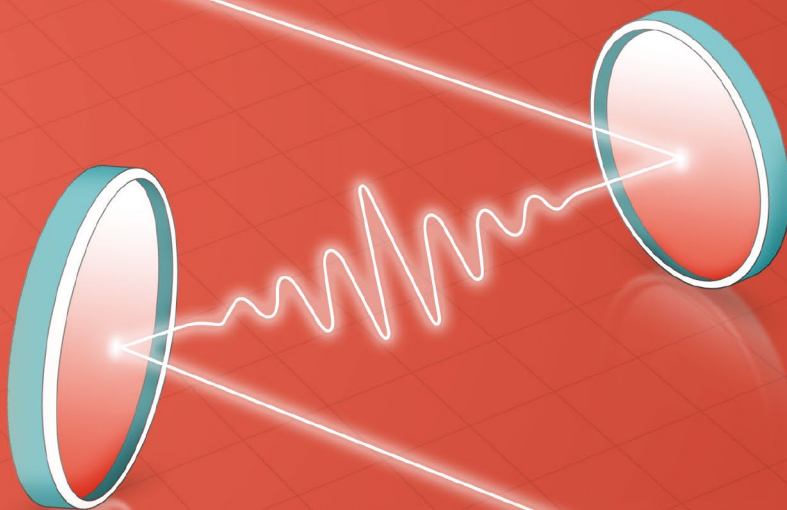


M L Miguez, N M Bigolin, F W A Sobreira, K W Capelle



Torneio de Física para Meninas 2025

Problemas e soluções



**EDIÇÕES
INESP**



Torneio de Física para Meninas 2025

Problemas e soluções



M L Miguez, N M Bigolin, F W A Sobreira, K W Capelle



Torneio de Física para Meninas 2025

Problemas e soluções

INESP

Fortaleza - Ceará

2026

Copyright © 2026 by Inesp
Instituto de Estudos e Pesquisas sobre o Desenvolvimento
do Estado do Ceará – Inesp

João Milton Cunha de Miranda
Diretor-Executivo

Luis Ernandes dos Santos do Carmo
Valdério da Costa
Articuladores

Gustavo Rodrigues de Vasconcelos
Orientador da Célula de Redação e Revisão

Valdemice Costa de Sousa (Valdo)
Orientador da Célula de Produção e Gestão Editorial

Sara Maria Marques Bastos
Supervisora do Núcleo de Iniciativas Editoriais

Projeto Gráfico, Diagramação e Capa
José Gotardo de Paula Freire Filho
Supervisor do Núcleo de Design Gráfico

Apoio Editorial
Igor Gonçalves Pinho
Assessor Técnico II

Nadja Maria Pinheiro
Preparadora de Texto

Tiago Melo Casal e Aurenir Lopes Alves
Revisores de Acessibilidade Digital

Liani Maria Braga Jacó
Revisora Digital

Catalogado por Daniele Sousa do Nascimento CRB-3/1023

T685 Torneio de física para meninas 2025 [livro eletrônico]: problemas e soluções / M L Miguez ... [et al.]. – Fortaleza: INESP, 2026. 104 p. ; il. color. ; 9.824 KB ; PDF

ISBN: 978-65-6094-173-1

1. Física – problemas – exercícios. I. Miguez, M L. II. Ceará. Assembleia Legislativa. Instituto de Estudos e Pesquisas sobre o Desenvolvimento do Estado.

CDD 530.1

A responsabilidade das opiniões expressas nesta obra, bem como das citações e referências bibliográficas, cabe a seu(s) autor(es). Às Edições Inesp, compete tão somente diagramação, design gráfico, preparação textual e revisão ortográfica.

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS ÀS EDIÇÕES INESP.

Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida por qualquer meio, sem a prévia autorização do Instituto de Estudos e Pesquisas sobre o Desenvolvimento do Estado do Ceará (Inesp).

VENDA E PROMOÇÃO PESSOAL PROIBIDAS.

EDIÇÕES INESP

Rua Barbosa de Freitas, 2672, 5º andar, Dionísio Torres, Fortaleza-CE,
CEP 60.170-900, Anexo II - Dep. José Euclides Ferreira Gomes - 5º andar
Fone: (85) 3277-3702 / editora.inesp@al.ce.gov.br / inesp@al.ce.gov.br

Apresentação

Um dos processos democráticos mais significativos criados pela humanidade, é a comunicação. Além da necessidade humana de comunicar por meios e mensagens, comunicar é uma obrigação dos entes públicos. Não foi à toa que nossa gestão à frente da ALECE trabalhou com afinco para conquistar o Selo Diamante de Transparência Pública.

A certificação máxima do Programa Nacional de Transparência, atribuído pela Atricon - a Associação dos Membros dos Tribunais de Contas do Brasil, mostra o respeito com que tratamos os dados e as informações relativas ao povo. Em consequência o respeito que temos pelas pessoas.

O INESP (Instituto de Estudos e Pesquisas sobre o Desenvolvimento do Estado do Ceará) vem desde 1989 contribuindo com a percepção de que no Ceará comunicar é algo muito sério. E, com isso, estimulamos uma engrenagem capaz de mover todo um corpo funcional que ajuda a população a se apropriar das políticas públicas.

Foi assim que a educação cearense encantou o Brasil. Elaborada e continuada por uma sequência de governadores, e uma governadora, responsáveis, comunicar processos, resultados, críticas, avanços, possibilidade, estatísticas, transparentemente dividiu com os cearenses o ato de fiscalizar para desenvolver.

O exemplo da educação é um aspecto de muitos estudos que você encontrará nessas publicações. Acompanhe para contribuir com o crescimento do nosso Ceará.

Com respeito,

Dep. Estadual Romeu Aldigueri
Presidente da Assembleia Legislativa do Estado do Ceará

Prefácio

O Instituto de Estudos e Pesquisas sobre o Desenvolvimento do Estado do Ceará (Inesp), criado em 1988, é um órgão técnico e científico de pesquisa, educação e memória. Ao idealizar e gerenciar projetos atuais que se alinhem às demandas legislativas e culturais do estado, objetiva ser referência no cenário nacional.

Durante seus mais de 30 anos de atuação, o Inesp prestou efetiva contribuição ao desenvolvimento do estado, assessorando, por meio de ações inovadoras, a Assembleia Legislativa do Estado do Ceará (Alece). Dentre seus mais recentes projetos, destacam-se o Edições Inesp e o Edições Inesp Digital, que têm como objetivos editar livros, coletâneas de legislação e periódicos especializados. O Edições Inesp Digital obedece a um formato que facilita e amplia o acesso às publicações de forma sustentável e inclusiva. Além da produção, revisão e editoração de textos, ambos os projetos contam com um núcleo de design gráfico.

O Edições Inesp Digital já se consolidou. A demanda por suas publicações alcançou uma marca de 5 milhões de downloads. As estatísticas demonstram um crescente interesse nas publicações, com destaque para as de Literatura, Ensino, Legislação e História, estando a Constituição Estadual e o Regimento Interno entre os primeiros colocados.

A Torneio de Física para Meninas 2025 - Problemas e soluções, é mais uma obra do diversificado catálogo de publicações do Edições Inesp Digital, que, direta ou indiretamente, colaboram para apresentar respostas às questões que afetam a vida do cidadão.

Prof. Dr. João Milton Cunha de Miranda
Diretor-Executivo do Inesp

Sumário

Introdução.....	13
------------------------	-----------

Apresentação do torneio.....	15
-------------------------------------	-----------

Donna Strickland - Homenageada do TFM 2025.....	16
---	----

Movimento Meninas Olímpicas.....	20
----------------------------------	----

Impactos e expansão do Movimento Meninas Olímpicas em 2026.....	21
---	----

Estrutura da competição.....	23
------------------------------	----

1ª fase do TFM.....	27
----------------------------	-----------

Problema 1.....	28
-----------------	----

Problema 2.....	29
-----------------	----

Problema 3.....	30
-----------------	----

Problema 4.....	32
-----------------	----

Problema 5.....	32
-----------------	----

Problema 6.....	33
-----------------	----

Problema 7.....	35
-----------------	----

Problema 8.....	37
-----------------	----

Problema 9.....	38
-----------------	----

Problema 10.....	39
------------------	----

Problema 11.....	41
------------------	----

Problema 12.....	42
------------------	----

Problema 13.....	44
------------------	----

Problema 14.....	45
------------------	----

Problema 15.....	46
------------------	----

2ª fase do TFM.....	49
----------------------------	-----------

Problema 1 - Associação de molas (20 pontos)	50
--	----

Problema 2 - Medindo a temperatura (20 pontos).....	54
---	----

Problema 3 - Gás ideal ultrarelativístico (20 pontos)	59
Problema 4 - Um átomo elástico (20 pontos).....	64
Problema 5 - Difração por um fio de cabelo (20 pontos).....	68

Estudantes medalhistas73

Medalhistas TFM 2025 1º ano do Ensino Médio	
Medalha de Ouro	74
Medalhistas TFM 2025 1º ano do Ensino Médio	
Medalha de Prata.....	75
Medalhistas TFM 2025 1º ano do Ensino Médio	
Medalha de Bronze	77
Medalhistas TFM 2025 2º ano do Ensino Médio	
Medalha de Ouro	80
Medalhistas TFM 2025 2º ano do Ensino Médio	
Medalha de Prata.....	81
Medalhistas TFM 2025 2º ano do Ensino Médio	
Medalha de Bronze	83
Medalhistas TFM 2025 3º e 4º anos do Ensino Médio	
Medalha de Ouro	85
Medalhistas TFM 2025 3º e 4º anos do Ensino Médio	
Medalha de Prata.....	86
Medalhistas TFM 2025 3º e 4º anos do Ensino Médio	
Medalha de Bronze	88

Estatísticas de participantes91

Estudantes inscritas	92
Participantes da 2ª fase	94
Estudantes medalhistas.....	96

Comissão organizadora101

Introdução

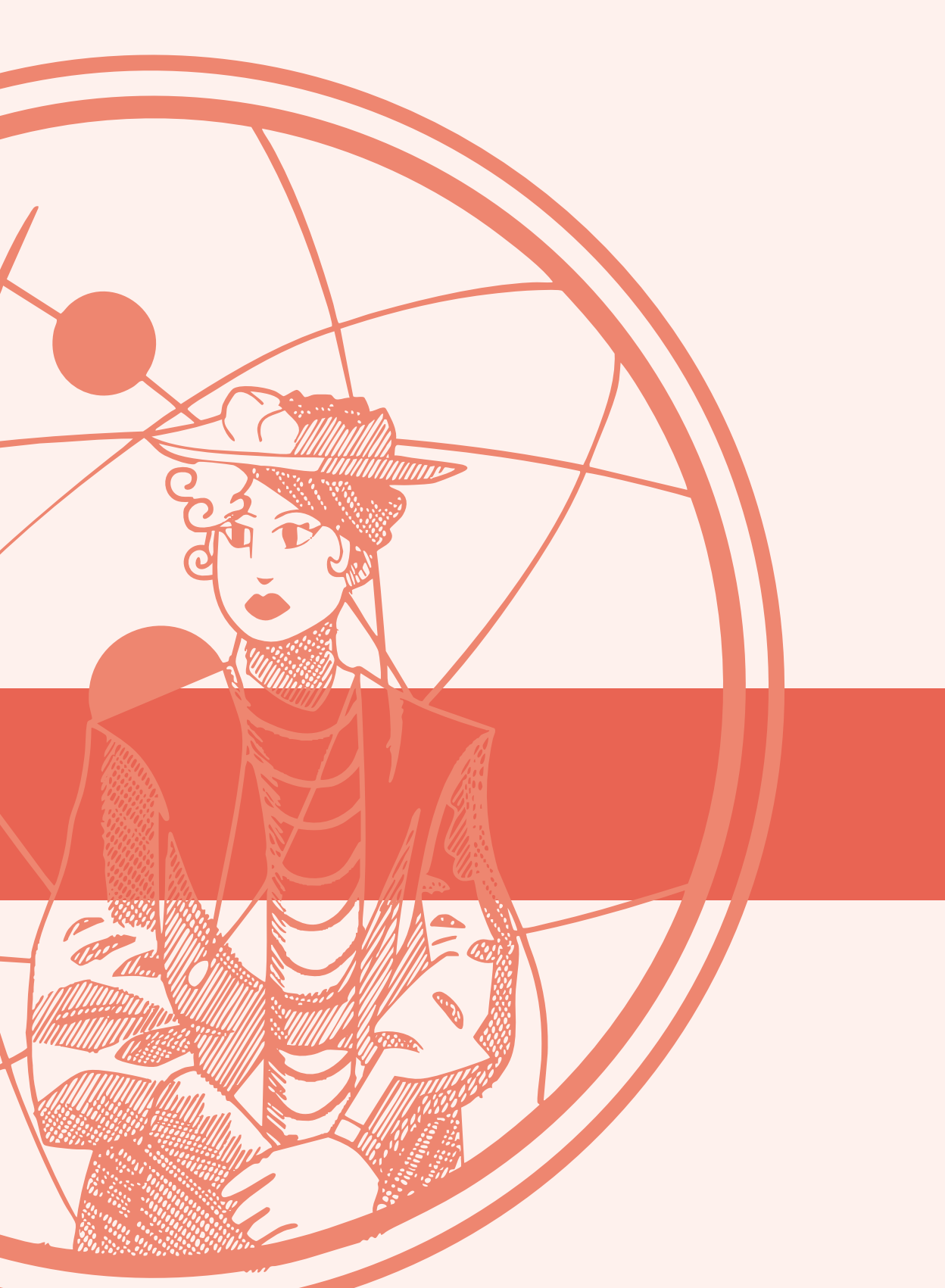
Este livro foi concebido com a ideia de dar visibilidade à 3ª edição da primeira Olimpíada de Física, exclusivamente, para meninas, realizada no Brasil, o Torneio de Física para Meninas - TFM. Embora a Física seja, obviamente, uma ciência universal, independente do gênero, o acesso à física é uma construção humana e reflete a realidade social, com uma forte sub-representação feminina nas ciências exatas. A esperança para o TFM é que essa competição seja mais um elemento de incentivo para que as meninas possam descobrir sua vocação, mostrar suas habilidades e iniciar as suas carreiras nas áreas das ciências exatas.

Neste livro são apresentados aspectos gerais da competição, incluindo o formato da competição, com destaque especial para a vida e o trabalho da cientista Donna Strickland, que foi escolhida para ser homenageada nesta 3ª edição da olimpíada. Apresentamos também os problemas, com soluções, que compuseram as duas fases do torneio em 2025, bem como estatísticas de cada etapa. Fazemos, ainda, uma homenagem apresentando os nomes das estudantes que se destacaram nessa terceira edição do TFM, como medalhistas, bem como suas escolas.

Esperamos que esse registro inspire futuras gerações de jovens cientistas a perseguirem seus sonhos, para que possam tornar o mundo mais igualitário. Que estas páginas sejam a celebração da dedicação e do talento de todas as participantes, que foram apoiadas por suas escolas, seus professores e familiares que acreditam no potencial ilimitado das mulheres nas ciências.

Agradecimentos. This work was supported by the Simons Foundation under award number 1023171-RC. Este trabalho foi apoiado pela Fundação Norte-Rio-Grandense de Pesquisa e Cultura (Funpec) e pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) por meio do projeto 1699/24 IIF-FINEP.

Os autores.





Apresentação do torneio



Donna Strickland - Homenageada do TFM 2025

O Torneio de Física para Meninas homenageia a cada edição uma cientista que tenha contribuído com avanços na Ciência e na Física. Essa é a forma que escolhemos de, através da divulgação de mais mulheres de destaque, estabelecer uma representatividade entre as meninas.

Nossa forma de homenagear baseia-se em trazer recortes da área de pesquisa e da carreira da cientista nas nossas redes sociais e nas questões das provas da 1ª e 2ª fase do torneio. Além disso, a cada ano, uma seção como esta do livro do TFM é dedicada à cientista homenageada.

Nestas três primeiras edições, o TFM homenageou as seguintes cientistas:

- 2023 - Lise Meitner
- 2024 - Yvonne Mascarenhas
- 2025 - Donna Strickland

A física austríaca Lise Meitner, pioneira na área da Física Nuclear, além de homenageada na 1ª edição do TFM, foi escolhida para representar o torneio através da nossa logo.



Ao dar visibilidade a trajetórias femininas de sucesso na Física, esperamos que mais meninas se sintam motivadas a ingressar e permanecer em carreiras relacionadas a essa área.

Na edição atual, a cientista homenageada foi a canadense Donna Strickland (Figura 1). Donna Strickland é professora na Universidade de Waterloo, no Canadá, desde 1997, onde supervisiona um laboratório de lasers ultrarrápidos, que desenvolve sistemas de laser de alta intensidade para investigações em óptica não linear.

Pioneira na área de lasers pulsados, ganhou o Prêmio Nobel de Física em 2018 junto do pesquisador Gérard Mourou pela implementação da técnica *chirped pulse amplification*.

