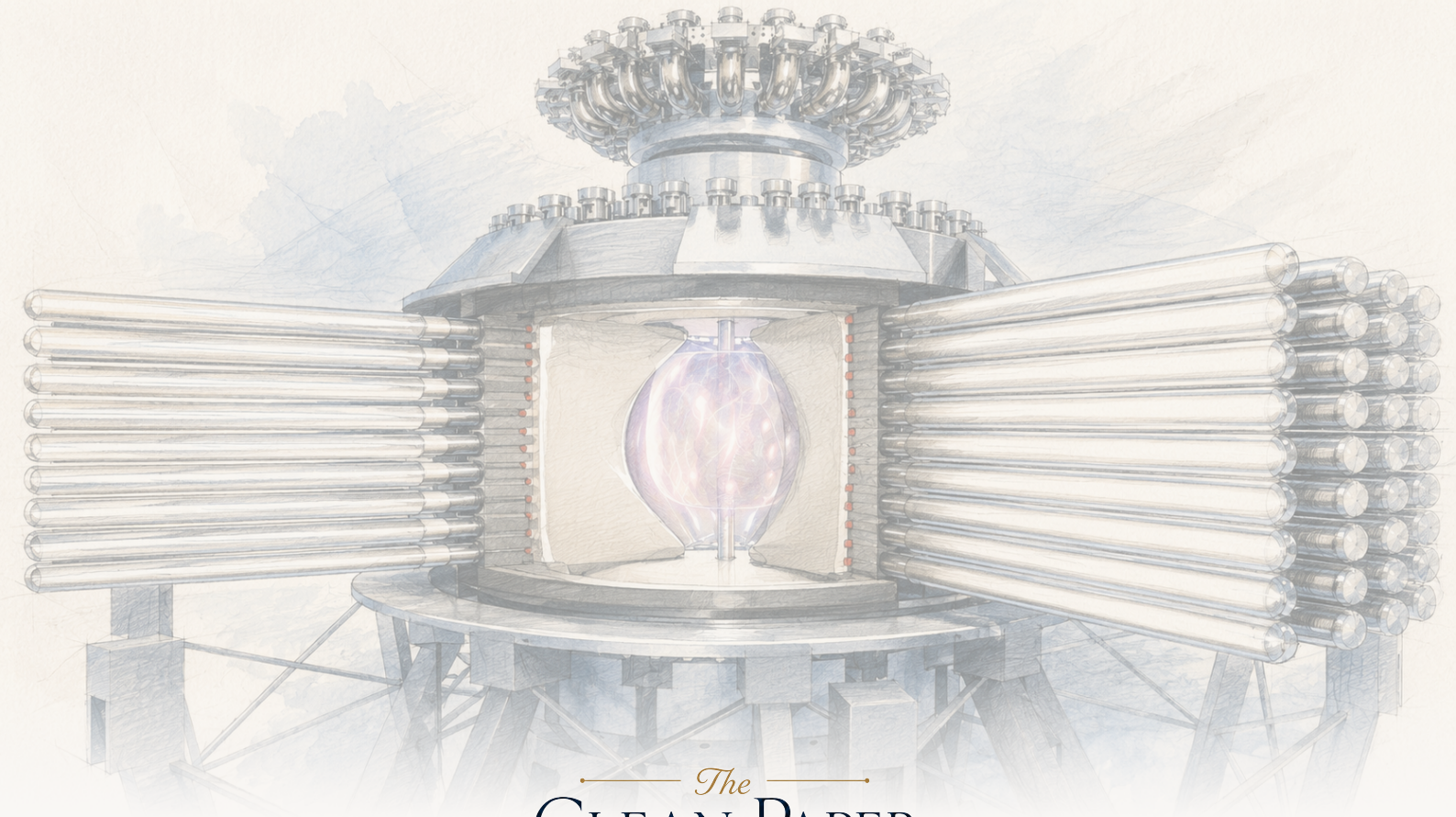


The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Uma máquina de fusão aqueceu o plasma comprimindo-o — o passo real e a central elétrica que ainda não é

