



Implantação de um laser de altíssima intensidade como uma infraestrutura científica multiusuário no Brasil

Nilson Dias Vieira Junior¹ e Ricardo Elgul Samad²
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN
[¹nilsondiasvieirajr@gmail.com](mailto:nilsondiasvieirajr@gmail.com), [²resamad@gmail.com](mailto:resamad@gmail.com)

RESUMO: Foi aprovado pela FINEP um projeto para a implantação de um sistema laser de intensidade relativística, destinado a servir como infraestrutura de pesquisa multiusuário. O laser será instalado no IPEN e deverá entrar em operação em 2026. O laser, com potência de pico de 15 TW, gerará pulsos de 35 fs e 500 mJ em 800 nm, a 10 Hz. Este sistema funcionará, inicialmente, como um acelerador compacto de elétrons e prótons. Também poderá criar condições extremas semelhantes às encontradas no interior das estrelas e possibilitará a microfusão nuclear, abrindo novos horizontes no campo da fotônica nuclear. Essas características ampliarão o espectro de radiação eletromagnética disponível à comunidade científica brasileira.

Palavras-chave: Aceleradores compactos a laser. Condições extremas. Fotônica nuclear. Lasers relativísticos. Microfusão nuclear.

ABSTRACT: FINEP has approved a project to implement a relativistic intensity laser system, intended to serve as a multi-user research infrastructure. The laser will be installed at IPEN and is expected to begin operating in 2026. The laser, with a peak power of 15 TW, will generate 35 fs, 500 mJ pulses at 800 nm, at 10 Hz. This system will initially function as a compact electron and proton particle accelerator. It will also be able to create extreme conditions similar to those found inside stars and will enable nuclear micro-fusion, opening new horizons in the field of nuclear photonics. These characteristics will expand the spectrum of electromagnetic radiation available to the Brazilian scientific community.

Keywords: Compact accelerators. Extreme conditions. Nuclear photonics. Relativistic Lasers. Nuclear micro-fusion.

INSERÇÃO INTERNACIONAL DO PROJETO NO CENÁRIO CIENTÍFICO

A interação da luz com a matéria tem contribuído significativamente para o conhecimento humano. Aproximadamente um terço dos Prêmios Nobel em Física está relacionado a essa área. A invenção do laser em 1960 e a técnica de amplificação de pulsos com varredura de frequência (*Chirped Pulse Amplification – CPA*) em 1985 foram marcos importantes reconhecidos com os prêmios Nobel de 1964 para Townes, Basov e Prokhorov, e de 2018 para Mourou e Strickland, respectivamente. A CPA elevou a intensidade luminosa dos lasers para mais de 10^{23} W/cm² [1] como mostrado na figura 1, uma evolução de 24 ordens de magnitude em comparação com a intensidade solar de 0,1 W/cm² na superfície terrestre.

Atualmente, há uma corrida global para desenvolver sistemas com maior potência, visando alcançar o limite de Schwinger [2] e criar matéria do vácuo, liderada pelo projeto chinês do laser de 100 PW [3]. As intensidades focalizadas, possibilitadas por sistemas laser atualmente em operação, geram campos elétricos, magnéticos e pressões extremas, similares às encontradas no interior de estrelas, permitindo avanços na astrofísica experimental em escala de laboratório, assim como outras aplicações como a aceleração de partículas por laser, estudos de microfusão e geração dos eventos mais curtos produzidos pela humanidade, na escala de attossegundos.