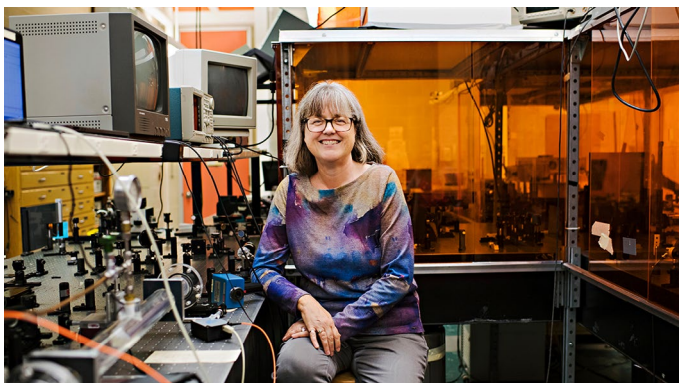


Figura 1: Foto da cientista Donna Strickland.
Fonte: Site Advanced Science News¹.

A cientista nasceu em 1959 na cidade de Guelph, em Ontário, no Canadá. Ela obteve seu primeiro diploma na área de Física, em Engenharia Física, em 1981, graduando-se pela Universidade McMaster, na cidade de Hamilton, também em Ontário, Canadá.

Realizou o doutorado em óptica na Universidade de Rochester, no estado de Nova York, sob a orientação do Prof. Gérard Mourou. Foi durante o doutorado que desenvolveram a técnica *Chirped Pulse Amplification*, técnica CPA (em português Amplificação de Pulso Chirpado),

¹<https://www.advancedsciencenews.com/from-laser-physics-to-a-nobel-prize-a-conversation-with-donna-strickland/>

um método de geração de pulsos ópticos ultracurtos de alta intensidade, pelo qual receberam o Prêmio Nobel.

A técnica CPA consiste em estender a duração dos pulsos de laser, reduzindo sua potência de pico, amplificando-os em seguida e, finalmente, comprimindo-os em um período de tempo mais curto para criar um pulso de alta intensidade. Além da contribuição para a ciência básica, permitindo a produção de lasers de altíssima potência, a tecnologia CPA tem muitas aplicações práticas, incluindo cirurgias corretivas da visão, embora Strickland use óculos. Em entrevista Donna disse: “Tenho muita fé em lasers, mas ninguém vai colocar um perto do meu olho.”

Quando perguntada se tinha consciência, na época, de que estavam trabalhando em algo de vanguarda, Donna disse à BBC: “Sim, sabíamos que seria um divisor de águas”, após uma pausa, riu e reformulou a resposta “Gérard sabia e me contou, e eu acreditei nele”.

Em 2018, quando ganhou o Prêmio Nobel, já havia passado 55 anos desde que a última mulher havia sido premiada, Maria Goeppert Mayer em 1963. Em entrevista, Donna Strickland disse estar surpresa com o tempo que já havia passado desde que uma mulher havia sido agraciada com o Prêmio Nobel de Física. Ela observou que Maria Goeppert-Mayer, que recebeu o prêmio em 1963, não foi remunerada durante grande parte do tempo em que trabalhou em sua pesquisa premiada e pontuou que sempre foi tratada como igual. “Eu recebia o mesmo salário que meus colegas homens na pós-graduação e em níveis superiores. Então as coisas mudaram e espero que continuem mudando para melhor”, segundo Donna.

Além do Prêmio Nobel, Donna Strickland recebeu outros prêmios de reconhecimento pelo seu trabalho. Em 1999, ela recebeu o Prêmio de Excelência em Pesquisa do Primeiro-Ministro de Ontário e, em 2000, foi agraciada com o Prêmio Cottrell para Acadêmicos, que reconhece pesquisadores por seus trabalhos e liderança acadêmica. Em 2008, ela foi nomeada membra da Sociedade Americana de Óptica por seu trabalho pioneiro na área de lasers ultrarrápidos e ciência óptica.

Em entrevista, Donna Strickland afirmou que gosta da adrenalina

da competição e de explorar os limites do que os lasers podem fazer. Seu campo de pesquisa gira em torno de “quem tem o pulso mais curto, mais energia e a maior potência média”.

No início do TFM 2025 a comissão organizadora entrou em contato por e-mail com a professora Donna Strickland para contar sobre a homenagem que faríamos e gentilmente ela nos enviou uma carta para incentivar as meninas que participariam desta edição. Esta carta está mostrada na figura 2 a seguir.



FACULTY OF SCIENCE | Physics and Astronomy
519-888-7567, ext. 42724 | fax 519-746-8115
strickia@uwaterloo.ca | www.physics.uwaterloo.ca/index.html

April 9, 2025

Dear Future Scientists,

Thank you for naming me as Honoree of the 2025 Edition of the Physics Tournament for Girls. Are you ready to challenge yourself, explore the fascinating world of physics, and shine in a tournament that celebrates the brilliance of young minds? I am happy to invite you to participate in the Physics Tournament for Girls—an incredible initiative by the International Institute of Physics in Brazil.

This tournament is designed especially for girls, offering a platform to showcase your talent, creativity, and passion for science in a supportive and empowering environment. It's an opportunity to step into the world of discovery, solve exciting problems, and connect with like-minded peers who share your enthusiasm for physics. I encourage you to enter as there is no cost to you.

Whether you're curious about the secrets of the universe, love experimenting, or simply want to prove your skills, this tournament welcomes you. Together, we can continue paving the way for women in science and technology, making waves not just in Brazil, but around the globe.

Yours sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Donna Strickland".

Donna Strickland, CC
Professor
University of Waterloo

Figura 2: Carta enviada pela cientista Donna Strickland para as estudantes participantes do TFM 2025.

¹<https://www.bbc.com/news/world-us-canada-45722890>

Movimento Meninas Olímpicas

O Movimento Meninas Olímpicas é uma iniciativa que incentiva a participação de meninas em olimpíadas científicas, principalmente de Matemática, Física e Computação. O movimento surgiu para enfrentar a baixa representatividade feminina nessas competições e, mais amplamente, nas áreas de STEM (Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática). Os principais objetivos são incentivar meninas a participar de olimpíadas científicas, oferecer mentoria, apoio e preparação para competições, criar uma rede de apoio entre estudantes e combater estereótipos de gênero nas áreas científicas. O movimento promove grupos de estudo, aulas e treinamentos específicos, além de eventos, palestras e encontros com mulheres cientistas e medalhistas, bem como a divulgação de oportunidades acadêmicas. Também ajuda meninas a ganharem confiança em disciplinas de exatas, conquistarem medalhas e bolsas, ingressarem em universidades de destaque e seguirem carreiras científicas.

O Movimento começou em 2015 com dois objetivos: mudar os rumos da educação pública brasileira, por meio da inserção da Computação na Educação Básica; e mudar a sub-representação das mulheres em espaços de poder, por meio do aumento da participação de meninas em olimpíadas de conhecimento na área de exatas.

Há 10 anos, criar uma nova disciplina na Educação Básica era algo impensável. A identificação da baixa representatividade de meninas, em torno de 10% das premiadas nas olimpíadas de conhecimento, foi uma descoberta impactante, bem como sua estreita relação com os apenas 10% de mulheres em espaços de poder.

A história começou em 2013, quando algumas meninas de 12 anos participaram de aulas na graduação de Computação e, surpreendentemente, apresentaram desempenho superior ao dos estudantes matriculados. Em 2014, a experiência foi repetida, e o resultado foi o mesmo. Tudo indicava que, aos 18 anos, havia maior dificuldade na compreensão dos fundamentos da Computação e que esse conteúdo deveria ser ensinado no Ensino Fundamental II, por volta dos 12 anos. Como resultado dessas experiências, as estudantes do Fundamental II começaram

a se destacar em olimpíadas de conhecimento.

Depois de um enorme esforço de convencimento, em 2016, as ideias começaram a tomar forma com a criação de uma Comissão de Computação na Educação Básica e do Movimento Meninas Olímpicas. A Comissão da Computação passou a trabalhar na definição de normas para a Computação na Educação Básica, e a Assembleia Legislativa do Rio Grande do Sul, com o apoio do Movimento Meninas Olímpicas, realizou a primeira homenagem às medalhistas de ouro do estado.

Duas visões de futuro consideradas improváveis se tornaram realidade em menos de uma década. Foi uma longa e desafiadora caminhada de quase uma década, mas, atualmente, a Computação é uma disciplina obrigatória na Educação Básica do Brasil, e as meninas são visíveis e protagonistas nas olimpíadas da área de exatas.

Essas duas ideias certamente mudarão os rumos da sociedade, tornando-a mais igualitária, inclusiva e inovadora.

O Movimento Meninas Olímpicas tem transformado o mundo olímpico, no qual as meninas sempre foram minoria e invisíveis. Hoje existe uma comunidade de Meninas Olímpicas no Brasil, devido ao fato de elas terem saído da invisibilidade por meio de ações afirmativas. O Prêmio Meninas Olímpicas, aprovado em cinco Assembleias Legislativas do Brasil, é um enorme avanço, pois coloca em evidência a importância da participação feminina nos espaços de conhecimento.

Os líderes do futuro serão formados por meio do conhecimento, e as olimpíadas são uma grande fonte de aprendizado. Por exemplo, Leda Braga, a primeira mulher brasileira a participar da IMO - Olimpíada Internacional de Matemática, foi considerada a mulher mais influente do mercado de fundos de hedge no mundo.

Impactos e expansão do Movimento Meninas Olímpicas em 2026

Em julho de 2026, o Movimento Meninas Olímpicas (MMO) completa 10 anos de existência, marcados por inúmeras ações e realizações. O Prêmio Meninas Olímpicas concedido pela Assembleia Legislativa do Rio Grande do Sul - ALRS também completará 10 edições, tendo

sido a primeira edição em 03 de novembro de 2016. Alcançamos 10 mil seguidoras em nosso perfil do Instagram, e mais de mil voluntárias se inscreveram no Movimento em 2026. Muito além de números, essas conquistas representam meninas impactadas, sonhos incentivados e o fortalecimento do nosso propósito. Cada passo dado é resultado da confiança, dedicação e parceria.

Nossa principal ação de 2026 é regionalizar o MMO por meio da criação de representações do movimento em cada estado brasileiro (<https://tfcbr.inf.ufsm.br/nossas-acoes/mmo-estaduais>).

Essa ação se fez necessária porque, atualmente, as olimpíadas estão excessivamente concentradas em poucos estados. Os estados de São Paulo e do Ceará concentram mais de 50% dos medalhistas das olimpíadas com valor acadêmico, enquanto os estados da região Norte possuem pequena participação. Nesse contexto, o objetivo da regionalização do Movimento é levar as oportunidades das olimpíadas a todos os municípios brasileiros.

Afinal, as meninas olímpicas de hoje serão as mulheres nos espaços de decisão do amanhã.

Estrutura da competição

Em 2025, o Torneio de Física para Meninas teve abrangência nacional, reunindo estudantes do ensino médio de escolas públicas e particulares. Ao longo de todas as fases e atividades, a participação foi inteiramente gratuita, garantindo amplo acesso às competidoras.

As estudantes participantes foram avaliadas com base no desempenho em duas fases da competição:

- (a) Uma prova objetiva com 15 (quinze) questões de múltipla escolha, realizada em formato digital através do sistema Olimpo². Com duração de 2 (duas) horas, esta fase foi aplicada para todas as participantes.
- (b) Uma prova dissertativa, composta por 5 (cinco) questões, aplicada presencialmente em polos distribuídos por todo o território nacional, com duração de 4 (quatro) horas. Participaram desta etapa apenas as estudantes que tiveram desempenho igual ou superior à nota de corte na fase anterior.

As provas do TFM são baseadas no programa estabelecido no Regulamento da Competição³. Em ambas as fases, são propostos problemas relacionados à área de pesquisa da cientista homenageada na edição (em 2025, a homenageada foi a cientista canadense Donna Strickland).

Paralelamente às provas, o TFM promove gratuitamente, em todas as edições, um curso de treinamento para as estudantes que desejam se aprimorar em Física. Em 2025, essa iniciativa foi ampliada, com início dois meses antes da primeira fase da competição. Além disso, as aulas foram ministradas por ex-participantes do torneio que se destacaram nas edições anteriores. Atuaram como professoras do curso as medalhistas:

- Amanda Miho Yazaki
- Ana Luiza Franco de Araújo
- Isabelle Marin Della Méa

²<https://olimpo.ifce.edu.br/>

³Disponível no site <https://tfcbr.inf.ufsm.br/olimpiadas/fisica>.

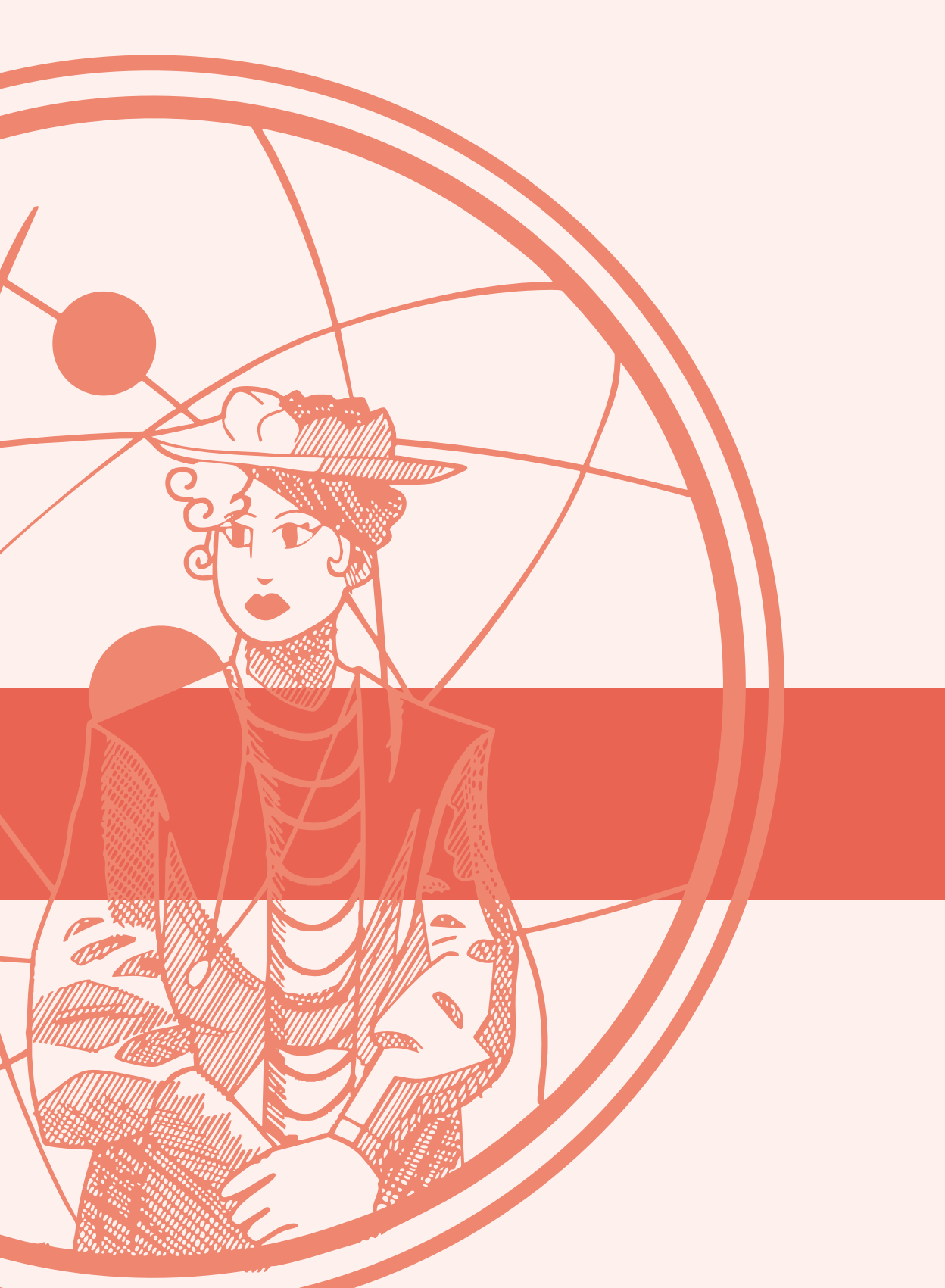
- Lívia Saraiva da Costa
- Lívia Tiemi Bidoia de Freitas
- Luiza Lanza Lopes Temponi

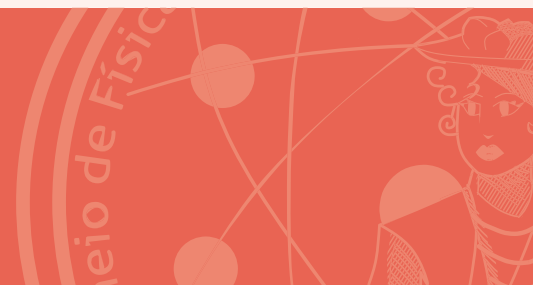
Na 2ª fase, as estudantes foram classificadas por série (1ª, 2ª e 3ª/4ª). Em cada série, foram estabelecidos critérios para a distribuição de medalhas de ouro, prata e bronze baseada no desempenho de cada grupo.

