5 m³, correspondentes à estrutura para *racks*, suportes e plataformas integradas. O peso total da montagem mecânica foi estimado com base no peso médio de estruturas metálicas, suportes de alumínio ou aço e painéis de fixação, totalizando entre 300 e 400 kg. Essa estimativa inclui a estrutura principal, suportes de fixação, bandejas para cabos e pequenas proteções mecânicas, sem considerar o peso dos subsistemas já contabilizados separadamente, garantindo que o projeto estrutural seja suficiente para suportar toda a carga do DEW de forma segura e estável. Os dados de estimativas de consumo de potência, volume e peso podem ser visualizados na Tabela 1.

Cabe ressaltar que essas estimativas não consideram possíveis adaptações e integrações do sistema com os sistemas próprios das plataformas marítimas. A integração do sistema aos geradores de um navio, por exemplo, eliminaria 53% do peso e 36% do volume.

Tabela 1. Estimativa de consumo de potência, volume e peso dos subsistemas para um DEW de 60 kW de potência de saída.

Subsistema	Potência (kW)	Volume (m ³)	Peso (kg)
20 módulos <i>laser</i>	134	1,2	1.600
<i>Chiller</i>	35	3,5	700
Gerador elétrico	-	6,0	3.500
Montagem mecânica	-	2,5	400
Sistema de controle	5	1,5	200
Sistema óptico	4	0,7	80
Periféricos	2	1,2	100
Total	180	16,6	6.580

Existe também a possibilidade de integração do sistema de controle, conforme realizado na integração do sistema de arma a laser (*Laser Weapon System – LaWs*) da US Navy no USS Ponce (Ciullo *et al.*, 2013). Para integração do sistema em uma plataforma embarcada, a utilização de um suporte por Sistema de Arma de Curto Alcance (*Close-in Weapon System – CIWS*) eliminaria espaço adicional no convés ao combinar a arma de energia dirigida com o suporte convencional já existente. A Figura 5 mostra um exemplo de utilização do sistema já existente no navio para adaptação do sistema laser. O LaWS foi projetado para ser um sistema “*plug and play*”, integrando-se às tecnologias de direcionamento e às redes elétricas já existentes em um navio. O sistema de controle é integrado à trajetória de radar obtida de um MK 15 CIWS ou de outra fonte de direcionamento. Essas funções são realizadas utilizando o sistema de radar de busca/rastreamento e o *Phalanx Thermal Imager* (Ciullo *et al.*, 2013).

Outro exemplo de integração de controle ocorreu na implementação do sistema conhecido como MK 38 *Tactical LASER System* (TLS), produzido pela BAE Systems e pela Boeing, que firmaram parceria para desenvolver um laser de fibra industrial de 10 kW. Essa arma a laser tática é integrada como módulo adicional ao MK 38 MOD 2 *Machine Gun System* (MGS), mantendo toda a capacidade do sistema de metralhadora e a filosofia de operação por um único operador da arma MK 38.



Figura 5. Renderização do Sistema de Arma a Laser integrado à montagem do Sistema de Armas de Curto Alcance (Ciullo *et al.*, 2013).

O sistema mostrado na Figura 6 combina armas de energia cinética e de energia dirigida em uma única montagem, oferecendo ao combatente opções adicionais com impacto mínimo na configuração atual do navio (Ciullo *et al.*, 2013).

A Figura 7 apresenta a *Maritime LASER Demonstration* (MLD), instalado no *Self Defense Test Ship* da Marinha, o ex-USS Paul F. Foster. O sistema possui integração ao radar e ao sistema de navegação do navio; no entanto, difere dos citados anteriormente por possuir sistema estabilizado de apontamento,