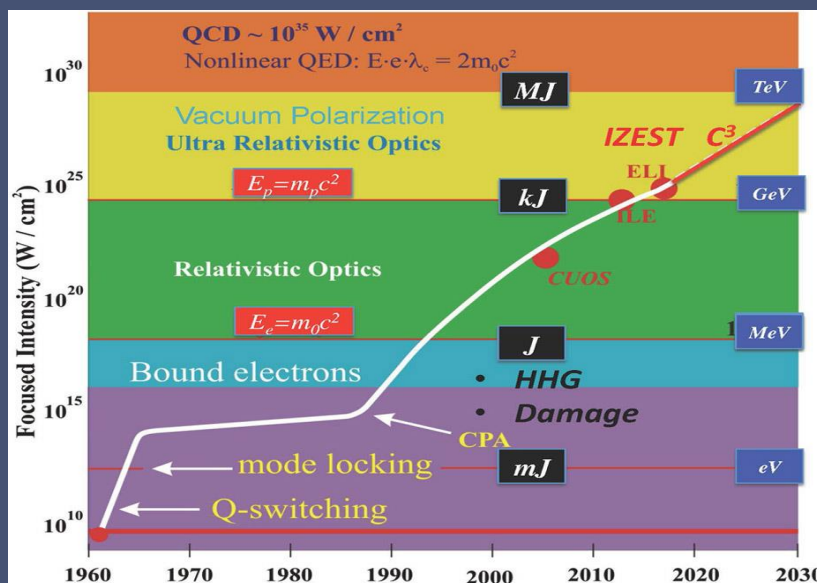


Figura 1 - Evolução da intensidade dos lasers e indicação dos eventos científicos em cada patamar. (reproduzido de Mourou e Tajima [4]).



No início deste século, a OCDE recomendou à IUPAP (*International Union of Pure and Applied Physics*) a criação do Comitê Internacional de Lasers de Ultra-Alta Intensidade (ICUIL), com base em estudos do Fórum de Ciências Global sobre lasers de alta intensidade e curta duração. Esse comitê foi fundado em 2004 [5], e o Brasil participou das reuniões iniciais por iniciativa do Conselho Superior da FAPESP. Atualmente, há cerca de uma centena de sistemas laser de intensidade relativística ($> 10^{19} \text{ W/cm}^2$) no mundo, mas nenhum no hemisfério sul, como mostrado na figura 2 [6]. Para suprir essa ausência, propusemos à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) implementar no país uma infraestrutura para realizar variados experimentos em áreas como física nuclear, eletrônica quântica, física de plasmas, de estado sólido e biologia, e suas aplicações. A CNEN encampou a proposta para criar este laboratório no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), que é um de seus institutos. Exemplos de iniciativas similares, de maior escala, incluem o ELI [7] (*Extreme Light Infrastructure*), as redes LaserNetUS [8] e Laserlab-Europe [9], além de programas na Ásia.

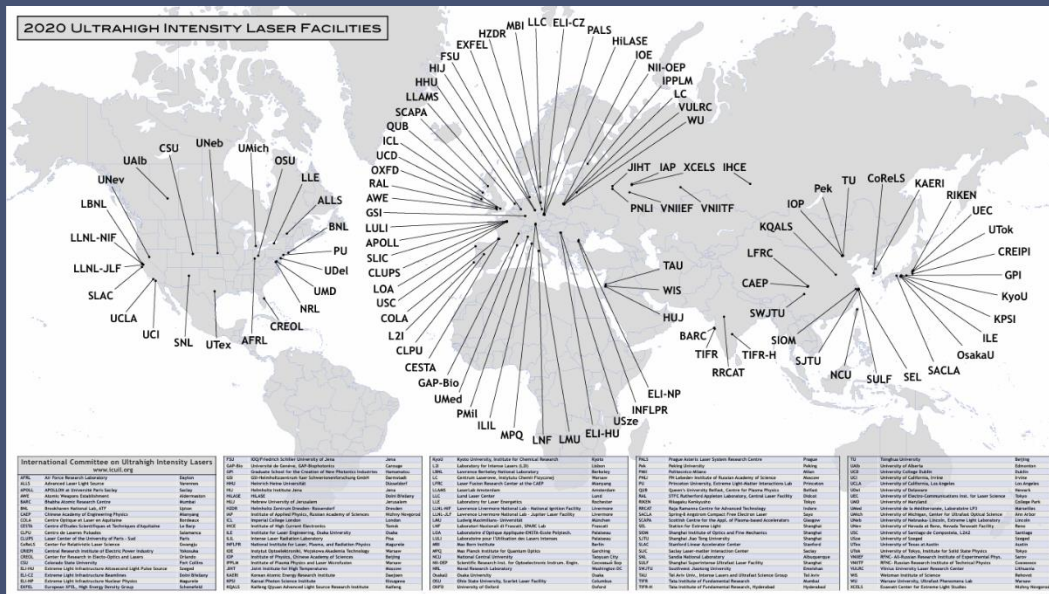


Figura 2 - Localização dos sistemas lasers com intensidades maiores que 10^{19} W/cm^2 .