Além da premiação, o apoio da Sociedade Brasileira de Física amplia as oportunidades às participantes. Por meio desse apoio, 10 estudantes do 1º ano são classificadas para o processo Seletivo das Olimpíadas Internacionais de Física (SOIFs), enquanto 5 estudantes do 2º ano se classificam diretamente para a fase final, o Torneio Brasileiro de Física (TBF). Para essas etapas, as estudantes recebem treinamento específico, oferecido pela organização do TFM, com foco na preparação para as competições internacionais.

As estudantes do 3º e 4º anos do ensino médio foram convidadas a participar da Vivência Científica do IIF, uma atividade de imersão realizada nas dependências do Instituto Internacional de Física. A iniciativa reúne participantes que se destacaram em olimpíadas científicas e programas de formação de talentos, promovendo uma semana de interação com cientistas por meio de palestras, minicursos e oficinas. Ao longo da atividade, as estudantes também tiveram a oportunidade de apresentar seus trabalhos científicos.







1ª fase do TFM



Problema 1. A técnica da CPA (*Chirped Pulse Amplification* ou, numa tradução literal, Amplificação de Pulso Chirpado/Chilreado) foi desenvolvida pela cientista canadense Donna Strickland durante o seu doutorado, o que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física em 2018.

A técnica se baseia em esticar ou comprimir um feixe luminoso no tempo e espectro. Uma maneira de conseguir fazer isso é fazer o feixe luminoso atravessar um conjunto de grades ópticas que permitem a separação de diferentes frequências da luz, conforme indicado na figura, e que irão percorrer diferentes distâncias até serem recombinadas.

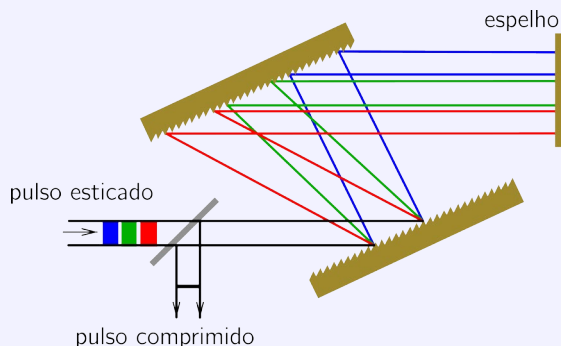


Figura 3: Separação das frequências de um feixe luminoso com o uso de grades ópticas.

O fenômeno físico que melhor descreve como a separação da luz ocorre é melhor descrito no item:

- (a) Refração, pois cada frequência da luz se propaga com velocidade diferente em meios materiais, causando sua separação.
- (b) Reflexão, pois a luz muda de direção ao incidir sobre superfícies inclinadas, separando-se em diferentes componentes.
- (c) Difração, pois as grades ópticas fazem com que diferentes comprimentos de onda se propaguem em direções distintas.
- (d) Interferência, pois a sobreposição das ondas luminosas gera padrões claros e escuros que separam as frequências.
- (e) nenhuma das alternativas anteriores.

Solução 1. [Alternativa (c)] As grades ópticas (ou redes de difração) funcionam com base no fenômeno da difração luminosa, que ocorre quando a luz interage com estruturas periódicas (como as ranhuras da grade). Essa interação causa a dispersão angular da luz conforme o comprimento de onda, ou seja, cada frequência (cor) da luz é desviada em um ângulo diferente, permitindo a separação espectral usada na técnica de CPA.

Problema 2. Para mostrar a todos o prêmio Nobel que recebeu pelas suas contribuições à Física, a cientista Donna Strickland decidiu pendurar na parede de seu escritório o seu certificado em um quadro conforme mostrado na figura.



Figura 4: Ilustração de um quadro com o certificado de prêmio Nobel de Física conferido à cientista Donna Strickland, pendurado numa parede.

No quadro estão indicadas as dimensões $d = 10,0$ cm, $D = 30$ cm e $\ell = 13$ cm. Considerando que a massa do conjunto é 720 g e que a aceleração gravitacional local vale 10 m/s^2 , a força de tração em cada barbante utilizado para pendurar o quadro é melhor expressa em:

- (a) 1,7 N
- (b) 3,9 N
- (c) 4,7 N

(d) 9,4 N

(e) nenhuma das alternativas anteriores.

Nota: Assuma que o barbante foi preso no centro do quadro.

Solução 2. [Alternativa (b)] Na figura a seguir está mostrado o diagrama de corpo livre para o quadro, nele está indicada a força total devido às duas cordas ($2T$).

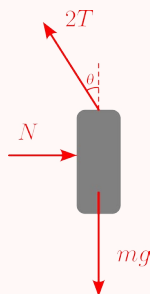


Figura 5: Diagrama do corpo livre para o quadro pendurado na parede.

A condição de equilíbrio na direção vertical nos fornece a equação:

$$2 \cdot T \cdot \cos \theta = mg \Rightarrow T = \frac{mg}{2 \cos \theta}$$

Sendo $\sin \theta = d/2\ell \Rightarrow \cos \theta = \sqrt{1 - (d/2\ell)^2}$, obtemos:

$$T = \frac{mg}{2\sqrt{1 - (d/2\ell)^2}} = 3,9 \text{ N}$$

Problema 3. A ideia de construir um sistema capaz de comprimir ou esticar um pulso luminoso visa garantir que o meio de propagação da luz não seja danificado na passagem de feixes de alta potência. Ao comprimir temporalmente um feixe luminoso, a energia irá se distribuir no campo eletromagnético que terá valores aumentados para garantir a conservação de energia.

Foi dessa maneira que surgiu a técnica CPA. Para ilustrar o que ocorre com um feixe luminoso ao utilizar essa técnica, analise o que é apresentado na figura a seguir. Nela estão ilustrados o campo

elétrico e a intensidade (potência por unidade de área) para dois pulsos luminosos que passam pelo processo de amplificação.

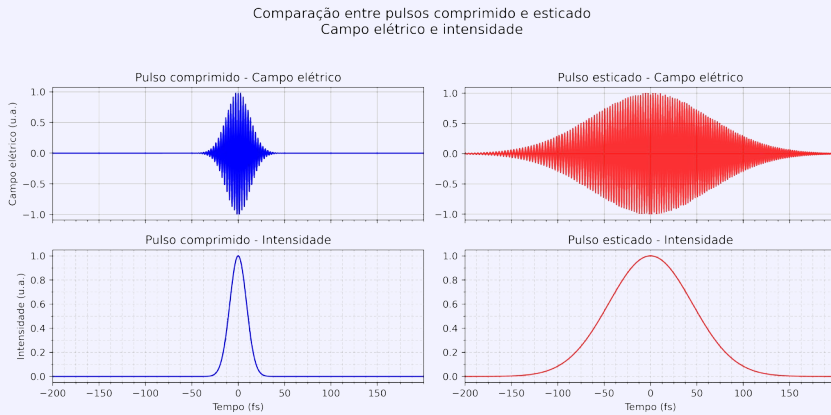


Figura 6: Intensidade e campo elétrico, em unidades arbitrárias, de um feixe luminoso em diferentes etapas da aplicação da técnica CPA, ilustrando a modificação da largura do feixe.

Costuma-se definir a largura do feixe (representada por τ) como sendo a largura temporal entre os instantes em que o pulso atinge metade do seu valor máximo (também conhecida como FWHM, da sigla em inglês). Considerando a figura anterior, a razão entre as larguras temporais dos dois feixes é melhor representada pelo item:

- (a) $\tau_2/\tau_1 = 8$
- (b) $\tau_2/\tau_1 = 4$
- (c) $\tau_2/\tau_1 = 2$
- (d) $\tau_2/\tau_1 = 1$
- (e) nenhuma das alternativas anteriores.

Solução 3. [Alternativa (b)] Para determinar a largura dos feixes basta extrair das figuras o intervalo de tempo, dado pela distância horizontal, entre os instantes em que o feixe tem intensidade 0,5 u.a. Fazendo isso obtemos para o pulso comprimido $\tau_1 = 25$ fs e para o pulso esticado $\tau_2 = 100$ fs. Dessa maneira, a razão entre as larguras é $\tau_2/\tau_1 = 4$.

Problema 4. Para se ter uma ideia da ordem de grandeza das intensidades atingidas por lasers de femtosegundos, possíveis graças ao uso da técnica da CPA considere a seguinte analogia.

O Sol emite radiação na sua superfície a uma intensidade luminosa $6,4 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ e possui uma temperatura de cerca de 5600 K .

A intensidade luminosa para um laser de femtosegundos pode atingir valores da ordem de $10^{15} - 10^{18} \text{ W/m}^2$. Supondo que o Sol pudesse emitir radiação a uma intensidade $I = 64 \times 10^{14} \text{ W/m}^2$, típica de um laser de femtosegundos, qual seria a temperatura na sua superfície?

- (a) $5,6 \times 10^5 \text{ K}$
- (b) $5,6 \times 10^6 \text{ K}$
- (c) $5,6 \times 10^7 \text{ K}$
- (d) $5,6 \times 10^8 \text{ K}$
- (e) nenhuma das alternativas anteriores.

Solução 4. [Alternativa (a)] A intensidade da radiação emitida é proporcional à quarta potência da temperatura do Sol, i.e. $I \sim T^4$. Neste caso, temos:

$$\frac{I_{laser}}{I_{Sol}} = \left(\frac{T}{T_{Sol}} \right)^4 \Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{I_{laser}}{I_{Sol}}} \cdot T_{Sol}$$

E, utilizando os valores do enunciado, a temperatura T na superfície do Sol seria:

$$T = \sqrt[4]{\frac{6,4 \cdot 10^{15}}{6,4 \cdot 10^7}} \cdot 5,6 \cdot 10^3 \text{ K}$$

$$T = 5,6 \cdot 10^5 \text{ K}$$

Problema 5. Uma das ideias básicas na técnica da CPA é produzir um *chirp* no pulso luminoso. Isso significa que a posição relativa entre as frequências no pulso é alterada.

Para ilustrar isso, considere o que ocorre com duas componentes de frequência num pulso luminoso conforme indicado na figura a seguir, na qual estão indicados as distâncias temporais τ_1 e τ_2 entre os pulsos (ambas positivas).

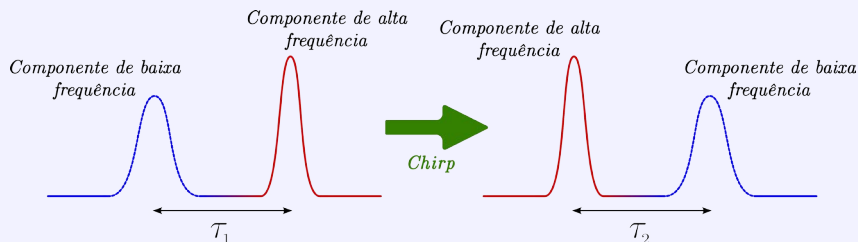


Figura 7: Mudança na posição relativa entre as frequências de luz que compõem um pulso luminoso.

Supondo que, para produzir esse efeito, foi utilizado um meio material pelo qual o pulso se propaga e que este meio possui um índice de refração n_+ para a componente de alta frequência e n_- para uma componente de baixa frequência.

Sobre a relação entre n_+ e n_- é correto afirmar que:

- (a) $n_+ \cdot \tau_1 = n_- \cdot \tau_2$
- (b) $n_+ \cdot \tau_2 = n_- \cdot \tau_1$
- (c) $n_- > n_+$
- (d) $n_+ > n_-$
- (e) nenhuma das alternativas anteriores.

Solução 5. [Alternativa (d)] Para que haja a mudança nas posições relativas conforme indicado na figura do enunciado, é preciso que a velocidade das componentes de baixas frequências (v_-) seja maior que a das componentes de altas frequências (v_+), ou seja $v_- > v_+$. Sabendo que o índice de refração de um meio $n = c/v$ é inversamente proporcional à velocidade da luz no mesmo, obtemos $n_+ > n_-$.

Problema 6. Nesta edição, a cientista homenageada pelo TFM foi a física canadense Donna Strickland. Ela foi a terceira mulher na história a ser agraciada com o prêmio Nobel de Física, tendo recebido a condecoração em 2018.

Seu trabalho na construção de lasers de pulsos ultracurtos utilizando a técnica de CPA revolucionou a ciência por permitir uma maior aplicação dos lasers em diversos contextos.

Uma dessas aplicações é a cirurgia *LASIK*. Nessa cirurgia o feixe do laser de femtosegundos é focalizado próximo à superfície da córnea e a alta densidade de energia rompe as ligações atômicas permitindo a criação de um *flap* ou retalho corneano sem aquecer o tecido. Depois, com a ajuda de outro laser a curvatura da córnea é corrigida.

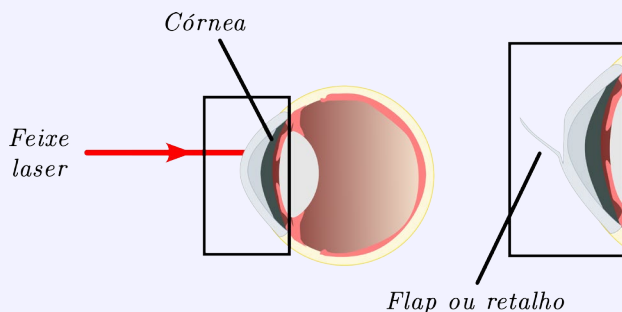


Figura 8: Diagrama da ação do laser de femtosegundos na preparação para uma cirurgia de correção ocular.

Numa cirurgia como essa é utilizado um laser com taxa de repetição $f = 1,0$ kHz (essa é a taxa com a qual os pulsos são emitidos) e potência $P = 5,0$ W. A largura do pulso luminoso é cerca de $\delta t = 30$ fs e no foco a cintura do feixe chega a $w = 4,0$ μm , conforme indicada na figura.

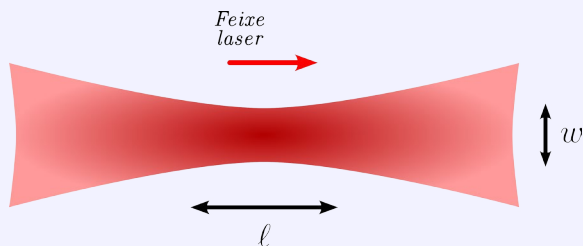


Figura 9: Perfil de focalização do feixe luminoso.

Considerando que próximo à região de focalização, o feixe é aproximadamente cilíndrico (de comprimento ℓ e diâmetro da base circular w , veja a figura) e tem velocidade $u = 2,0 \cdot 10^8$ m/s, a densidade de energia nessa região é melhor expressa no item:

- (a) $1,0 \cdot 10^{16}$ J/m³
- (b) $1,0 \cdot 10^{14}$ J/m³
- (c) $2,3 \cdot 10^{13}$ J/m³
- (d) $6,6 \cdot 10^{13}$ J/m³
- (e) nenhuma das alternativas anteriores.

Solução 6. [Alternativa (d)] De acordo com o enunciado, podemos inferir que a potência do laser é dada pela energia total de cada pulso luminoso (ε) multiplicada pelo número de pulsos por unidade de tempo f (taxa de repetição), ou seja, $P = \varepsilon \cdot f$. Desta maneira, a energia armazenada em cada pulso é dada por $\varepsilon = P/f$.

Na região do foco, o volume é dado por $\Omega = \ell \cdot \pi(w/2)^2$. A largura temporal do pulso pode ser convertida em largura espacial usando que $\ell = u \cdot \delta t$. Sendo assim, $\Omega = (\pi/4)u \cdot \delta t \cdot w^2$.

Dessa maneira, a densidade de energia do feixe no foco é:

$$\rho = \frac{\varepsilon}{\Omega} = \frac{4P}{\pi \cdot u \cdot \delta t \cdot f \cdot w^2} = 6,63 \cdot 10^{13} \text{ J/m}^3.$$

Problema 7. Com um maior conhecimento das propriedades dos materiais, alcançado através da aplicação dos conceitos de mecânica quântica, foi possível construir dispositivos que utilizamos no nosso cotidiano. Um desses exemplos é o LED (*light emitting diode*), que é uma fonte que utiliza um mecanismo de recombinação quântica para emitir luz em faixas do espectro mais estreitas que as lâmpadas incandescentes convencionais.

Esses dispositivos operam em faixas de tensão estreitas, o que significa que caso a tensão elétrica sobre eles seja muito baixa, não há emissão de luz, mas caso seja muito alta, ele pode ser danificado e parar de emitir luz.

Na figura a seguir está ilustrado um circuito elétrico fictício



que consiste em uma fonte de tensão elétrica ideal $\varepsilon = 3,50 \text{ V}$, um resistor variável R_x e um LED A .

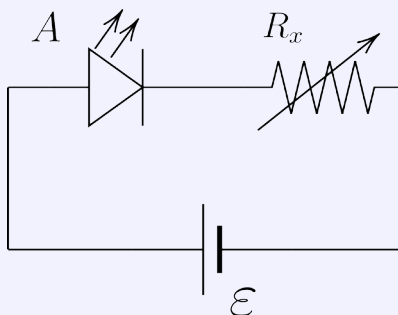


Figura 10: Diagrama de um circuito elétrico para LEDs.