A LM26 da General Fusion comprimiu um plasma magnetizado de deutério com um revestimento de lítio em implosão e observou-o a aquecer — mais do que triplicando a temperatura eletrónica até um máximo medido de cerca de 0,72 keV (718 ± 80 eV, aproximadamente 8 milhões de °C), com a maior parte do aquecimento atribuída à própria compressão, o mecanismo de que depende a sua abordagem de fusão por alvo magnetizado. É um marco de engenharia real para esta via de fusão. Mas são também as primeiras 11 descargas numa única máquina, descritas num preprint da empresa que ainda não foi revisto por pares, a uma temperatura ainda cerca de dez vezes inferior à necessária para um plasma em combustão — sem energia líquida, sem breakeven e sem eletricidade. Um mecanismo demonstrado, não uma central elétrica construída.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *The science of compressional heating on the LM26 magnetized target fusion experiment*, S. J. Howard et al. (General Fusion), arXiv:2606.23974 [physics.plasm-ph] (preprint) · DOI: 10.48550/arXiv.2606.23974

Uma máquina de fusão aqueceu o plasma comprimindo-o — o passo real e a central elétrica que ainda não é

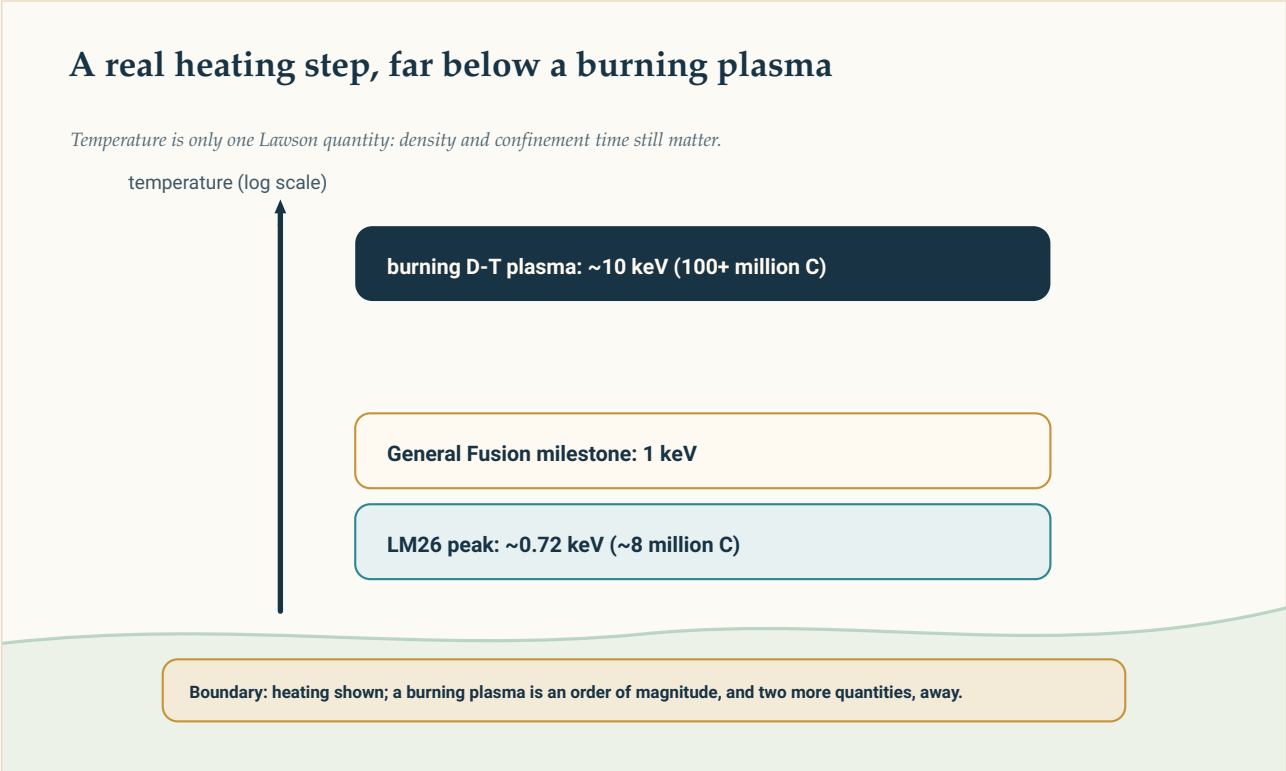
Para um reator de fusão devolver mais energia do que aquela que consome a funcionar, o plasma combustível tem de ser, ao mesmo tempo, suficientemente quente, suficientemente denso e mantido confinado durante tempo suficiente — as três grandezas reunidas naquilo a que os físicos chamam critério de Lawson. A maior parte da área tenta atingir esse objetivo com enormes ímanes supercondutores (tokamaks como o ITER) ou conjuntos de lasers gigantes (confinamento inercial, como no National Ignition Facility dos EUA). Um grupo menor de empresas aposta numa terceira via, a **fusão por alvo magnetizado** (*magnetized target fusion*, MTF): formar um plasma quente e magnetizado e depois *esmagá-lo* mecanicamente, depressa, para que seja a compressão a aquecê-lo — como um motor diesel inflama o combustível por compressão em vez de usar uma faísca.