A rede LaserNetUS, na América do Norte, mostrada na figura 3, possui 13 laboratórios, incluindo o laser Diocles, da Universidade de Nebraska-Lincoln (UNL). O IPEN colaborou com a UNL de 2017 a 2023, com apoio do projeto SPRINT FAPESP

#2018/25961-7. Esse projeto se expandiu e foi complementado pelo projeto K097, aprovado no ciclo 3 da LaserNetUS, financiado pelo Departamento de Energia dos EUA (DoE/USA). Esta iniciativa visou a aceleração de elétrons via técnica LWFA [10] (*Laser Wakefield Acceleration*), para ser testada tanto no laser Diocles da UNL quanto no do IPEN, em um regime não linear com intensidades intermediárias.

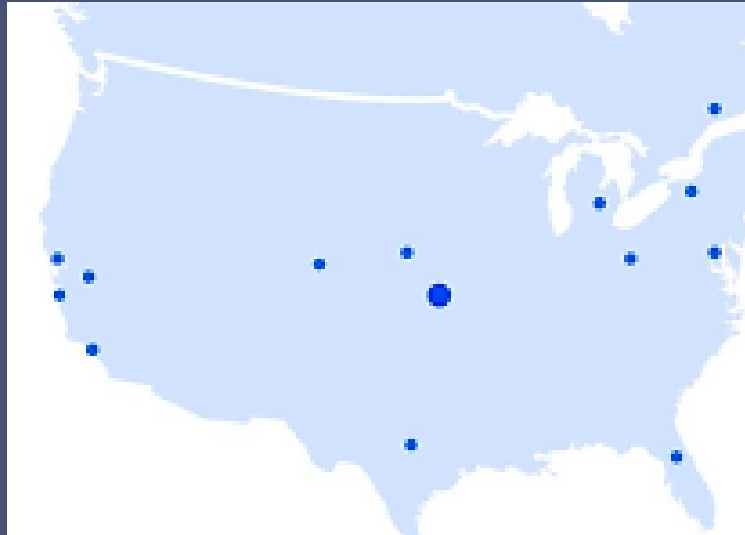


Figura 3 - Lasers de alta intensidade compoendo a organização LaserNetUS [8].

Esta colaboração objetivou, como prova de conceito em fotônica nuclear, utilizar feixes de elétrons acelerados por lasers para gerar raios γ por Bremsstrahlung, e induzir reações nucleares para produzir o radioisótopo ^{99}Mo [11]. Este radioisótopo decai no ^{99}Tc , que é amplamente usado na radiofarmácia [12] mundial, atendendo a 2 milhões de procedimentos anuais no Brasil, e o IPEN é responsável por 90% de sua produção. O ^{99}Mo é atualmente gerado em reatores nucleares de pesquisa, e existe uma busca por rotas alternativas para a sua produção. Uma possibilidade é o uso de elétrons acelerados por laser, com potencial de simplificar, baratear e descentralizar a produção deste radioisótopo. Simulações iniciais estimaram a capacidade de gerar ^{99}Mo , e agora usamos aprendizado de máquina para aprimorar a geração de feixes de elétrons e otimizar o rendimento das reações fotonucleares, já que as simulações mostram que os primeiros resultados foram insuficientes para atender à demanda médica.



Os resultados obtidos na colaboração com a LaserNetUS nos permitiram especificar um sistema laser para a implementação de uma infraestrutura de pesquisa no Brasil. Para maior flexibilidade experimental, optamos por um sistema com 15 TW de potência, gerando pulsos de 35 fs e 500 mJ, com taxa de repetição de 10 Hz, e capacidade de focalização do feixe para próximo do limite de difração. Nosso grupo submeteu esta proposta à chamada de Centros Temáticos 2023 da FINEP, com o título “Lasers de ultra-alta intensidade: uma infraestrutura científica para estudo da matéria em condições extremas”, e recebemos a aprovação em outubro de 2024. Este sistema terá a capacidade de acelerar elétrons e prótons, e produzir nêutrons, em pacotes com duração de picossegundos ou menos, além de ser adequado como plataforma para novos experimentos como em microfusão nuclear e plasmas de alta temperatura, assim como testar novos processos de aceleração.