Considere que as características nominais de tensão e corrente elétrica, respectivamente, para o funcionamento correto do LED A no brilho mínimo são $V_1 = 1,75 \text{ V}$ e $5,00 \text{ mA}$ e no brilho máximo $V_2 = 2,05 \text{ V}$ e $20,0 \text{ mA}$. A faixa de valores que a resistência variável pode assumir para que o LED funcione corretamente é melhor expressa no item:

- (a) $103 \Omega \leq R_x \leq 350 \Omega$
- (b) $87,5 \Omega \leq R_x \leq 410 \Omega$
- (c) $72,5 \Omega \leq R_x \leq 350 \Omega$
- (d) $87,5 \Omega \leq R_x \leq 290 \Omega$
- (e) nenhuma das alternativas anteriores.

Solução 7. [Alternativa (c)] Analisando o enunciado do problema, quando o LED estiver com o brilho mínimo o resistor estará sujeito a uma tensão $3,50 - 1,75 = 1,75 \text{ V}$ e a uma corrente elétrica de $5,00 \text{ mA}$. Neste caso, a resistência necessária será $R_1 = 1,75/0,005 = 350 \Omega$.

Na situação de brilho máximo, a tensão sobre o resistor será $3,50 - 2,05 = 1,45 \text{ V}$ e a corrente elétrica de 20 mA . Nesta situação, a resistência elétrica deverá ser $R_2 = 1,45/0,020 = 72,5 \Omega$.

Portanto, o LED irá operar na sua faixa correta se

$$72,5 \Omega \leq R_x \leq 350 \Omega.$$

Problema 8. Percebeu-se que o LED do problema anterior apresentava um **defeito de fabricação**, o que resultou numa curva característica de corrente (I) contra tensão (V) não convencional nos seus terminais. As medidas experimentais para esta curva estão indicadas no gráfico a seguir.

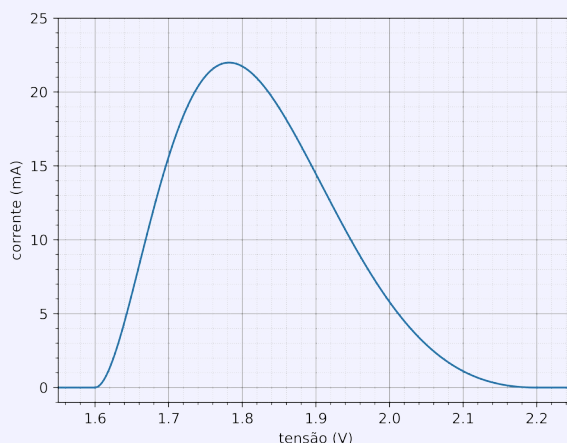


Figura 11: Curva de corrente (I) contra tensão (V) para um LED defeituoso.

Considerando que a eficiência de conversão de energia elétrica em energia luminosa para este LED seja de 60% em todo o intervalo considerado, de acordo com a curva mostrada, a potência luminosa do LED quando a corrente elétrica for máxima é dada por aproximadamente:

- (a) 23 mW
- (b) 39 mW
- (c) 70 mW
- (d) 86 mW
- (e) nenhuma das alternativas anteriores.

Solução 8. [Alternativa (a)] O valor máximo de corrente elétrica $I_M = 22$ mA pode ser obtido diretamente do gráfico fornecido. A tensão elétrica sobre os terminais do LED nessa situação é $V = 1,78$ V. A potência elétrica



dissipada pelo LED é dada por $P = I \cdot U = 39,16 \text{ mW}$ e, como a eficiência é de 60% a potência luminosa é dada por $P_l = 23,496 \approx 23 \text{ mW}$.

Problema 9. Assim como a luz pode apresentar propriedades corpusculares, a matéria pode apresentar propriedades ondulatórias. Isso pode ser expresso pela hipótese de De Broglie na qual uma partícula com momento linear p tem uma onda de matéria com comprimento de onda $\lambda = h/p$ associada à mesma. Nesta expressão, h é a constante de Planck.

Uma maneira de explorar isso é através do uso de microscópios eletrônicos. Nesse tipo de equipamento a interferência do elétrons em detectores pode ser utilizada para reproduzir, por exemplo, a morfologia de determinados materiais. Um diagrama simplificado para esse tipo de equipamento está mostrado na figura a seguir.

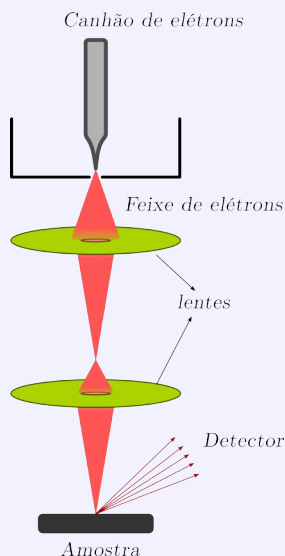


Figura 12: Diagrama simplificado de um microscópio eletrônico.

Considere a situação ideal na qual uma amostra cristalina com distância interatômica $d = 0,66 \text{ \AA}$ é analisada com um feixe de elétrons acelerados por uma diferença de potencial U .

No equipamento ilustrado, para ter uma boa resolução da amostra é preciso que o comprimento de onda da onda de matéria associada aos elétrons seja da mesma ordem dessa distância interatômica. Neste caso, a ddp mínima que permite uma boa resolução da amostra é melhor expressa em:

- (a) 52 V
- (b) 170 V
- (c) 340 V
- (d) 17 kV
- (e) nenhuma das alternativas anteriores.

Nota: Você pode desconsiderar efeitos relativísticos neste problema e considerar os seguintes valores - constante de Planck $h = 6,6 \times 10^{-34}$ J·s, massa do elétron $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$ kg e carga elementar $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C.

Solução 9. [Alternativa (c)] O comprimento de onda associado ao elétron é dado pela expressão $\lambda = h/p$ em que h é a constante de Planck e p é o momento do elétron. O momento pode ser obtido a partir da conservação da energia $eU = p^2/2m_e$ da qual obtemos $p = \sqrt{2m_e eU}$ e, portanto:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}}$$

Como, pelo enunciado, desejamos que $\lambda \sim d$, temos:

$$d \sim \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}} \Rightarrow U \sim \frac{h^2}{2m_e e d^2}$$

E, portanto:

$$U \sim 340\text{V}$$

Problema 10. Neste ano que é comemorado o centenário da mecânica quântica, relembremos o modelo atômico de Bohr para o átomo de hidrogênio: importante para contribuir com a intuição de quantização da energia e, posteriormente, da dualidade onda partícula da matéria. Neste modelo, a energia do sistema elétron + próton pode ser escrita como:



$$E = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

Nessa expressão, o número principal n indica o estado do átomo e, de acordo com a hipótese de de Broglie, posteriormente pôde ser associado ao número inteiro de comprimentos de onda associados ao elétron que cabem na “trajetória clássica”.

Na figura a seguir está ilustrado o processo de emissão de um fóton de um estado mais energético para um estado menos energético.

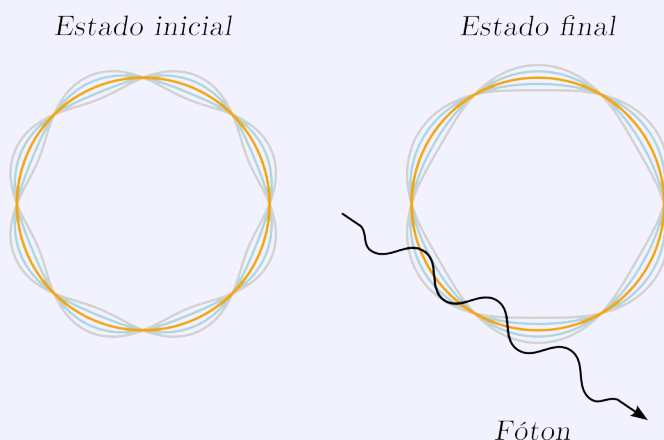


Figura 13: Diagrama do processo de emissão no modelo de Bohr.

Com esse modelo foi possível explicar parcialmente o espectro atômico do átomo de hidrogênio. No processo ilustrado na figura, a frequência do fóton emitido pelo átomo é melhor expresso no item:

- (a) $0,4 \times 10^{14} \text{ Hz}$
- (b) $1,2 \times 10^{14} \text{ Hz}$
- (c) $1,6 \times 10^{14} \text{ Hz}$
- (d) $2,8 \times 10^{14} \text{ Hz}$
- (e) nenhuma das alternativas anteriores.

Dado: constante de Planck $h = 4,1 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$.

Solução 10. [Alternativa (c)] Analisando a figura do problema é possível notar que o estado inicial tem $n_i = 4$ e o estado final tem $n_f = 3$. Os comprimentos de onda para cada um desses estados estão indicados na figura a seguir:

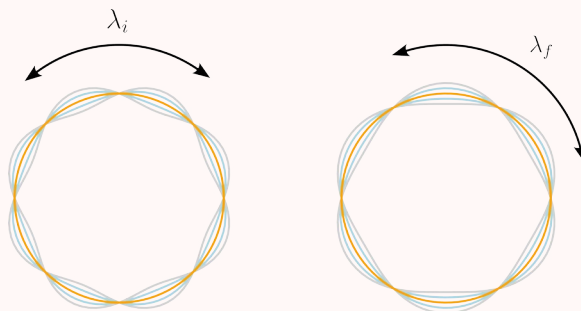


Figura 14: Ilustração do comprimento de onda nos estados inicial (λ_i) e final (λ_f) do átomo.

Sabemos que a perda de energia do átomo se converte em energia para o fóton e, portanto:

$$hf = E_i - E_f = \frac{13,6}{n_f^2} - \frac{13,6}{n_i^2}$$

$$4,1 \cdot 10^{-15} \cdot f = \frac{13,6}{3^2} - \frac{13,6}{4^2}$$

$$f = 1,6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Problema 11. Atualmente, a miniaturização de componentes eletrônicos como chips tornou possível a criação de celulares e diversos outros dispositivos usados no dia a dia. Um dos desafios enfrentados ao miniaturizar esses componentes se deve às propriedades quânticas da matéria que ficam cada vez mais evidentes na micro escala.

Um dos motivos para isso é que, ao contrário do que se espera com a teoria clássica da Física, a teoria quântica da matéria prevê que não é possível localizar uma partícula e seu momento linear simultaneamente com precisão perfeita. Isso significa que numa de-



terminada medida estão associadas uma incerteza na posição Δx e uma incerteza no momento linear Δp , e estas devem satisfazer à *relação de incerteza*:

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$$

na qual h é a constante de Planck. A partir dessa expressão, uma boa estimativa para a ordem de grandeza da energia cinética mínima associada a um elétron quando este está confinado numa região de comprimento $L = 1 \text{ nm}$ é melhor expressa em:

- (a) 10^{-34} J
- (b) 10^{-31} J
- (c) 10^{-26} J
- (d) 10^{-21} J
- (e) nenhuma das alternativas anteriores.

Dados: constante de Planck $h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, massa do elétron $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

Solução 11. [Alternativa (d)] Para obter uma estimativa da energia cinética na situação descrita, podemos usar que $\Delta x \sim L$ e, portanto:

$$\Delta p \sim \frac{h}{4\pi L}$$

Podemos estimar que a energia cinética seja dada por:

$$E_c \sim \frac{\Delta p^2}{2m_e} \sim \frac{h^2}{32\pi^2 m_e L^2}$$

Substituindo os valores dados no enunciado obtemos $E_c \sim 1,5 \times 10^{-21} \text{ J} \sim 10^{-21} \text{ J}$.

Problema 12. Um pêndulo simples é um sistema composto por uma massa presa a um fio leve, conforme indicado na figura a seguir, e que ao ser perturbado executa um movimento oscilatório.

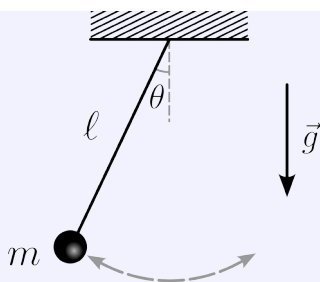


Figura 15: Diagrama de um pêndulo simples.

Sob a condição de pequenas oscilações (ângulo θ pequeno), o pêndulo executa um Movimento Harmônico Simples (MHS) e seu período de oscilação T depende da aceleração gravitacional local g e do seu comprimento ℓ através da equação:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}.$$

Analisando os gráficos da figura a seguir

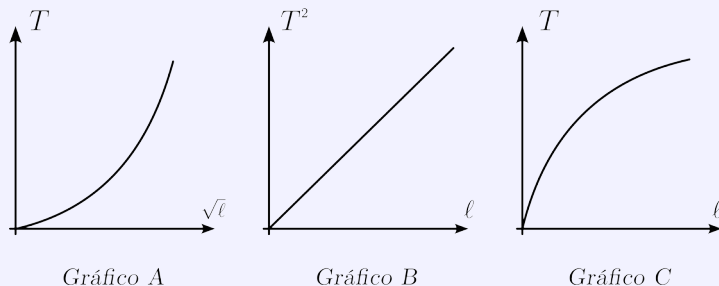


Figura 16: Ilustração da dependência do período T de oscilação de um pêndulo simples com o comprimento do fio ℓ .

indique qual dos itens a seguir melhor representa a dependência de T contra ℓ .

- (a) A dependência correta está melhor indicada apenas no gráfico A.
- (b) A dependência correta está melhor indicada nos gráficos A e B.

- (c) A dependência correta está melhor indicada apenas no gráfico B.
- (d) A dependência correta está melhor indicada nos gráficos B e C.
- (e) nenhuma das alternativas anteriores.

Solução 12. [Alternativa (d)] A expressão de T como função de ℓ pode ser escrita como:

- $T^2 \propto \ell$ - reta (Gráfico B)
- $T \propto \sqrt{\ell}$ - parábola com eixo na direção x (Gráfico C)

Problema 13. Na figura a seguir estão indicadas em escala três ondas (de campo elétrico, numa corda, e numa mola).

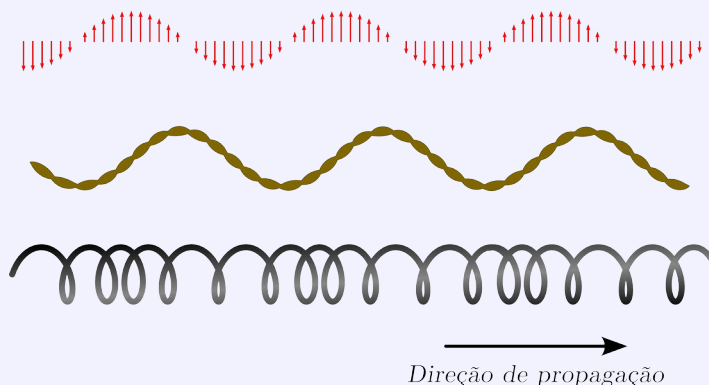


Figura 17: Ilustração da propagação de uma onda de campo elétrico, em uma corda e em uma mola.

Qual dos itens a seguir melhor indica qual a propriedade igual nas ondas representadas pelos três exemplos?

- (a) frequência
- (b) comprimento de onda
- (c) polarização
- (d) amplitude
- (e) nenhuma das alternativas anteriores.

Solução 13. [Alternativa (b)] Pelas figuras, o comprimento de onda das ondas é o mesmo. Não é possível indicar se a frequência é a mesma, já que não sabemos, por exemplo, a velocidade das ondas. As ondas na corda e na mola, por exemplo, são exemplos de uma onda transversal e longitudinal, respectivamente, e, por este motivo, não possuem a mesma polarização. A amplitude da onda de campo elétrico é medida em unidades distintas daquelas da onda na corda e, portanto, não podem ser idênticas.

Problema 14. A figura a seguir ilustra uma situação em que uma mola de constante elástica $k = 5,0 \text{ N/m}$ está inicialmente relaxada e ligada a um bloco de massa $m = 1,0 \text{ kg}$. Ao bloco de massa m está em contato um conjunto de massas $M_1 = 4,0 \text{ kg}$ e $M_2 = 6,0 \text{ kg}$. Todos os blocos estão inicialmente em repouso.

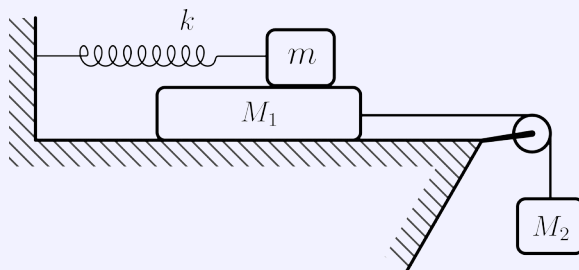


Figura 18: Sistema massa-mola acoplado a uma polia fixa.

A mola, o fio e a polia podem ser considerados como ideais, mas há atrito na superfície de contato entre os blocos de massa M_1 e m , apenas. O coeficiente de atrito é $\mu = 0,60$.

Após o sistema iniciar o movimento, indique qual dos itens a seguir melhor representa a distensão da mola quando o bloco de massa m passar a deslizar sobre o bloco de massa M_1 .