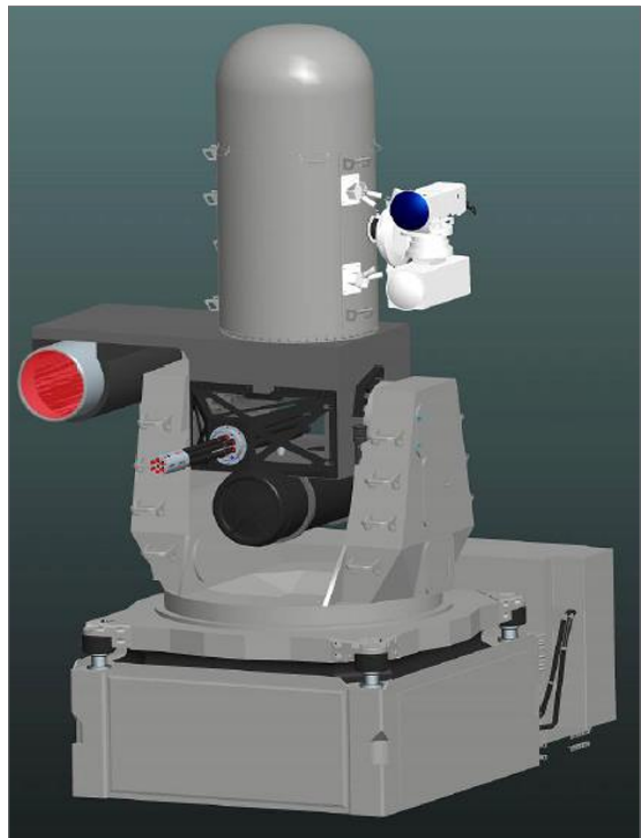


Figura 6. Renderização do *Tactical LASER System* (Ciullo *et al.*, 2013).

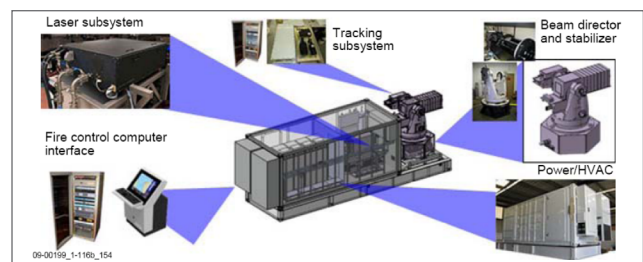


Figura 7. Esquema do *Maritime LASER Demonstration* (O’rouke, 2015).

subsistema de *tracking* e controle de disparo. A demonstração com HEL conseguiu rastrear e neutralizar, com sucesso, múltiplos alvos de pequenas embarcações em movimento, a distâncias operacionalmente significativas, comprovando o potencial das armas de *laser* de estado sólido para a defesa naval contra esse tipo de ameaça. O MLD também demonstrou resistência ao ambiente marítimo desafiador, incluindo chuva, neblina, ondas de até 2,5 m e ventos de até 25 nós (Ciullo *et al.*, 2013).

A definição da área de instalação de um sistema de energia dirigida em um navio envolve análise criteriosa de espaço, integração estrutural e compatibilidade com os demais subsistemas da embarcação. Além da necessidade de acomodar o *laser*, a óptica de apontamento e os sistemas de resfriamento, é essencial garantir proximidade com as linhas de fornecimento elétrico e de dados, minimizando perdas e atrasos de resposta.

A localização deve também favorecer campo de visão amplo e livre de obstruções, permitindo máxima eficiência de engajamento em diferentes ângulos e condições marítimas. Outro fator crítico é a integração com os sistemas de radar, navegação e controle de tiro, que requerem baixa latência na comunicação para assegurar precisão no rastreamento e engajamento de alvos. Por fim, a escolha do local deve considerar aspectos logísticos e de manutenção, garantindo acesso facilitado para reparos e

atualizações futuras, sem comprometer a operacionalidade do navio. A Figura 8 apresenta algumas das possibilidades.

4.4. ANÁLISE DE CUSTOS

A análise de custos constitui fator determinante para a viabilidade desses sistemas, especialmente considerando o histórico de projetos paralisados por orçamentos excessivos e desempenho abaixo do ideal. Em cenário de restrições orçamentárias, é necessário identificar tecnologias de curto prazo que ofereçam retorno imediato sobre o investimento. Para avaliar esse aspecto, este trabalho utilizou como base de comparação três protótipos de *laser* de estado sólido: MLD, LaWS e TLS, Tabela 2. Cada um desses sistemas possui peculiaridades que resultam em desafios de integração fundamentalmente distintos.

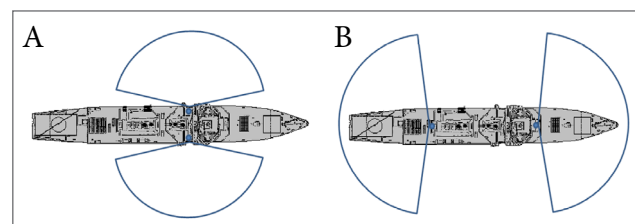


Figura 8. Áreas de cobertura de acordo com o local de instalação no navio (Ciullo *et al.*, 2013).

Tabela 2. Custos comparativos dos sistemas MLD, LaWs e TLS (valores em dólares) (Ciullo *et al.*, 2013).