Em junho de 2026, a empresa canadiana **General Fusion** publicou resultados da sua **Lawson Machine 26 (LM26)** que testam se essa aposta central se verifica realmente: comprimir mecanicamente um plasma magnetizado aquece-o de facto como os modelos prometem? Nas primeiras 11 descargas de compressão — nas quais um plasma de deutério num tokamak esférico foi comprimido por um *revestimento sólido de lítio* em implosão — as melhores descargas mostraram o plasma a ficar marcadamente mais quente, mais denso e mais fortemente magnetizado à medida que era comprimido, e a análise da empresa atribui a maior parte desse aquecimento à própria compressão.

É um resultado de engenharia real e específico para a abordagem MTF. Mas é também um primeiro conjunto de descargas, descrito num **preprint da empresa que ainda não foi revisto por pares**, a uma temperatura ainda muito abaixo da necessária para um plasma em combustão — e não é energia de fusão, não é *breakeven* e não é uma central elétrica.

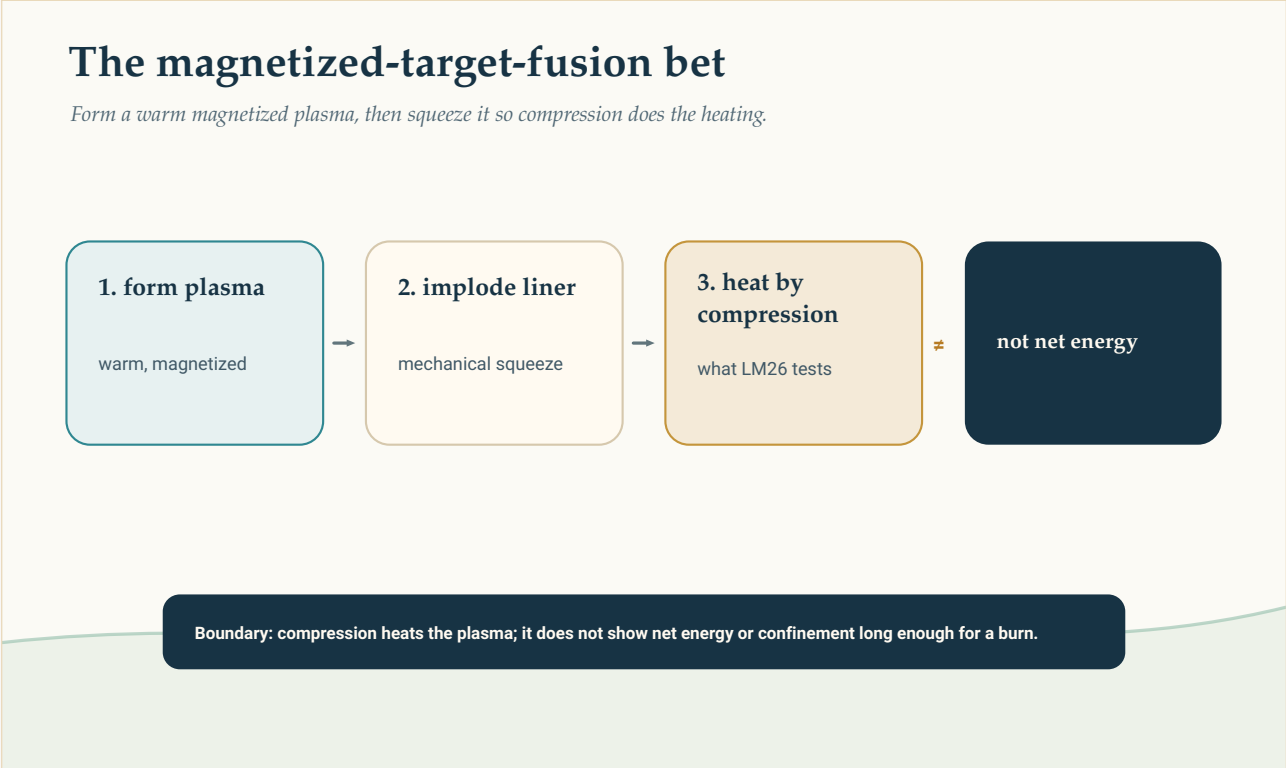
[video pending]

Estas são imagens promocionais da General Fusion, incluídas para mostrar o aspeto da LM26; não constituem evidência independente de que a máquina venha a cumprir os seus futuros marcos de fusão.