Nota: Adote a aceleração da gravidade local $g = 10 \text{ m/s}^2$.

- (a) $\Delta\ell = 1,2 \text{ cm}$
- (b) $\Delta\ell = 12 \text{ cm}$
- (c) $\Delta\ell = 1,2 \text{ m}$
- (d) $\Delta\ell = 2,4 \text{ m}$
- (e) nenhuma das alternativas anteriores.



Solução 14. [Alternativa (b)] No momento que o bloco de massa m passar a se mover sobre o bloco de massa M_1 a força de atrito será máxima, e valerá, portanto $f_{at} = \mu \cdot m \cdot g$. O diagrama do corpo livre para os blocos, conforme indicados na figura, nos fornecem:

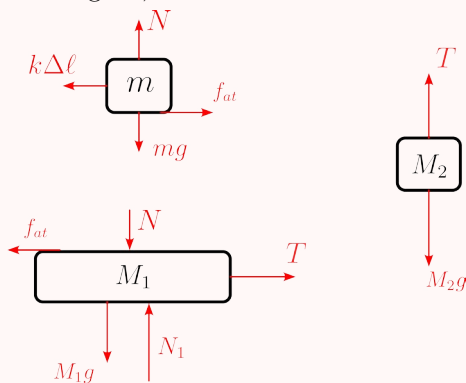


Figura 19: Diagrama de corpo livre para os blocos em movimento.

$$f_{at} - k\Delta\ell = m \cdot a$$

$$T - f_{at} = M_1 \cdot a$$

$$M_2 \cdot g - T = M_2 \cdot a$$

Utilizando o valor da força de atrito na situação crítica e as equações anteriores, obtemos:

$$\Delta\ell = \frac{[\mu(M_1 + M_2 + m) - M_2] \cdot m \cdot g}{k \cdot (M_1 + M_2)}$$

Substituindo os valores do enunciado, temos:

$$\Delta\ell = \frac{[0,6 \cdot (4,0 + 6,0 + 1,0) - 6,0] \cdot 1,0 \cdot 10 \text{ m}}{5,0 \cdot (4,0 + 6,0)}$$

$$\Delta\ell = 0,12 \text{ m} = 12 \text{ cm}$$

Problema 15. Ao final dessa prova, é preciso recuperar as energias. Para isso, preparamos um cafezinho que será despejado na nossa xícara que comporta 50 ml. Percebemos que ao despejar o café na xícara o líquido a atinge com uma velocidade $u = 60 \text{ cm/s}$ e a

seção transversal do jato de café é aproximadamente um círculo de diâmetro $d = 5,0 \text{ mm}$.



Figura 20: Enchendo uma xícara de café.

O tempo necessário para encher a xícara é aproximadamente:

- (a) $\Delta t = 4,2 \text{ s}$
- (b) $\Delta t = 2,1 \text{ s}$
- (c) $\Delta t = 1,1 \text{ s}$
- (d) $\Delta t = 0,042 \text{ s}$
- (e) nenhuma das alternativas anteriores.

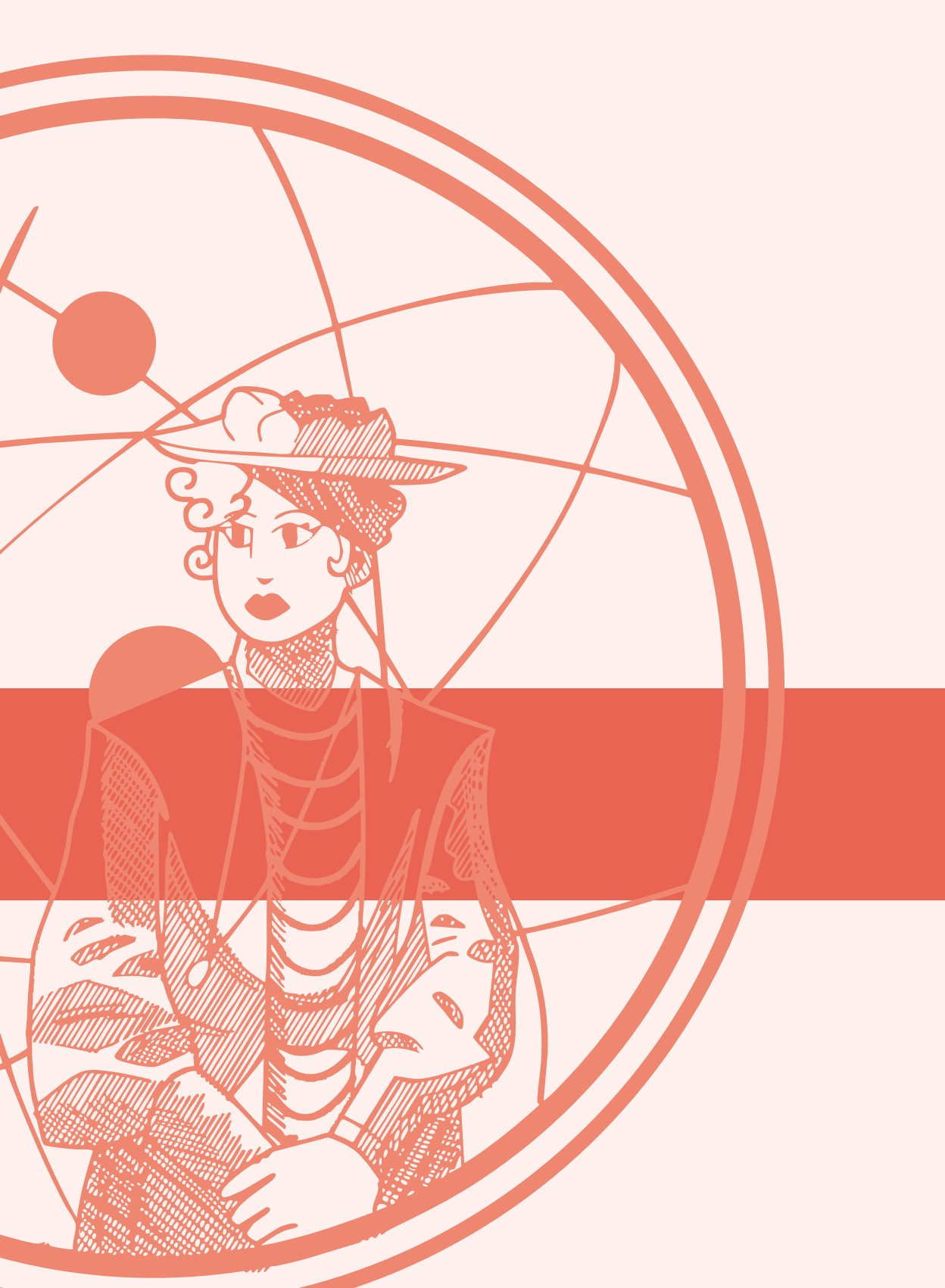
Solução 15. [Alternativa (a)] O fluxo de café na xícara é dado por $\varphi = S \cdot u$, em que S é a área de seção transversal da corrente e u é a velocidade do café. Como a xícara possui volume $V = 50 \text{ ml}$, temos:

$$\Delta t = \frac{V}{\varphi} = \frac{V}{\pi \frac{d^2}{4} \cdot u} = \frac{4 \cdot V}{\pi d^2 \cdot u}$$

Substituindo os valores fornecidos no enunciado, temos:

$$\Delta t = \frac{4 \cdot 50}{\pi \cdot 0,5^2 \cdot 60} \text{ s}$$

$$\Delta t = 4,2 \text{ s}$$





2ª fase do TFM



Problema 1 - Associação de molas (20 pontos)

Considere o sistema massa mola indicado na fig. 21. No sistema, uma das molas de constante elástica $k_1 = 1,0 \text{ N/m}$ tem uma extremidade fixa em uma parede e a outra ligada a um bloco de massa $m = 3,0 \text{ kg}$. O bloco ainda está preso a uma mola de constante elástica $k_2 = 2,0 \text{ N/m}$ e cuja extremidade livre é puxada com uma velocidade $v = 6,0 \text{ cm/s}$.

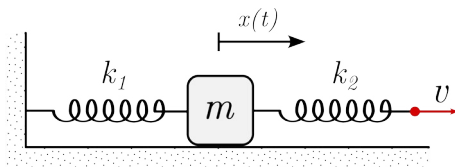


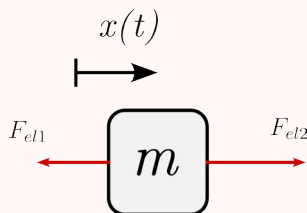
Figura 21: Movimento de um bloco de massa m sob a ação da força de duas molas.

Inicialmente as molas estão relaxadas e o bloco está em repouso.

- 1.a** Determine a aceleração do bloco como função do tempo t e do deslocamento $x(t)$ da massa com relação à sua posição inicial.

Solução 1.a:

O bloco de massa m está sujeito à força elástica das duas molas, conforme indicado na figura.



Neste caso, a aceleração do bloco é dada por:

$$ma = F_{el2} - F_{el1}$$

A força elástica pode ser escrita como $F_{el} = k\Delta\ell$, em que $\Delta\ell$ é a distensão da mola. No caso do problema, as distensões são dadas por:

$$\Delta \ell_1 = x(t), \quad \text{e} \quad \Delta \ell_2 = vt - x(t)$$

De maneira que:

$$ma = k_2(vt - x) - k_1x$$

$$a = -\frac{k_1 + k_2}{m} \left[x - \left(\frac{k_2}{k_1 + k_2} \right) vt \right]$$

$$a = -(x - 0,04t) \quad (\text{SI})$$

1.b Determine a posição x da partícula como função do tempo t .

Solução 1.b:

O mesmo problema pode ser analisado a partir de um referencial $\mathcal{S}'$ que se move com velocidade $w = k_2v/(k_1 + k_2) = 0,04 \text{ cm/s}$. A posição do objeto medida nesse referencial será dada por:

$$x' = x - \left(\frac{k_2}{k_1 + k_2} \right) vt = x - 0,04t$$

Como esse ainda é um referencial inercial, a aceleração será dada por:

$$a' = -x'$$

E, portanto, o bloco irá realizar um MHS no referencial $\mathcal{S}'$. Sua posição será dada por:

$$x' = A \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

Aqui $\omega = \sqrt{m/(k_1 + k_2)} = 1 \text{ rad/s}$ é a frequência angular do movimento, A é a amplitude e φ a fase inicial, que devem ser determinadas pelas condições iniciais do problema. Para fazer isso, podemos retornar ao referencial original e obter:

$$x(t) = A \cdot \text{sen}(t + \varphi) + 0,04t$$

$$u(t) = A \cdot \cos(t + \varphi) + 0,04$$

Conforme indicado no enunciado, a partícula está inicialmente em repouso com $x(0) = 0$ e $u(0) = 0$, logo:

$$\begin{aligned} x(0) = 0 &\Rightarrow A \cdot \sin\varphi = 0 \\ u(0) = 0 &\Rightarrow A \cdot \cos(\varphi) + 0,04 = 0 \end{aligned}$$

Para satisfazer as duas equações é preciso que $\varphi = 0$ e $A \neq 0$ e, portanto:

$$A = -0,04 \text{ m}$$

Obtemos então

$$x(t) = -0,04 \cdot \sin(t) + 0,04t = 0,04[t - \sin(t)]$$

1.c Em que instante t_0 o bloco irá atingir a velocidade $u = 4,0$ cm/s pela primeira vez?

Solução 1.c:

Partindo da expressão para a posição, podemos obter a expressão para a velocidade do bloco como:

$$u(t) = 0,04 [1 - \cos(t)]$$

Para que $u(t) = 0,04$ cm/s é preciso que $\cos(t) = 0$, logo:

$$t_0 = \frac{\pi}{2} \text{ s}$$

1.d Mostre que o bloco nunca passa duas vezes pelo mesmo ponto.

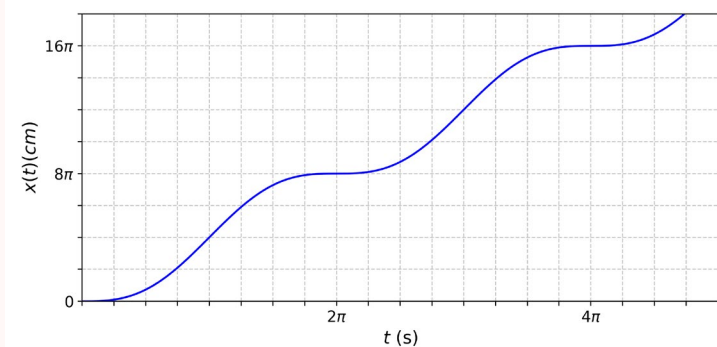
Solução 1.d:

A velocidade do bloco é sempre ≥ 0 . Portanto, ele não executa um movimento de vai e vem, passando por cada posição apenas uma vez.

1.e Faça um esboço do gráfico de $x(t)$ indicando instantes de tempo e posições características.

Solução 1.e:

Os instantes característicos são aqueles nos quais a velocidade da partícula se anula, i.e. $t = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$



Problema 2 - Medindo a temperatura (20 pontos)

Sem muito o que fazer no laboratório e na expectativa de medir a temperatura de uma barra metálica com maior precisão, uma estudante decidiu montar o aparato indicado na figura 22. Nele, uma barra com coeficiente de dilatação térmica linear $\alpha = 2,50 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ está acoplada a uma fonte luminosa que emite luz igualmente em todas as direções com comprimento de onda $\lambda = 500 \text{ nm}$. No sistema há ainda dois espelhos planos ideais E_1 e E_2 e um detector de luz.

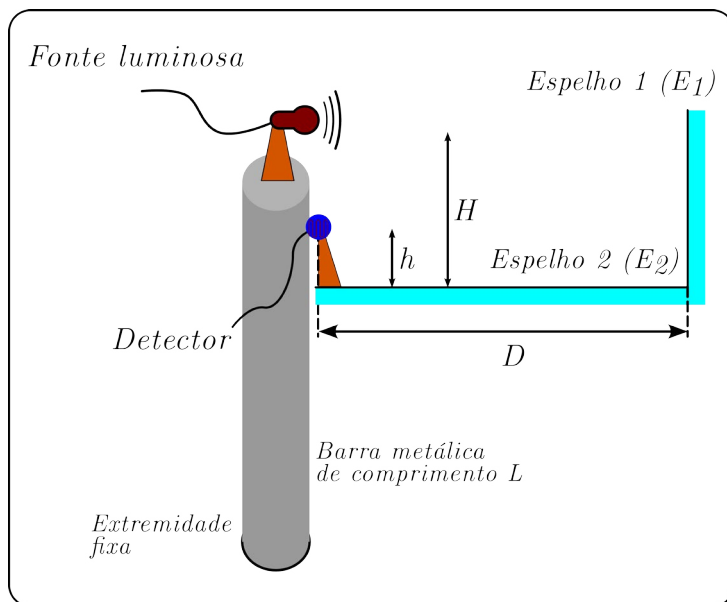


Figura 22: Montagem para um sistema de medição de temperatura: uma fonte luminosa presa à extremidade livre de uma barra metálica e detector fixo sobre o espelho, ambos se encontram sempre na mesma linha vertical.

À temperatura $T_0 = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ o comprimento da barra é $L = 0,80 \text{ m}$.

- 2.a** Determine o comprimento L da barra metálica como função da temperatura T da mesma. *Nota: em todo o problema iremos considerar que $T \geq 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$.*

Solução 2.a:

Sendo $L_0 = 0,80$ m o comprimento da barra em $T = 0$, conforme o enunciado, o comprimento da barra pode ser obtido a partir do coeficiente de dilatação α através de:

$$L = L_0 + L_0\alpha T = L_0 (1 + \alpha T)$$

$$L(T) = 0,8 \cdot (1 + 2,5 \cdot 10^{-5} T)$$

2.b Qual deve ser a temperatura para que o comprimento da barra aumente em 1%?

Solução 2.b:

Para que isso ocorra é preciso que:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} = \alpha T = 0,01$$

Portanto:

$$T = \frac{0,01}{\alpha} = \frac{0,01}{2,5 \cdot 10^{-5}} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2.c Caso a fonte seja colocada próxima ao espelho E_2 ($H = 0$), o que será medido: um máximo ou mínimo de intensidade luminosa? *Justifique a sua resposta.*

Solução 2.c:

Nessa situação, a luz que chegará ao detector será proveniente de dois caminhos que tem praticamente o mesmo comprimento mas diferem nas reflexões nos espelhos. Os dois caminhos são: i) a luz que reflete apenas no espelho 1 e ii) a luz que reflete nos espelhos 1 e 2.

A cada reflexão, a luz inverte a sua fase, desta maneira ao atingir o detector um dos raios estará com a fase invertida com relação ao outro e, portanto, será detectado um mínimo de intensidade.