COST FACTORS	MLD	LaWs	TLS
DESIGN	\$16.800.140,00	\$4.704.856,00	\$68.484,00
HARDWARE	\$20.202.700,00	\$5.657.738,00	\$1.098.048,00
CONTRACTOR SUPPORT			
- Support Equipment	\$2.445.590,00	\$684.884,00	\$66.461,00
- Tools & Test Equipment	\$1.701.280,00	\$476.441,00	\$46.234,00
- System Test & Evaluation	\$3.615.220,00	\$1.012.437,00	-
- Training	\$212.660,00	\$59.555,00	\$5.779,00
- Data	\$1.275.690,00	\$357.331,00	\$34.675,00
- System Engineering	\$15.843.170,00	\$4.436.858,00	-
- Man Sup	\$4.359.530,00	\$1.220.880,00	-
- Other	\$1.913.940,00	\$535.996,00	\$52.013,00
GOVERNMENT SUPPORT			
- Program Management	\$26.901.490,00	\$7.533.725,00	\$731.069,00
- Test & Evaluation	\$588.000,00	\$168.600,00	-
SOFTWARE	\$5.635.490,00	\$1.578.211,00	\$153.149,00
INTEGRATION	\$4.784.850,00	\$1.339.991,00	\$130.032,00
TOTAL 2011	\$106.279.750,00	\$29.767.503,00	\$2.385.944,00
TOTAL 2025 (38,6%)	\$147.303.733,50	\$41.257.759,16	\$3.306.918,38

O LaWS foi projetado para se integrar a uma montagem de arma existente (CIWS). O MLD, por sua vez, é fisicamente o maior sistema, com demandas de energia e refrigeração ainda mais elevadas. Em contraste, o TLS representa abordagem de impacto mínimo, funcionando como complemento a um canhão existente, com sistema de refrigeração autocontido e necessidade de energia significativamente menor, simplificando sua instalação e custo.

Para medir a perda de poder de compra do dólar ao longo do tempo, adota-se o índice de preços ao consumidor dos EUA, o *Consumer Price Index for All Urban Consumers* (CPI-U), divulgado mensalmente pelo *U.S. Bureau of Labor Statistics* (BLS). Esse índice é amplamente utilizado como referência oficial para mensuração da inflação no país. O cálculo da inflação acumulada em um período $[t_0, t_f]$ é feito pela razão entre os valores do índice no mês final e no mês inicial:

$$\pi_{acum} = \left(\frac{CPI_{t_f}}{CPI_{t_0}} - 1 \right) \times 100\% \quad (2)$$

No presente trabalho, considera-se o período de janeiro de 2013 a julho de 2025. Os valores de referência do CPI-U (base 1982–84 = 100) são os seguintes:

- Janeiro de 2013: $CPI_{2013-01} = 233,049$ (Bureau of Labor Statistics, 2011).
- Julho de 2025: $CPI_{2025-07} = 323,048$ (Bureau of Labor Statistics, 2005).

Aplicando-se a Equação 2:

$$\pi_{acum} = \left(\frac{323,048}{233,049} - 1 \right) \times 100\% \approx 38,6\% \quad (3)$$

Isso significa que, entre janeiro de 2013 e julho de 2025, o nível geral de preços nos EUA aumentou aproximadamente 38,6%, ou seja, o poder de compra do dólar foi reduzido nessa magnitude. Para esta análise, não se considerou a depreciação comercial do item decorrente do avanço tecnológico na área de *lasers* de fibra.

CONCLUSÃO

Foi demonstrado que plataformas marítimas oferecem infraestrutura adequada para integração de sistemas HEL, desde que satisfeitos os requisitos de energia e refrigeração. Efeitos como *thermal blooming*, cintilação e vibrações mecânicas representam os principais limitantes, podendo ser mitigados por óptica adaptativa e controle em malha fechada. O dimensionamento realizado evidencia que a operação é compatível com sistemas navais modernos, reforçando a viabilidade técnica da energia dirigida no ambiente marítimo. Além disso, verificou-se que os custos para implementação de um sistema de energia dirigida embarcado em plataforma marítima, a depender de sua complexidade, são viáveis mesmo em cenários de restrição orçamentária, dado o incremento tático e operacional promovido por esses equipamentos.