Uma escala de temperaturas: os ~0,72 keV da LM26, o marco de 1 keV da General Fusion e os ~10 keV de que um plasma de deutério–trítio em combustão necessita. A temperatura é apenas uma das três grandezas de Lawson.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Fusão por alvo magnetizado: formar um plasma quente e magnetizado e depois comprimi-lo com um

revestimento em implosão, para que o aperto produza o aquecimento — a aposta da compressão tipo diesel. A LM26 testou se a compressão aquece o plasma; não testou energia líquida nem confinamento suficiente.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

O que significam «fusão por alvo magnetizado», «keV» e o critério de Lawson

Na fusão, a temperatura do plasma costuma ser expressa em **quiloeletrão-volts (keV)** em vez de graus: 1 keV corresponde a cerca de **11,6 milhões de °C**. Um combustível de deutério–trítio precisa de atingir aproximadamente **10 keV** (mais de 100 milhões de °C) para fundir eficientemente — mas a temperatura é apenas uma de três condições que têm de ser satisfeitas ao mesmo tempo. O **critério de Lawson** diz que um reator também precisa de **densidade** suficiente e de **tempo de confinamento** suficiente, normalmente combinados num único «produto triplo» (temperatura × densidade × tempo de confinamento). Aquecer o plasma é necessário, mas está muito longe de ser suficiente por si só.

A **fusão por alvo magnetizado (MTF)** é uma via intermédia entre as duas abordagens dominantes. Em vez de confinar um plasma quente durante muito tempo com ímanes gigantes, ou de aquecer um alvo minúsculo quase instantaneamente com lasers, a MTF forma um plasma magnetizado e comprime-o mecanicamente ao longo de microssegundos. Se funcionar, a compressão aquece o plasma e aumenta simultaneamente a sua densidade — potencialmente atingindo condições de fusão sem ímanes à escala do ITER nem lasers à escala do NIF. Saber se a compressão produz realmente esse aquecimento numa máquina real é precisamente o tipo de pergunta para a qual um teste como o da LM26 serve.

O que os autores fizeram

- Construíram e dispararam a **LM26**, uma máquina de fusão por alvo magnetizado da General Fusion: forma-se um plasma de deutério num tokamak esférico e depois comprime-se esse plasma através de um **revestimento sólido de lítio** em implosão, impulsionado para dentro — aproximadamente uma **compressão radial de 3×**.
- Realizaram as **primeiras 11 descargas de compressão** e instrumentaram-nas intensivamente, reconstruindo ao longo do tempo a temperatura, densidade e campo magnético do plasma e registando neutrões, raios X e luz visível emitidos, além de imagens de câmara rápida da interação plasma–parede.
- Construíram um **modelo físico integrado** que equilibra o aquecimento por compressão com o aquecimento óhmico (proveniente da própria corrente do plasma) e a energia perdida para a fronteira, e compararam-no depois com os dados medidos para estimar de onde veio realmente o aquecimento.

O que encontraram

- **O plasma aqueceu à medida que era comprimido.** Nas melhores descargas, a temperatura eletrónica aumentou **mais de 3**×, a densidade eletrónica cerca de **10**× e o campo magnético poloidal cerca de **10**×, impulsionados pela compressão radial de 3×. Na melhor descarga, o artigo mede uma **temperatura eletrónica máxima de cerca de 0,72 keV** (718 ± 80 eV, por dispersão de Thomson) — aproximadamente 8 milhões de °C.
- **A maior parte do aquecimento é atribuída à compressão.** O modelo integrado conclui que a *maioria* do aumento de temperatura veio da própria compressão mecânica — o mecanismo de que depende toda a abordagem MTF — e não do aquecimento óhmico.
- **A emissão de neutrões aumentou durante a compressão**, de forma compatível com um plasma de deutério mais quente e mais denso.