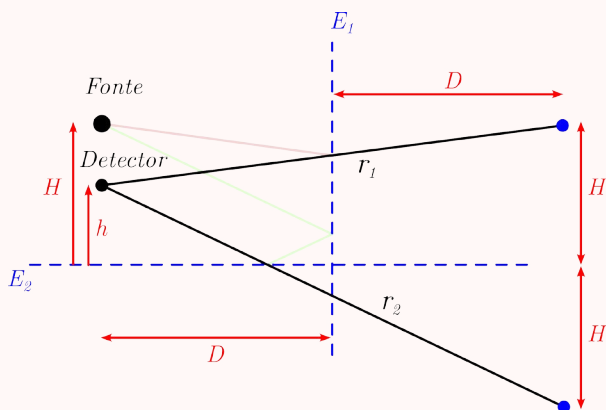
Suponha que em $T = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a fonte luminosa seja colocada a uma altura $H = 0$ cm do espelho E_2 (rente ao espelho) enquanto o detector está na mesma vertical mas a uma altura fixa $h = 8,0$ cm. A distância

horizontal entre a fonte (ou detector) e o espelho E_2 é dada por $D = 1,28 \text{ m}$.

2.d Identifique qual devem ser os valores de temperatura para que seja possível detectar máximos de interferência. Escreva seu resultado da ordem de interferência m .

Solução 2.d:

Para identificar as posições dos máximos é preciso determinar, inicialmente, a diferença de caminho óptico entre os dois raios luminosos, i) o que reflete apenas no espelho E_1 e o que reflete nos espelhos E_1 e E_2 . Para isso considere a ilustração a seguir:



Nela estão identificadas as imagens F_1 e F_2 da fonte nos espelhos. Os comprimentos dos caminhos percorridos pelos raios luminosos (r_1 e r_2) podem ser facilmente obtidos como:

$$r_1 = \sqrt{(2D)^2 + (H + h)^2} \quad \text{e} \quad r_2 = \sqrt{(2D)^2 + (H - h)^2}$$

Desta maneira, a diferença de caminhos é dada por:

$$r_2 - r_1 = \sqrt{(2D)^2 + (H + h)^2} - \sqrt{(2D)^2 + (H - h)^2}$$

$$r_2 - r_1 = 2D \cdot \left\{ \left[1 + \left(\frac{H+h}{2D} \right)^2 \right]^{1/2} - \left[1 + \left(\frac{H-h}{2D} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

$$r_2 - r_1 \approx 2D \cdot \left\{ \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{H+h}{2D} \right)^2 \right] - \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{H-h}{2D} \right)^2 \right] \right\}$$

$$r_2 - r_1 \approx D \cdot \left[\frac{(H+h)^2 - (H-h)^2}{(2D)^2} \right]$$

$$r_2 - r_1 \approx D \cdot \frac{4Hh}{4D^2}$$

$$r_2 - r_1 \approx \frac{Hh}{D}$$

A condição de máximo de interferência ocorre quando $r_2 - r_1 = (m + 1/2)\lambda$ e, portanto:

$$\frac{Hh}{D} = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda$$

$$H = \left(m + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda D}{h}$$

Observe que $H = H_0 + \Delta L = L_0 \alpha T$, já que $H_0 = 0$ e ΔL é dado pela expressão do item **a**. Sendo assim:

$$L_0 \alpha T = \left(m + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda D}{h}$$

$$T = \left(m + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda D}{\alpha L_0 h}$$

Substituindo os valores do enunciado, temos:

$$T = \left(m + \frac{1}{2} \right) \frac{5,00 \cdot 10^{-7} \cdot 1,28}{2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,80 \cdot 8 \cdot 10^{-2}} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T = (0,40 \cdot m + 0,20) \text{ } ^\circ\text{C}$$

2.e Estime com qual precisão a temperatura da barra pode ser medida nesse sistema.

Solução 2.e:

A precisão pode ser inferida ao se observar no detector a mudança de um máximo para um mínimo. Podemos usar que:

$$\delta T \sim \frac{\lambda D}{\alpha L_0 h} \delta m$$

Dessa maneira, identificando a variação de um máximo para um mínimo com $\delta m = 1/2$, podemos escrever:

$$\delta T \sim \frac{\lambda D}{2\alpha L_0 h} = 0,20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2.f Indique quantos máximos de interferência podem ser detectados entre $T = 0^\circ\text{C}$ e a temperatura medida no item **2.b**.

Solução 2.f:

Neste caso, basta usar a expressão do item **d** para escrever:

$$T = 0,40 \cdot m + 0,20 = 400 \quad \Rightarrow \quad m = \frac{399,8}{0,4} = 999,5$$

Portanto, incluindo desde o máximo com $m = 0$ até $m = 999$, são observados 1000 máximos de interferência.

Problema 3 - Gás ideal ultrarelativístico (20 pontos)

A figura 23 ilustra um gás de partículas idênticas de massa m que colidem elasticamente com uma parede vertical em um recipiente fechado. O gás tem densidade ρ (partículas por volume) e cada partícula tem quantidade de movimento (momento) linear q e velocidade v .

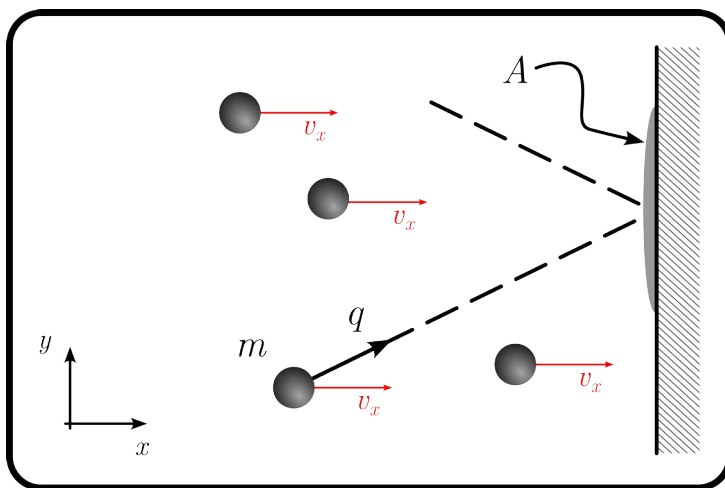


Figura 23: Partícula ultrarelativística atingindo a parede de um recipiente.

3.a Determine a pressão p exercida pelo gás sobre a parede considerando que as partículas possuam velocidade horizontal v_x . Escreva sua resposta em função de v_x , q_x e de ρ , apenas.

Solução 3.a:

Ao atingir a parede, cada partícula irá ter uma variação de momento na direção horizontal dada por $\Delta q_x = 2q_x$. A força sobre a parede devido a essa variação de momento é dada por $f = 2q_x/\Delta t$. A força total sobre a parede será dada por $F = \Delta N \cdot f$, em que ΔN é o número de partículas que atinge a parede num intervalo de tempo Δt .

O número de partículas que atinge a área A num intervalo de tempo Δt é dado pelo número de partículas dentro de um cilindro de volume

$\Delta\Omega = A \cdot v_x \Delta t$. Este número é dado por $\Delta N = \rho \Delta\Omega$.

A pressão sobre a parede será dada por:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{\Delta N}{A \Delta t} \Delta q_x = 2\rho q_x v_x$$

Neste problema você irá obter algumas propriedades de um gás ideal (no qual só há troca de energia entre as partículas através de colisões ideais) no regime ultrarelativístico. Nesse regime a energia ε de uma partícula de massa m que carrega uma quantidade de movimento q pode ser escrita como

$$\varepsilon = \sqrt{q^2 c^2 + m^2 c^4} \simeq q \cdot c \quad (1)$$

3.b Suponha que este regime (aproximação) seja válido quando a energia da partícula seja, por exemplo, $k = 100$ vezes a energia de repouso. Qual é o valor mínimo de q para a partícula, em função da sua massa de repouso m e da velocidade da luz c , para que esteja no regime ultrarelativístico?

Solução 3.b:

Usando a fórmula do enunciado:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= k \cdot mc^2 \\ \Rightarrow q^2 c^2 + m^2 c^4 &= k^2 m^2 c^4 \\ \Rightarrow q^2 &= (k^2 - 1) m^2 c^2 \\ \Rightarrow q &= \sqrt{(k^2 - 1)} mc \\ q &= \sqrt{9999} \cdot mc \simeq 99,995 \cdot mc \end{aligned}$$

3.c Qual a velocidade da partícula neste caso? Indique em função de c .

Solução 3.c:

O fator k indicado no enunciado é o fator de Lorentz para esta partícula relativística. Desta maneira, a energia pode ser expressa como:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot mc^2 = k \cdot mc^2 \\ \Rightarrow \quad \frac{v^2}{c^2} &= 1 - \frac{1}{k^2} \\ \Rightarrow \quad v &= \frac{\sqrt{k^2 - 1}}{k} c \\ v &= \frac{\sqrt{9999}}{100} \cdot c \simeq 0,99995 \cdot c\end{aligned}$$

Considere, a partir de agora, que as partículas que compõem o gás se movem aleatoriamente com velocidade aproximadamente c ($v \simeq c$). Usando argumentos de simetria pode-se mostrar que a pressão média P exercida sobre a parede do recipiente, como determinada no item **3.a**, pode ser escrita como função da densidade de energia $u = U/V$ do gás no recipiente. Aqui, U representa a energia total do gás e V é o volume do recipiente em que ele está contido.

3.d Determine a equação que relaciona a pressão P , o volume V e a energia U .

Solução 3.d:

Podemos partir do resultado do item **3.a** assumindo agora que apenas metade das partículas se move em direção à parede. Neste caso:

$$p = \rho q_x v_x = \frac{N}{V} q_x v_x$$

em que usamos que ρ/m indica a densidade de partículas no gás.

Notemos agora que, para cada partícula temos:

$$\vec{q} \cdot \vec{v} = q_x v_x + q_y v_y + q_z v_z = qv \simeq qc$$

Por simetria devemos ter $\langle q_x v_x \rangle = \langle q_y v_y \rangle = \langle q_z v_z \rangle = qc/3$. Aqui, $\langle a \rangle$ indica o valor médio da grandeza a . A pressão média será dada por

$$P = \left\langle \frac{N}{V} q_x v_x \right\rangle = \frac{1}{3} \frac{N}{V} qc$$

Como $Nqc = U$ é a energia total das partículas, temos:

$$P = \frac{1}{3} \frac{U}{V} \quad \text{ou} \quad U = 3PV$$

Mesmo no caso ultrarelativístico ainda é válida a equação de gás ideal $PV = nRT$, em que n é o número de mols do gás contido no recipiente a uma temperatura T .

3.e Determine o calor específico molar a volume constante C_V para este gás em função de R .

Solução 3.e:

Usando o resultado do item anterior podemos escrever:

$$U = 3PV = 3nRT$$

Por definição, o calor específico molar a volume constante pode ser escrito como:

$$C_V = \frac{1}{n} \frac{\Delta U}{\Delta T} = 3R$$
$$C_V = 24 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

3.f Caso o gás seja comprimido adiabaticamente de um volume inicial $V_0 = 27 \text{ L}$ e pressão $P_0 = 16 \text{ atm}$ até um volume $V_f = 8 \text{ L}$, determine a pressão final P_f do gás após a compressão.

Solução 3.f:

Usando a relação de Mayer ($C_P - C_V = R$), obtemos o calor específico molar a pressão constante como $C_P = 4R$. O coeficiente de Poisson para esse gás é:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{4}{3}$$

Usando a relação para o processo adiabático, temos:

$$P_0 \cdot V_0^\gamma = P_f \cdot V_f^\gamma$$

$$\Rightarrow P_f = P_0 \left(\frac{V_0}{V_f} \right)^{4/3}$$

Aplicando os valores numéricos do enunciado, obtemos:

$$P_f = 16 \cdot \left(\frac{27}{8} \right)^{4/3} = 16 \cdot \frac{81}{16} = 81 \text{ atm}$$

Problema 4 - Um átomo elástico (20 pontos)

Considere o modelo de um átomo no qual uma partícula de massa m gira em torno de um ponto $\mathcal{O}$ fixo, conforme indicado na figura 24. Suponha que a mola seja ideal, tenha uma constante elástica k e que seu comprimento natural é praticamente nulo.

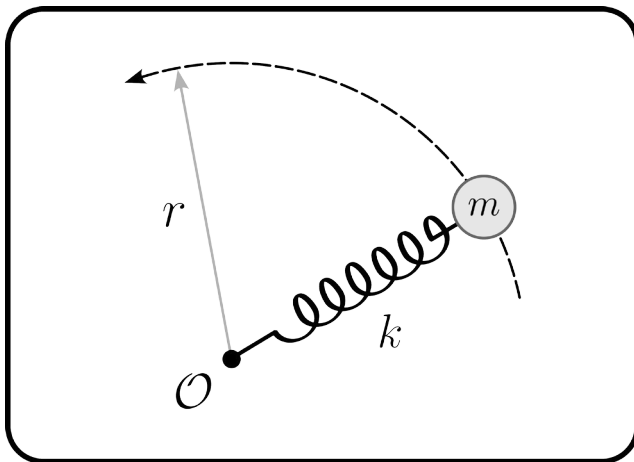


Figura 24: Modelo de um átomo elástico (força elétrica substituída por uma mola ideal).

4.a Determine qual deve ser o raio da órbita r para que a partícula gire em torno de $\mathcal{O}$ com velocidade v . Expresse seu resultado em função de m , k e v .

Solução 4.a:

Nesta situação a força elástica atua como resultante centrípeta.

$$F_{el} = R_{cp} = \frac{mv^2}{r}$$

Como a mola tem comprimento natural praticamente nulo, $F_{el} = k \cdot r$ e, portanto:

$$kr = \frac{mv^2}{r}$$

$$r^2 = \frac{m}{k} v^2$$

$$r = \sqrt{\frac{m}{k}} v$$

4.b Determine qual a energia total E do sistema para o caso do item anterior. Expresse seu resultado em função de m e v .

Solução 4.b:

A energia total do sistema é a soma da energia cinética e da potencial:

$$E = \frac{1}{2}kr^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

Usando o resultado do item anterior temos $kr^2 = mv^2$, logo:

$$E = mv^2$$

No modelo de quantização de Bohr para o átomo de hidrogênio, só são permitidas órbitas de raio r na qual o comprimento da órbita é um número inteiro vezes o comprimento de onda associado à partícula. Usando esse resultado, responda aos itens a seguir.

4.c Determine os possíveis valores de velocidade permitidos para esta partícula. Expresse seu resultado em função de m , k e da constante de Planck h .

Solução 4.c:

De acordo com o enunciado

$$2\pi r = n \cdot \lambda$$

em que $\lambda = h/mv$ é o comprimento de onda associado à partícula em movimento e n é um número inteiro. Agora, tanto a velocidade como o raio da órbita devem ser quantizados, i.e. $v \rightarrow v_n$ e $r \rightarrow r_n$. Usando o valor de r obtido no item **a**, temos:

$$2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \cdot v_n = n \cdot \frac{h}{mv_n}$$

E, portanto:

$$v_n^2 = n \cdot \frac{h}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m^3}}$$

$$v_n = \left(n \cdot \frac{h}{2\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{k}{m^3} \right)^{1/4}$$

4.d Determine os possíveis valores de energia para o sistema. Expresse seu resultado em função de m , k e da constante de Planck h .

Solução 4.d:

A energia do sistema passa a ser quantizada $E \rightarrow E_n$, mas o resultado do item **b** continua válido, portanto:

$$E_n = mv_n^2 = n \cdot \frac{h}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Veja ainda que $E_n = n \cdot E_1$, em que E_1 é a energia mais baixa do sistema.

4.e Sabe-se que o comprimento de onda do fóton liberado na transição do segundo estado excitado para o estado fundamental desse sistema é $\lambda = 414 \text{ nm}$. Determine a energia do estado fundamental. Expresse seu resultado em eV .

Solução 4.e:

A energia do fóton emitido corresponde à diferença de energia entre os dois níveis do sistema, i.e.

$$hf = E_3 - E_1$$

Note que o segundo estado excitado corresponde ao terceiro estado de energia $n = 3$ do sistema, já que o estado fundamental é aquele com

$n = 1$.

A frequência do fóton pode ser escrita como $f = c/\lambda$ e, pelo item anterior, podemos escrever $E_3 - E_1 = 2E_1$, logo:

$$\frac{hc}{\lambda} = 2E_1 \Rightarrow E_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{hc}{\lambda}$$

Substituindo os valores do enunciado:

$$E_1 = \frac{4,14 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot 414 \cdot 10^{-9}} \text{ eV}$$

$$E_1 = 1,5 \text{ eV}$$

4.f Supondo que no sistema considerado a partícula seja um elétron, determine o valor da constante elástica da mola neste modelo. Expresse seu resultado em N/m.

Solução 4.f:

Usando o valor da energia do estado fundamental obtida nos itens **d** e **e**, obtemos:

$$\frac{h}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{hc}{\lambda}$$

$$\Rightarrow \sqrt{\frac{k}{m}} = \pi \cdot \frac{c}{\lambda}$$

$$\Rightarrow k = \left(\frac{\pi c}{\lambda}\right)^2 \cdot m$$

E, substituindo os valores numéricos:

$$k = \left(\frac{\pi \cdot 3,0 \cdot 10^8}{414 \cdot 10^{-9}}\right)^2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ N/m}$$

$$k = 4,7 \text{ N/m}$$

Problema 5 - Difração por um fio de cabelo (20 pontos)

A construção dos lasers foi crucial para o avanço da ciência e tecnologia. Com o seu emprego, vários fenômenos podem ser observados com o auxílio de instrumentos simples. Um exemplo comum é a difração da luz por um fio de cabelo, conforme ilustrado na figura 25.