REFERÊNCIAS

ARSENOVIĆ, D.; DIMITRIJEVIĆ, J.; JELENKOVIĆ, B. M. Spectral method for numerical solution of the electric field envelope propagation equation. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, v. 67, p. 264–271, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2018.07.027>

BEGHI, A.; CENEDESE, A.; MASIERO, A. Alessandro Beghi et al. Stochastic realization approach to the efficient simulation of phase screens. *Journal of the Optical Society of America A*, v. 25, n. 2, p. 515–525, 2008. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.25.000515>

BUREAU OF LABOR STATISTICS. Consumer Price Index - January 2011. *Bureau of Labor Statistics*, 2011. Disponível em: <https://www.bls.gov/cpi/>. Acesso em: 01 set. 2025.

BUREAU OF LABOR STATISTICS. Consumer Price Index - July 2025. *Bureau of Labor Statistics*, 2025. Disponível em: <https://www.bls.gov/news.release/cpi.nr0.htm>. Acesso em: 01 set. 2025.

CARROLL, D. Overview of High Energy Lasers: Past, Present, and Future? *In: 42ND AIAA PLASMA DYNAMICS AND LASERS CONFERENCE. Conferência [...]*. 2011. Virgínia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011.

CHOI, C. H.; JANG, H. J.; LIM, S. G.; LIM, H. C.; CHO, S. H.; GAPONOV, I. Automatic wireless drone charging station creating essential environment for continuous drone operation. *In: 2016 INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL, AUTOMATION AND INFORMATION SCIENCES (ICCAIS)*, 2016. *Conferência [...]* Ansan: IEEE, 2016. p. 132–136.