O que isto não mostra

- **Não** é energia de fusão, *breakeven* nem ganho líquido. Nada aqui produziu mais energia do que a necessária para operar a máquina. O resultado é sobre *aquecer um plasma* — um passo no ciclo de fusão — não sobre o balanço energético de um reator.
- A temperatura está **ainda cerca de dez vezes abaixo** da de um plasma em combustão. Cerca de 0,72 keV corresponde a aproximadamente 8 milhões de °C; um combustível de deutério–trítio precisa de cerca de **10 keV (mais de 100 milhões de °C)** *e* de densidade × tempo de confinamento suficientes para sustentar a combustão. O próximo marco da própria General Fusion é **1 keV** — ainda muito longe da ignição.
- «**A maior parte do aquecimento vem da compressão**» é uma **conclusão baseada num modelo**, não uma leitura direta. Resulta de um modelo físico integrado ajustado aos diagnósticos; a confiança na divisão entre compressão, aquecimento óhmico e perdas depende da confiança nesse modelo.
- É um **preprint de uma empresa, não revisto por pares.** Os resultados são reportados pela própria equipa que construiu a máquina e que angariou financiamento com base na sua promessa; ainda não houve revisão independente.
- O aumento dos neutrões **não** é um rendimento de fusão relevante para energia. Esperam-se alguns neutrões de deutério nestas condições, muito abaixo de qualquer nível útil para produção de energia.
- Nada diz sobre a afirmação separada da empresa de que uma **futura central forneceria eletricidade à rede** — uma alegação que a cobertura jornalística independente tem tratado com forte cautela.

Quão forte é a evidência?

- **A afirmação central é estreita e verificável.** «Comprimimos um plasma magnetizado e ele aqueceu, sobretudo por causa da compressão» é exatamente o teste de mecanismo que a abordagem MTF precisa de passar, e o artigo apoia-o com um conjunto de descargas fortemente instrumentadas e um modelo explícito de balanço energético. Se resistir à revisão por pares, será uma validação genuína — embora inicial — da abordagem.
- **As ressalvas são estruturais, não cosméticas.** Onze descargas, uma máquina, uma equipa, ainda sem revisão por pares e uma temperatura de destaque uma ordem de grandeza abaixo da de um plasma em combustão. A conclusão que suporta o peso do trabalho — *a maioria do aquecimento vem da compressão* — assenta num modelo, pelo que a questão central para a revisão por pares será saber se essa decomposição é robusta.
- **O estado honesto é: um mecanismo demonstrado, não um marco energético alcançado.** O resultado desloca a MTF de «a compressão *deveria* aquecer o plasma» para «a compressão *aquece* o plasma» — e nada de mais grandioso do que isso.

Porque importa

O interessante na fusão por alvo magnetizado é a economia, não os recordes. Se a compressão mecânica conseguir aquecer um plasma em direção às condições de fusão, talvez seja possível lá chegar sem ímanes à escala do ITER nem lasers à escala do NIF — uma via potencialmente mais barata e capaz de iterar mais depressa, *se* funcionar. Esse «se» é todo o jogo, e depende de marcos pouco glamorosos como este: a compressão produz realmente o aquecimento prometido pelos modelos? Nas primeiras descargas, a resposta da LM26 é um sim com reservas. Vale a pena registá-lo precisamente *porque* há reservas — é um degrau numa escada muito longa, reportado pelas pessoas que a estão a subir, ainda não verificado por terceiros e muito longe do topo.

Resumo claro

A LM26 da General Fusion comprimiu um plasma magnetizado de deutério com um revestimento de lítio em implosão e mostrou que o plasma aqueceu — mais do que triplicando a temperatura eletrónica até um máximo medido de cerca de 0,72 keV (718 ± 80 eV, ~8 milhões de °C) — com a análise da empresa a atribuir a maior parte do aquecimento à própria compressão, o mecanismo de que depende a sua abordagem de fusão por alvo magnetizado. É um passo de engenharia real e específico para esta via de fusão. É também o conjunto das primeiras 11 descargas numa única máquina, descrito num preprint da empresa que ainda não foi revisto por pares, a uma temperatura cerca de dez vezes inferior à necessária para um plasma em combustão, sem energia líquida, sem *breakeven* e sem eletricidade. Um mecanismo demonstrado, não uma central elétrica construída.

Fontes

S. J. Howard et al. (General Fusion), The science of compressional heating on the LM26 magnetized target fusion experiment, arXiv:2606.23974 [physics.plasm-ph] (2026)
https://arxiv.org/abs/2606.23974

General Fusion, 'General Fusion Achieves Compressional Plasma Heating with LM26 Magnetized Target Fusion Machine' (company announcement, June 2026)
https://generalfusion.com/post/general-fusion-achieves-compressional-plasma-heating-with-lm26-magnet

Nature news, 'Nuclear-fusion firm says plant will deliver electricity to grid - but big questions remain' (2026)
https://www.nature.com/articles/d41586-026-01795-z