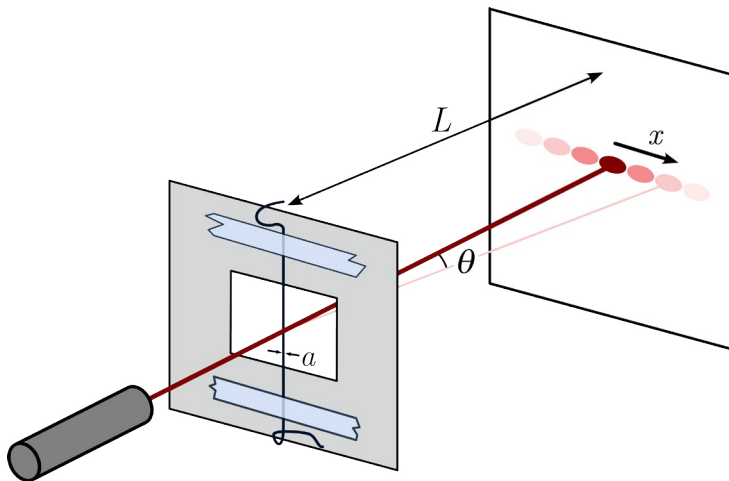


Figura 25: Montagem experimental para a obtenção do padrão de difração de um fio de cabelo.

Utilizando a montagem experimental da figura 25, com $L = 90$ cm, foi obtido o padrão mostrado na figura 26. O padrão de intensidade da luz na difração por um fio de cabelo, que tem um máximo em $x = 0$, é o mesmo que aquele para uma fenda de difração simples (esse resultado é conhecido como Princípio de Babinet) e é dado por:

$$I = I_0 \cdot \frac{\text{sen}^2(X)}{X^2} \quad (2)$$

em que $X = \pi a \theta / \lambda$. Aqui a é a largura do fio de cabelo e θ é o ângulo formado entre a direção inicial do raio luminoso e a direção onde é observada a intensidade luminosa (a partir do fio de cabelo).

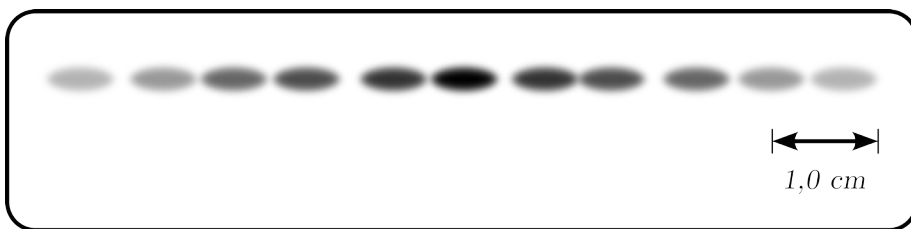


Figura 26: Padrão de difração da luz de um laser após atingir um fio de cabelo. A escala está indicada na figura.

5.a Produza uma tabela com o valores das posições dos mínimos de intensidade de difração da luz como função da ordem de interferência m .

Solução 5.a:

Podemos identificar o máximo central (mais escuro) para localizar os demais com relação ao mesmo. Como o enunciado mostra 11 máximos de interferência, estes máximos variam de -5 até $+5$. Não há mínimo com $m = 0$, uma vez que o ponto central é um máximo de interferência. Usando a escala dada na figura obtemos a seguinte tabela.

Tabela: Valores medidos da posição dos mínimos de interferência $x_{\text{mín}}$ em função da ordem de interferência m .

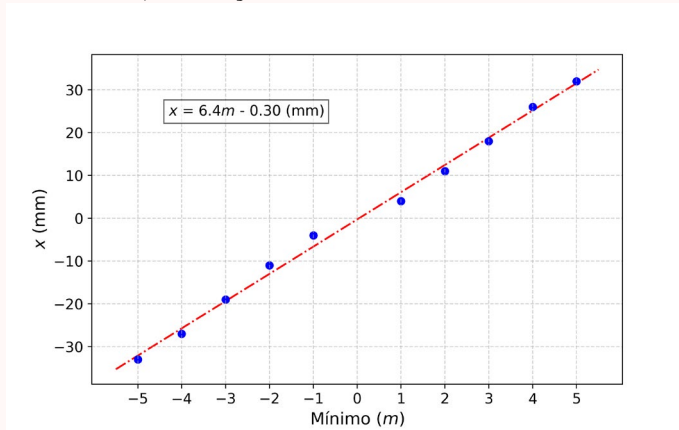
m	-5	-4	-3	-2	-1	1	2	3	4	5
$x_{\text{mín}}$ (mm)	-33	-27	-19	-11	-4	4	11	18	26	32

5.b Faça um gráfico a partir dos dados da tabela do item (a) com o intuito de obter os dados necessário para determinar a largura do fio de cabelo.

Solução 5.b:

Os dados obtidos no item anterior podem ser escritos com x vs. m , conforme mostrado no gráfico a seguir.

Gráfico: Valores medidos da posição dos mínimos de interferência $x_{\text{mín}}$, em mm, em função da ordem de interferência m .



5.c Sabendo que o laser utilizado tem comprimento de onda $\lambda = 600$ nm, determine a largura do fio de cabelo utilizado no experimento.

Solução 5.c:

Os mínimos de interferência ocorrem em:

$$\sin(X_m) = 0 \Rightarrow X_m = m \cdot \pi, \text{ excluindo } m = 0.$$

$$\Rightarrow \frac{\pi \cdot a}{\lambda} \cdot \theta_m = m \cdot \pi$$

De acordo com a montagem indicada no enunciado, temos:

$$\theta_m \approx \frac{x_m}{L}$$

A aproximação é justificada pela relação entre os valores obtidos para L e x_m fornecidos pelo enunciado e medidos, respectivamente. Podemos escrever:

$$\frac{a}{\lambda} \cdot \frac{x_m}{L} = m$$

$$\Rightarrow x_m = \left(\frac{\lambda \cdot L}{a} \right) \cdot m$$

Como espera-se uma dependência linear, pode-se extrair os coeficientes de regressão linear do gráfico de x_m vs. m . Ao fazer isso obtemos:

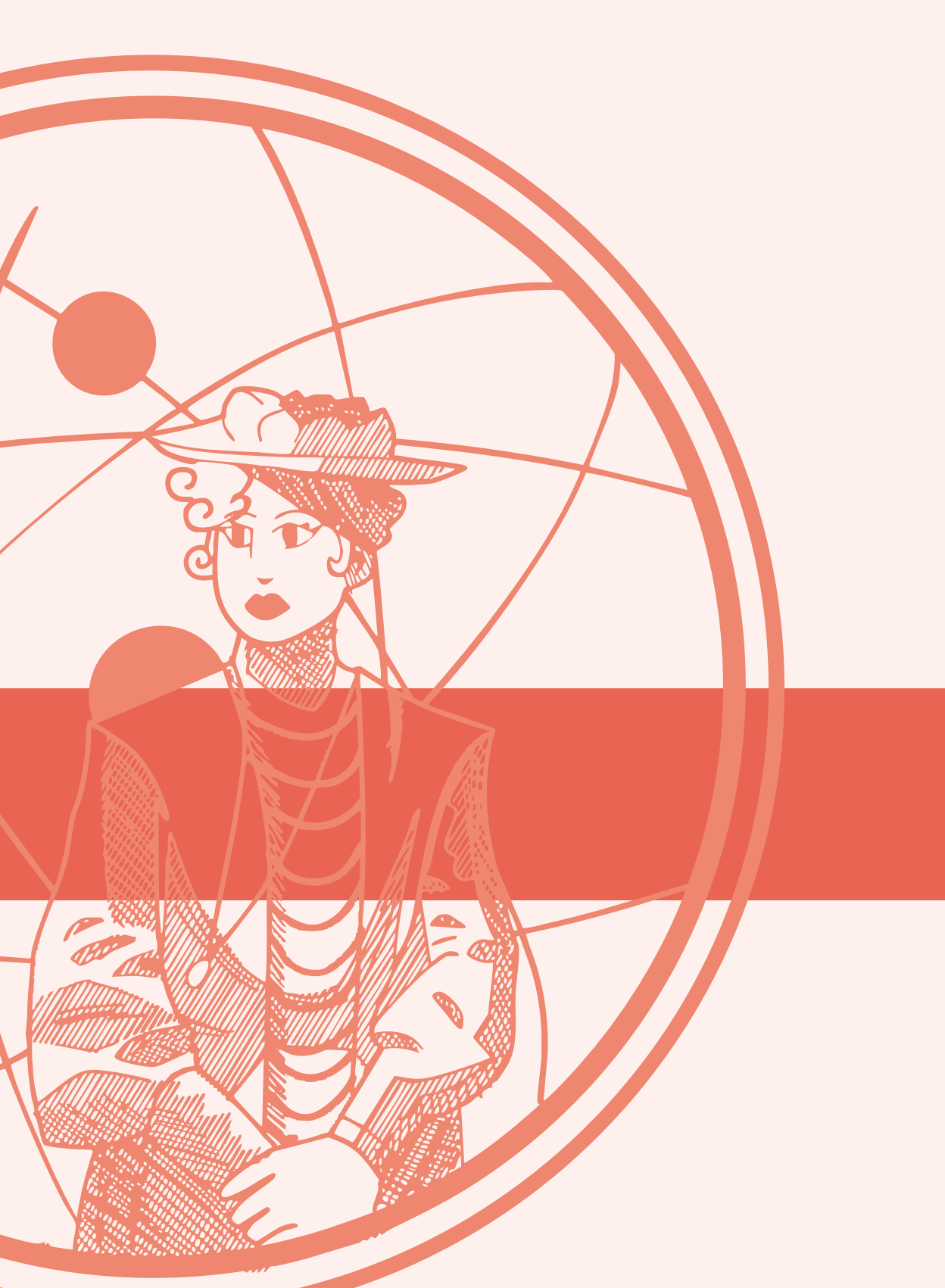
$$x_m = A \cdot m + B, \text{ com } \begin{cases} A = 6,4 \text{ mm} \\ B = -0,3 \text{ mm} \end{cases}$$

Por comparação entre a expressão obtida dos mínimos e a regressão linear, temos:

$$\frac{\lambda \cdot L}{a} = A \quad \Rightarrow \quad a = \frac{\lambda \cdot L}{A}$$

Usando os dados fornecidos no enunciado e o valor de A obtido da regressão linear dos dados, obtemos:

$$a = \frac{600 \cdot 10^{-9} \cdot 0,90}{6,4 \cdot 10^{-3}} = 8,4 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 84 \mu\text{m}$$





Estudantes medalhistas



Medalhistas TFM 2025

1º ano do Ensino Médio

Medalha de Ouro

Cecília Cristina Cavalcanti dos Santos
Colégio Master - Fortaleza - CE

Letícia Laxmi Barbosa Pereira
IFRJ campus Paracambi - Paracambi - RJ

Sarah Oliveira Bianchini
Colégio Objetivo Integrado - São Paulo - SP

Sofia Caixeta Piazza
Colégio Etapa - Valinhos - SP

Sofia Silva dos Santos
Colégio e Curso Pensi Icaraí 1 - Niterói - RJ

Medalhistas TFM 2025

1º ano do Ensino Médio

Medalha de Prata

Ester de Quadra de Paula

IFFar campus Santo Augusto - Santo Augusto - RS

Giovanna Pereira Ramos

*Colégio Farias Brito Pré-Vestibular
Aldeota - Fortaleza - CE*

Hevelin Leandro Cesidio Gomes

Colégio Militar de Fortaleza - Fortaleza - CE

Isabela Machado Pires

Colégio Arena - Goiânia - GO

Luiza Amaral Pennewaert

Colégio Albert Sabin - São Paulo - SP

Luiza Calligaro Peterlongo

Lorenzini Menegotto

Colégio Militar de Porto Alegre - Porto Alegre - RS

Maira de Oliveira Barros
Colégio Teleyos - Fortaleza - CE

Maria Eduarda Cruz Araújo
Colégio Master - Fortaleza - CE

Sofia Nakamura Chueiri
Colégio Objetivo Integrado - São Paulo - SP

Sofia Trapp Oliveira
Colégio Militar de Porto Alegre - Porto Alegre - RS

Vivian Lustosa Aragão
Colégio Teleyos - Fortaleza - CE

Medalhistas TFM 2025

1º ano do Ensino Médio

Medalha de Bronze

Adma Ferreira de Oliveira

IFSC campus Canoinhas - Canoinhas - SC

Amanda Elise Furtado Rodrigues

Grupo Gênese de Ensino LTDA - Recife - PE

Amanda Yu Kato Lee

Colégio Objetivo Integrado - São Paulo - SP

Ana Julia Meneguzzo

IFSC campus Canoinhas - Canoinhas - SC

Anne Letícia Sousa Gomes Alves

Colégio Teleyos - Fortaleza - CE

Ester Freires de Lima

Colégio Teleyos - Fortaleza - CE

Gabrielle Xavier de Almeida

Colégio Arena - Goiânia - GO

Julia Greco

Colégio Objetivo Integrado - São Paulo - SP

Kahor Maria Takata

Kanda de Andrada Oliveira

Escola Eleva - Recife - PE

Luiza Petroli Lopes

Colégio Etapa de EFM - São Paulo - SP

Malu Araujo Azevedo

IFMS campus Campo Grande - Campo Grande - MS

Mariana Inês Costenaro

IFRS campus Veranópolis - Veranópolis - RS

Mikaelly Moraes de Souza

Colégio da Polícia Militar do Ceará

Tenente Mario Lima - Maracanaú - CE

Mirella Fortes Ibiapina

CETI Governador Dirceu Mendes

Arcoverde - Teresina - PI

Sophia Paulino Luna

Colégio Teleyos - Fortaleza - CE

Victoria Brasil Cunha
Colégio Farias Brito Pré-Vestibular
Aldeota - Fortaleza - CE

Medalhistas TFM 2025

2º ano do Ensino Médio

Medalha de Ouro

Biatriz Soares Silva

Colégio Master - Fortaleza - CE

Isang Hu

Colégio Etapa de EFM - São Paulo - SP

Julia Ayumi Miyahira Togava

Colégio Etapa de EFM - São Paulo - SP

Letícia Samara Macêdo do Nascimento

Colégio GGE - Recife - PE

Maria Beatriz Mesquita Ximenes

Colégio Farias Brito Pré-Vestibular

Aldeota - Fortaleza - CE

Sofia Costa Lima Pinheiro

Colégio Ari de Sá Cavalcante Aldeota - Fortaleza - CE

Medalhistas TFM 2025

2º ano do Ensino Médio

Medalha de Prata

Amanda Seillier Navai

Colégio Etapa III - São Paulo - SP

Angelina Siervi Tiago

CEFET-MG campus Leopoldina - Leopoldina - MG

Anne Luisa Montalvão Amaro

IFMT campus Pontes e Lacerda

- Pontes e Lacerda - MT

Caroline Ayumi Okumura

Colégio Etapa de EFM - São Paulo - SP

Evelyn dos Santos Araújo

Colégio da Polícia Militar do Ceará

General Edgard Facó - Fortaleza - CE

Lorena Ferreira Gomes de Oliveira

GGE Vestibulares - Recife - PE

Sandra Sabrina Charupa Chore

IFMT campus Pontes e Lacerda

- Pontes e Lacerda - MT

Sofia Binda Sant'Ana

Colégio Salesiano Jardim Camburi - Vitória - ES

Yasmin Caixeta Oliveros

Colégio Etapa - Valinhos - SP

Yasmin Camargo Ribeiro

CEFET-MG campus Varginha - Varginha - MG

Medalhistas TFM 2025

2º ano do Ensino Médio

Medalha de Bronze

Alice Dourado Dias Prieto

Colégio Militar Dom Pedro II - Brasília - DF

Ana Lara de Oliveira Gomes

Colégio Teleyos - Fortaleza - CE

Ana Melissa de Araújo Lima

IFAC campus Xapuri - Xapuri - AC

Emilly Bones Machado

IFFar campus Santo Augusto - Santo Augusto - RS

Gabriela de Almeida Peixoto

Colégio Imperatriz Leopoldina - São Paulo - SP

Giovanna Felippin Cronst

IFFar campus Santo Augusto - Santo Augusto - RS

Izabela Ludwig Tamiozzo

IFFar campus Santo Augusto - Santo Augusto - RS

Lara Maria Telesforo de Sampaio
EEEP Gerardo Cristino de Menezes - Coreaú - CE

Mara Clara Barros Ribeiro
Colégio GGE - Petrolina - PE

Maria Clara Cunha Leite Goulart de Araujo
Colégio Santa Marcelina - São Paulo - SP