- CIULLO, D.; DELONGPRE, J.; MCARTHUR, S.; NOWAKOWSKI, J.; SHENE, R.; TAYLOR, E.; WHITE, R.; CHENG, P.-Y.; HENG, Y.; WONG, C. S.; WONG, W. K.; PHUA, Y.; L.; ZLATSIN, P.; CHOON, J.; NEO, Y. S.; LEE, D.; CHOW, W. C.; LEE, G. H.; LEO, V.; LIM, Z.; SHEO, B. C.; SOH, S. S.; TEO, H. C.; SEA Cohort SEA-19B. *Viable short-term directed energy weapon naval solutions: a systems analysis of current prototypes*. 2013. Tese de Doutorado - Naval Postgraduate School, Califórnia, 2013.
- DE MORAIS, P. J. D. *Propagação atmosférica de feixes laser de alta potência: modelagem numérica e análise via método de tela de fase*. 2023. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.
- DE MORAIS, P. J. D.; DA SILVA, R. C.; DE ROSSI, W.; MOTTA, C. C. Numerical solution of atmospheric laser beam propagation using artificial compressibility and pseudospectral methods. *In: 2022 SBFOTOM INTERNATIONAL OPTICS AND PHOTONICS CONFERENCE (SBFoton IOPC), 2022. Conference [...]*. Recife: IEEE, 2022. p. 1-5.
- FRIGO, M.; JOHNSON, S. G. FFTW: an adaptive software architecture for the FFT. *In: PROCEEDINGS OF THE 1998 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH AND SIGNAL PROCESSING, ICASSP '98. Anais [...]*. Seattle: IEEE, 1998. p. 1381-1384.
- HARDING, C. M.; JOHNSTON, R. A.; LANE, R. G. Fast simulation of a kolmogorov phase screen. *Applied Optics*, v. 38, n. 11, p. 2161-2170, 1999. <https://doi.org/10.1364/AO.38.002161>
- HARDY, J. W. Active optics: A new technology for the control of light. *Proceedings of the IEEE*, v. 66, n. 6, p. 651-697, 1978. <https://doi.org/10.1109/PROC.1978.10992>
- IPG PHOTONICS. *YLR Series Diode-Pumped CW Fiber Lasers*. Technical document. Disponível em: https://cdn.ipgphotonics.com/5b6f3db3-e2af-4331-b634-b0c000f9351e/IPG_YLS-Series_DS_EN_LTR.pdf. Acesso em: 29 ago. 2025.
- JAAFAR, W.; YANIKOMEROGU, H. Dynamics of Laser-Charged UAVs: A Battery Perspective. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 8, n. 13, p. 10573-10582, 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.06703>
- KOLMOGOROV, A. N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, v. 434, n. 1890, p. 9-13, 1991.
- MARIN, F. O. *Uma perspectiva para o desenvolvimento nacional de tecnologia laser em armas de energia direcionada: emprego em meios navais e uso dual para a sociedade brasileira*. 2022. Tese (Curso de Política e Estratégia Marítima) - Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 2022.
- MORRILL, D. F. *Numerical Simulation of High Energy Laser Propagation*. 2018. Dissertação (Doutorado em Filosofia em Matemática Aplicada) - Departamento de Matemática e Estatística, Instituto de Tecnologia da Força Aérea, Graduate School of Engineering and Management, Ohio, 2018.
- NELSON, E. *High Energy Laser Propagation and Experimental Techniques*. 2016. Doctoral thesis - Naval Postgraduate School, California, 2016.
- O'ROUKE, R. *Navy Shipboard Lasers for Surface, Air, and Missile Defense: Background and Issues for Congress*. Congressional Research Service Report, 2015.
- O'ROUKE, R. *Navy shipboard lasers: background and issues for congress*. Congressional Research Service Report, 2024.
- PEÑANO, J. R.; SPRANGLE, P.; HAFIZI, B. *Propagation of high energy laser beams through atmospheric stagnation zones*. Washington: Naval Research Laboratory, 2006.
- PEÑANO, J.; SPRANGLE, P.; TING, A.; FISCHER, R.; HAFIZI, B.; SERAFIM, P. Optical quality of high-power laser beams in lenses. *Journal of the Optical Society of America B*, v. 26, n. 3, p. 503-510, 2009. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.26.000503>
- PERRY, M. D.; PENNINGTON, D.; STUART, B. C.; TIETBOHL, G.; BRITTEN, J. A.; BROWN, C.; HERMAN, S.; GOLICK, B.; KARTZ, M.; MILLER, J.; POWELL, H. T.; VERGINO, M.; YANOVSKY, V. Petawatt laser pulses. *Optics Letters*, v. 24, n. 3, p. 160-162, 1999. <https://doi.org/10.1364/OL.24.000160>
- ROGGEMANN, M. C.; LEE, D. J. Two-deformable mirror concept for correcting scintillation effects in laser beam projection through the turbulent atmosphere. *Applied Optics*, v. 37, n. 21, p. 4577-4585, 1998. <https://doi.org/10.1364/AO.37.004577>
- SENTOKU, Y.; LISEIKINA, T. V.; ESIRKEPOV, T. Zh.; CALIFNO, F.; NAUMOVA, N. M.; UESHIMA, Y.; VSHIVKOV, V. A.; KATO, Y.; MIMA, K.; NISHIHARA, K.; PEGORARO, F.; BULAOV, S. V. High density collimated beams of relativistic ions produced by petawatt laser pulses in plasmas. *Physical Review E*, v. 62, n. 5, p. 7271-7281, 2000. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.7271>
- SMITH, D. C. High-power laser propagation: Thermal blooming. *Proceedings of the IEEE*, v. 65, n. 12, p. 1679-1714, 1977. <https://doi.org/10.1109/PROC.1977.10809>
- SPRANGLE, P. *Propagation of High Energy Lasers in Atmospheric Environments*. Naval Research Laboratory, 2009.
- SPRANGLE, P.; PEÑANO, J.; HAFIZI, B. Optimum wavelength and power for efficient laser propagation in various atmospheric environments. *Journal of Directed Energy*, v. 1, p. 71-95, 2006.
- SPRANGLE, P.; BAHMAN, H.; TING, A.; FISCHER, R. High-power lasers for directed-energy applications. *Applied Optics*, v. 54, n. 31, p. F201-F209, 2015. <https://doi.org/10.1364/AO.54.00F201>
- SRIAM, V.; KEARNEY, D. An ultra-fast Kolmogorov phase screen generator suitable for parallel implementation. *Optics Express*, v. 15, n. 21, p. 13709-13714, 2007. <https://doi.org/10.1364/oe.15.013709>
- STRASBURG, J. D.; HARPER, W. W. Impact of atmospheric turbulence on beam propagation. *In: THOMPSON, W. E.; BRUNSON, R. L. (Ed.). Laser Systems Technology II*, v. 5413. Bellingham: SPIE, 2004. p. 93-102.
- SU, A.; XI, F.; LIU, Z.; NING, Y.; LENG, J.; CHEN, Z.; HE, Y.; XU, X. Analytical study on the steady-state thermal blooming effect of high-power ytterbium-doped fiber lasers propagating through the atmosphere. *Optics Express*, v. 31, n. 9, p. 13640-13653, 2023. <https://doi.org/10.1364/oe.487681>
- TRANSCALOR. *Termochiller*. Disponível em: <https://transcalor.com.br/termochiller/>. Acesso em: 29 ago. 2025.