A implementação deste projeto visa dotar o Brasil de uma infraestrutura de pesquisa com intensidades relativísticas, proporcionando oportunidades de formação e pesquisa local, além de conectar jovens cientistas a grandes centros internacionais. Atualmente, dezenas de milhares de cientistas trabalham na área globalmente, enquanto o Brasil tem poucos profissionais e estudantes atuantes, limitando seu acesso aos avanços científicos e tecnológicos resultantes destas atividades. Com este equipamento, o primeiro desafio será a aceleração de elétrons em regime não-linear para energias relativísticas; o próximo será a aceleração de prótons e subsequente criação de uma fonte de nêutrons impulsionada por laser via reações nucleares, alinhando-se com tendências globais e possibilitando futuras aplicações industriais e científicas. A figura 4 mostra a energia cinética de prótons acelerados por pulsos relativísticos em função da intensidade do laser. Com o laser de 15 TW proposto, poderemos atingir $2 \cdot 10^{19} \text{ W/cm}^2$ de intensidade, indicada pela linha vermelha na figura 4, gerando prótons com energias superiores a 10 MeV, capazes de induzir uma grande quantidade de reações nucleares no topo da mesa óptica, inaugurando o campo de fotônica nuclear no país. Com essas radiações, pode-se ampliar o espectro eletromagnético gerado para o VUV e até raios γ . Além dos pulsos laser e de partículas estarem sincronizados, o que possibilita experimentos de bombeio-prova, esses

fenômenos ocorrem em escalas de tempo muito curtas, até attossegundos, permitindo investigação em novas áreas.

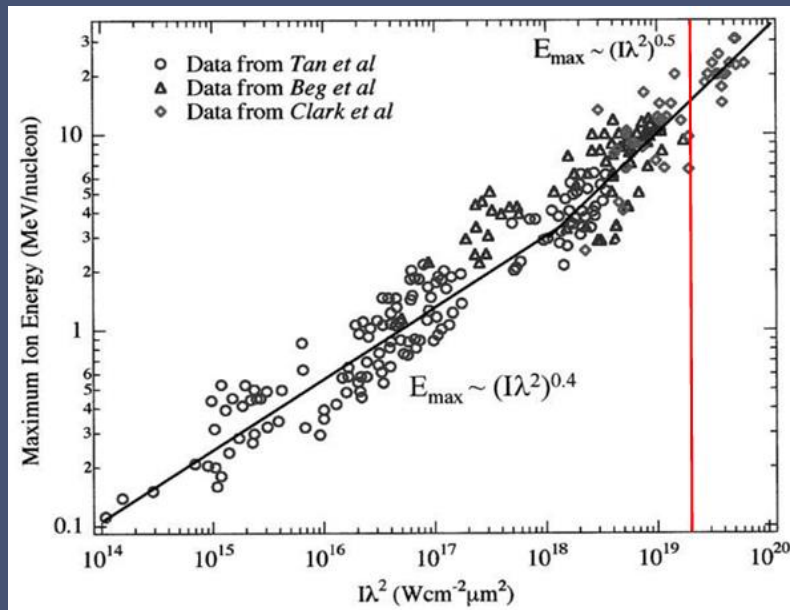


Figura 4 - Evolução da energia cinética dos prótons em função da intensidade dos lasers[13].

As atividades descritas estão em fase inicial de entendimento, tanto do ponto de vista experimental quanto teórico, e o sistema no IPEN é um ponto de partida em torno do qual novas atividades poderão ser nucleadas. Os grandes laboratórios globais também buscam novas ideias e estão abertos a colaborações, como o grupo do IPEN já realizou com a LaserNetUS. Em setembro de 2024, a conferência ICUIL 2024 promoveu um workshop sobre a integração da ciência de lasers de alta intensidade na América Latina, incentivando a cooperação local e futuras alianças com grandes centros. O primeiro passo será formar uma comunidade de usuários, tendo como exemplo o LNLS, preparando o Brasil para se integrar a essa ciência em nível global e futuramente construir uma grande infraestrutura científica de lasers de alta intensidade.

CRONOGRAMA E PREPARAÇÃO DE PROPOSTAS

A adequação do laboratório do IPEN para a operação do laser, juntamente com o seu comissionamento e montagem e instrumentalização de uma câmara de experimentos em vácuo, deverá levar 18 meses após a liberação de recursos. Com isso,



a previsão de entrada em operação é para meados de 2026, e após testes e ajustes iniciais, estimamos poder executar propostas externas de utilização no 2º semestre de 2026. O sistema será instalado no campus da USP em São Paulo, no Centro de Lasers e Aplicações do IPEN, instituto da Comissão Nacional de Energia Nuclear, e será gerido pelo Dr. Nilson Dias Vieira Junior, e coordenado tecnicamente pelo Dr. Ricardo Elgul Samad.

Interessados em desenvolver ideias com este sistema podem contatar um dos coordenadores, que encaminharão as propostas ao grupo de apoio do projeto, composto por 31 pesquisadores de diversas áreas. As propostas passarão por uma avaliação final de viabilidade experimental e mérito científico/tecnológico. A comunidade científica é convidada a submeter projetos, individualmente ou em grupos, para explorar essa infraestrutura, que visa criar provas de primeiros princípios. Haverá uma dinâmica de aprendizado conjunto, alinhando o Brasil aos avanços globais na área.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Dr. Spero Penha Morato e à Dra. Martha Marques Ferreira Vieira pela revisão criteriosa deste texto de divulgação e aos órgãos de suporte financeiro FINEP, FAPESP e CNPq.



REFERÊNCIAS

- [1] J. W. Yoon, et al., "Realization of laser intensity over 10^{23} W/cm²," *Optica* 8, 630-635 (2021). DOI:[10.1364/optica.420520](https://doi.org/10.1364/optica.420520)
- [2] J. Schwinger, "On Gauge Invariance and Vacuum Polarization," *Phys. Rev.* 82, 664-679 (1951). DOI:[10.1103/PhysRev.82.664](https://doi.org/10.1103/PhysRev.82.664)
- [3] Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, "The front end of Station of Extreme Light (SEL) 100 PW laser facility in Shanghai" (2024), acessado em outubro 2024, http://english.siom.cas.cn/Newsroom/rp/202207/t20220701_307101.html.
- [4] "Exploring fundamental physics at the highest-intensity laser frontier", in *News from SPIE*, (2012), p. <https://spie.org/news/4221-exploring-fundamental-physics-at-the-highest-intensity-laser-frontier#> =
- [5] The International Committee on Ultra-High Intensity Lasers, "ICUIL History" (2024), acessado em outubro 2024, 2024, <https://www.icuil.org/about-icuil/history.html>.
- [6] The International Committee on Ultra-High Intensity Lasers, "ICUIL World Map" (2024), acessado em outubro 2024, 2024, <https://www.icuil.org/downloadss/laserlabs.html?highlight=WyJ3b3JsZCIsIndvcmxkI3MlLCJtYXAiLCJ3b3JsZCBtYXAiXQ==>.
- [7] ELI-ERIC, "ELI" (2024), acessado em outubro 2024, 2024, <https://eli-laser.eu/>.
- [8] U.S. Department of Energy - Office of Science, "High Intensity Laser Research | LaserNetUS" (2023), acessado em <https://lasernetus.org/>.
- [9] MBI Laserlab Europe, "Laserlab Europe" (2024), acessado em outubro 2024, 2024, <https://www.laserlab-europe.eu/>.
- [10] E. P. Maldonado, et al., "Study of quasimonoenergetic electron bunch generation in self-modulated laser wakefield acceleration using TW or sub-TW ultrashort laser pulses," *AIP Adv.* 11, 065116 (2021). DOI:10.1063/5.0052831
- [11] N. D. Vieira, et al., "Laser wakefield electron accelerator: possible use for radioisotope production," in *2021 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)*, eds., of 1-6 (2021). DOI:10.1109/SBFotonIOPC50774.2021.9461976
- [12] IPEN, "CENTRO DE RADIOFARMÁCIA" (2024), acessado em outubro 2024, 2024, https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=632.
- [13] I. Spencer, et al., "Laser generation of proton beams for the production of short-lived positron emitting radioisotopes," *Nucl. Instrum. Meth. B* 183, 449-458 (2001). DOI:10.1016/s0168-583x(01)00771-6