Maria Eduarda Elias Alcântara
Colégio Teleyos - Fortaleza - CE

Maria Letícia Domingos Rocha
Colégio Teleyos - Fortaleza - CE

Mayra de Oliveira Gonçalves Padilha
IFSC campus Canoinhas - Canoinhas - SC

Medalhistas TFM 2025

3º e 4º anos do Ensino Médio

Medalha de Ouro

Ana Victória Camelo Duarte

Colégio Master - Fortaleza - CE

Isabela Jimenez Lin

Colégio Objetivo Integrado - São Paulo - SP

Lara Késsya Costa de Paula

*Colégio Farias Brito Pré-Vestibular
Aldeota - Fortaleza - CE*

Liana da Costa Souza

*Colégio Farias Brito Pré-Vestibular
Aldeota - Fortaleza - CE*

Raissa Loana Moreira Gomes

*Colégio Farias Brito Pré-Vestibular
Aldeota - Fortaleza - CE*

Medalhistas TFM 2025

3º e 4º anos do Ensino Médio

Medalha de Prata

Amanda Miho Yazaki

Colégio Etapa III - São Paulo - SP

Danyelle Beatriz Lima Oliveira

*Colégio Farias Brito Pré-Vestibular
Aldeota - Fortaleza - CE*

Gabriela Barbieri Stroeh

Colégio Etapa - Valinhos - SP

Lohanne Vanessa Moreira

Colégio Teleyos - Fortaleza - CE

Luana Valadares Prata de Andrade

Colégio Arena - Goiânia - GO

Manuela Bacchi Blanco

Colégio Carmo - Santos - SP

Maria Clara Queiroz Moreira

Colégio de Formação Integral - Recife - PE

Maria Evelly Pereira Lima
CETI Cônego Cardoso - Castelo do Piauí - PI

Rafaela de Mendonça de Aguiar
Colégio e Curso Pensi Tijuca 1 - Rio de Janeiro - RJ

Rebecca Lagroteria Lustosa Santos
Colégio Next - Itatiba - SP

Taysa Fernanda Luz Moreira
Instituto Dom Barreto Centro - Teresina - PI

Medalhistas TFM 2025

3º e 4º anos do Ensino Médio

Medalha de Bronze

Alice Luísa Souza

Colégio 7 de Setembro EBS - Fortaleza - CE

Ana Clara Araujo Barbosa

Colégio Ibituruna - Governador Valadares - MG

Ana Luíza dos Santos Almeida

Colégio Rosalvo Félix - Rio Largo - AL

Andrina Janine Ferreira Costa

IFNMG campus Araçuaí - Araçuaí - MG

Beatriz Sofia Freitas Sena

Fundação Matias Machline - Manaus - AM

Caroline da Rosa Peixoto

Colégio Mãe de Deus - Porto Alegre - RS

Emilly Soares da Silva

IFMG campus Betim - Betim - MG

Ester Passos Reis dos Santos
Escola Popular Madre Maria Villac - Teresina - PI

Giulia Yolanda Perroni Nicoletti
*Instituto Educacional Parque
Ecológico - Indaiatuba - SP*

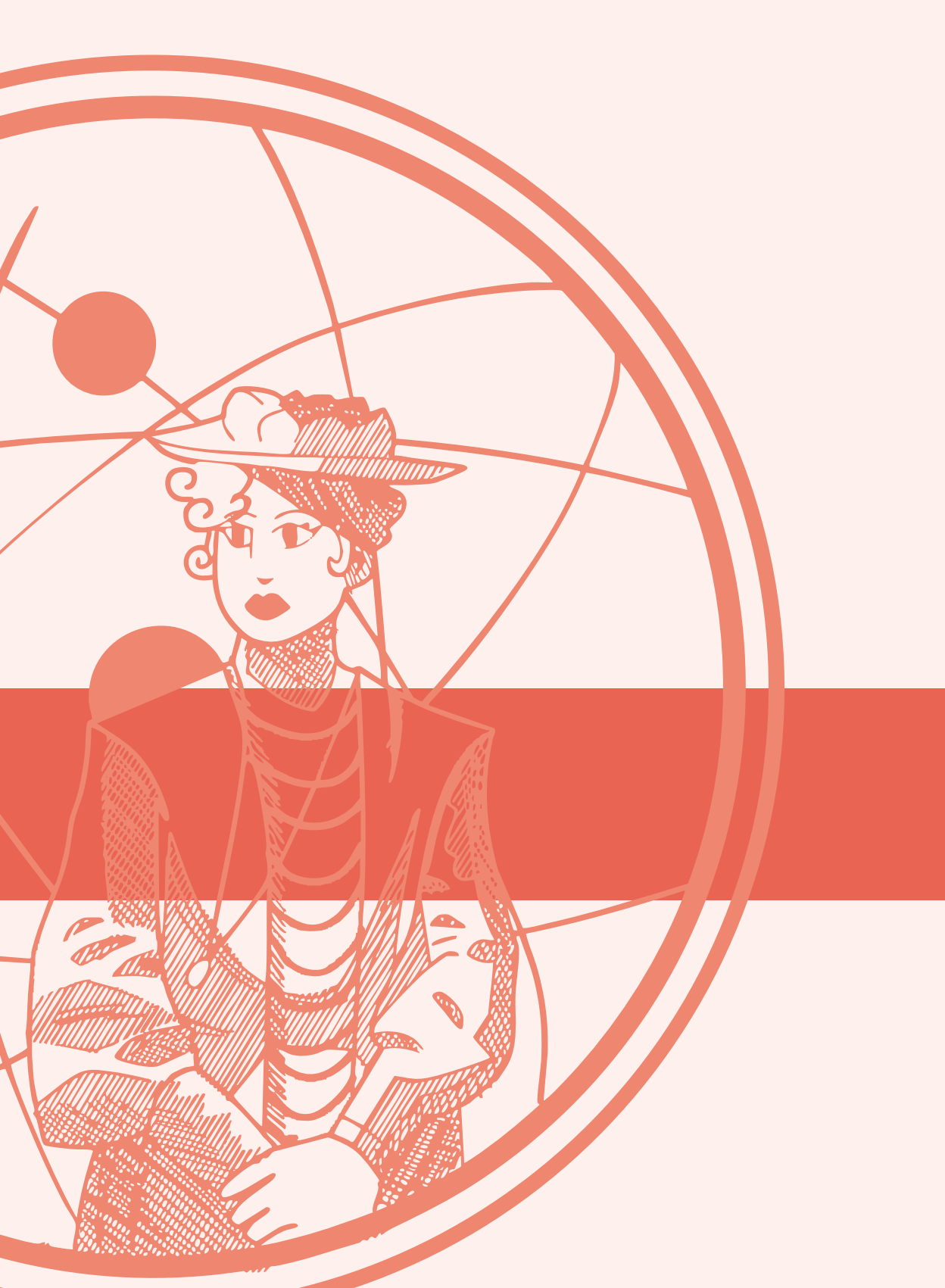
Isabela Ueda
Colégio Etapa de EFM - São Paulo - SP

Júlia Cardoso Abreu
*Colégio da Polícia Militar do Ceará
Tenente Mario Lima - Maracanaú - CE*

Maria Clara Pimenta Ribeiro
Colégio Ibituruna - Governador Valadares - MG

Maria Eduarda Balreira Pinto
*Colégio Farias Brito Pré-Vestibular
Aldeota - Fortaleza - CE*

Sophia Sayuri Suzuki
Colégio Amorim - São Paulo - SP





Estatísticas das participantes

Estudantes inscritas

Na edição do Torneio de Física para Meninas de 2025 tivemos 4202 meninas inscritas para realizar a prova online da primeira fase, o que representa um aumento de 27% com relação à edição anterior, considerando apenas estudantes de Ensino Médio inscritas em ambas as edições. Inscreveram-se na competição estudantes de 850 escolas em 421 diferentes municípios do Brasil.

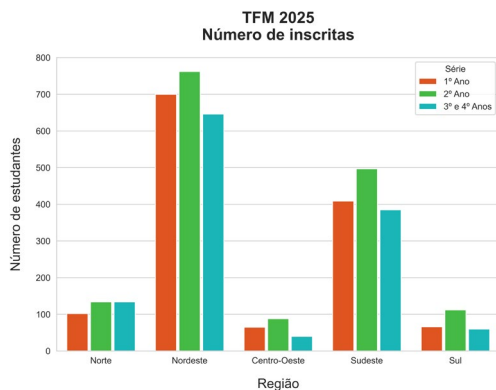


Figura 27: Número de estudantes inscritas no TFM 2025 por série em cada região do país.

Em todas as regiões o número de estudantes provenientes de escolas públicas foi superior ao de estudantes de escolas privadas, com destaque para a região nordeste na qual a proporção é de 4 para 1, mesmo com um grande número de inscritas. No total, as escolas públicas representaram 68% das inscrições.

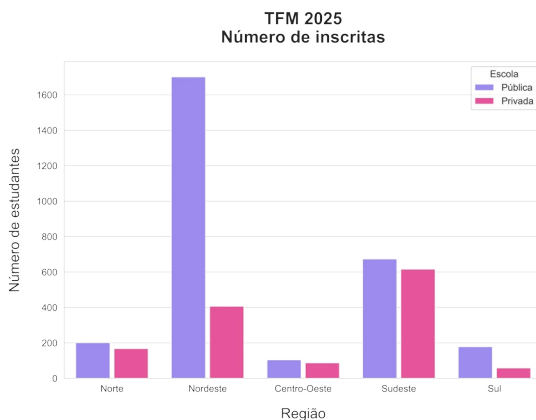


Figura 28: Número de estudantes inscritas no TFM 2025 por tipo de escola (pública ou privada) em cada região do país.

Na figura 29 está destacada a participação de estudantes de todos os estados do Brasil. É possível observar a participação de estudantes de todos os estados. Em número de participantes, destacaram-se os estados do Ceará e São Paulo.

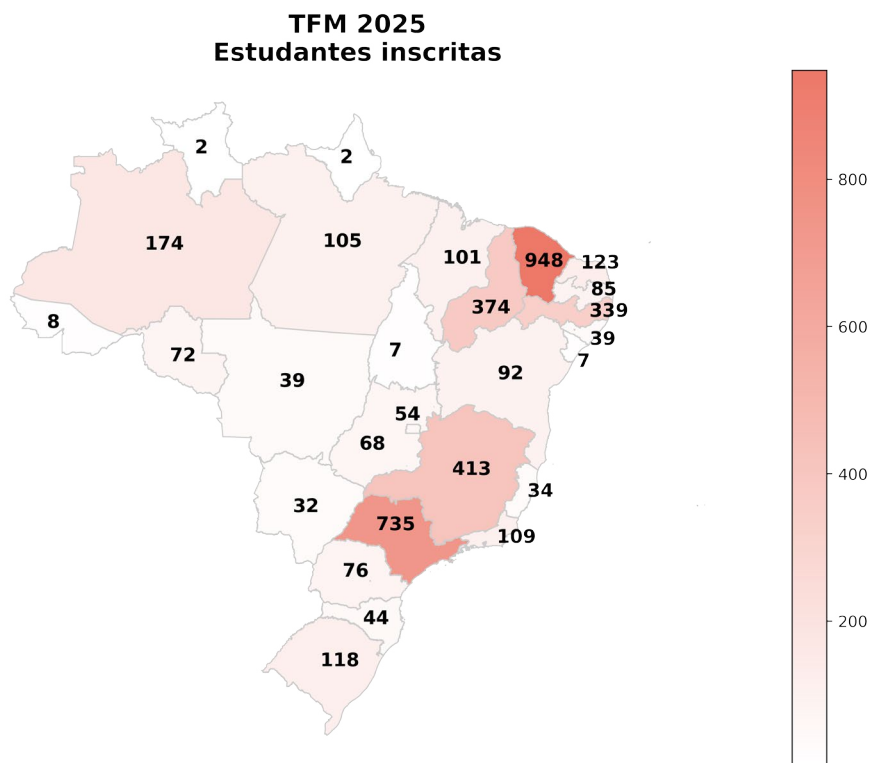


Figura 29: Distribuição de estudantes inscritas no TFM 2025, por estado.

Participantes da 2ª fase

Nesta edição, 658 estudantes foram selecionadas para fazer a 2ª fase. As provas foram realizadas presencialmente em 107 locais de aplicação distribuídos em todo o Brasil.



Figura 30: Número de estudantes participantes da 2ª fase do TFM 2025 por série em cada região do país.

Foram aprovadas para a 2ª fase estudantes de todas as cinco regiões do Brasil. O destaque foi, novamente, para a região nordeste com a maior concentração de estudantes nessa etapa.

Na edição de 2025, a maior parte das estudantes classificadas para a 2ª fase era proveniente de escolas públicas. Aqui destacam-se as regiões Nordeste e Sul com uma maior concentração de estudantes de escolas públicas em comparação com estudantes de escolas privadas e o Sudeste na participação de estudantes de escolas privadas.

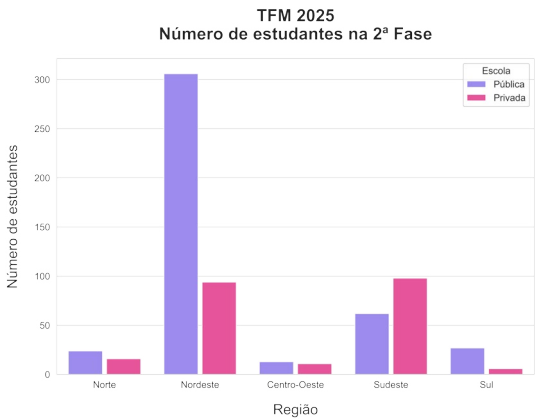


Figura 31: Número de estudantes participantes da 2ª fase do TFM 2025 por tipo de escola (pública ou privada) em cada região do país.

Com relação à distribuição por estado, na 2ª fase participaram estudantes de todos os estados (veja a figura 32), exceto Roraima. Destaque para os estados do Ceará e São Paulo com o maior número de meninas classificadas.

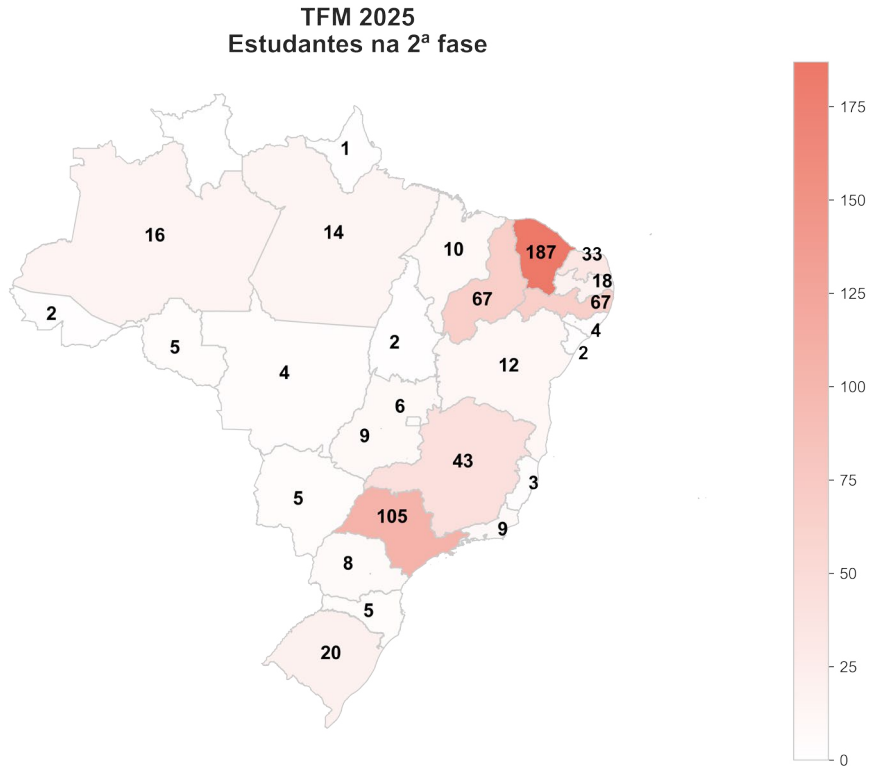


Figura 32: Número de estudantes participantes da 2ª fase do TFM 2025 em cada estado brasileiro.



Estudantes medalhistas

No TFM 2025 foram premiadas 91 estudantes com medalhas de ouro, prata e bronze. Essas estudantes estão distribuídas em 32 municípios diferentes e 50 escolas.

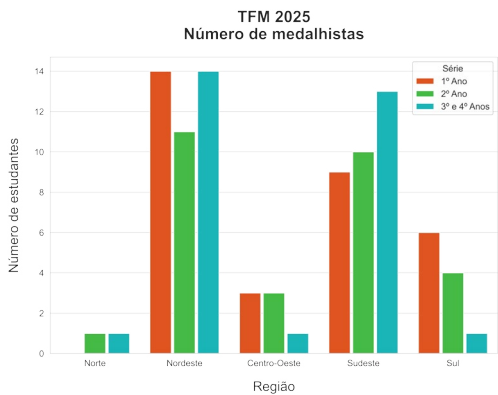


Figura 33: Número de estudantes premiadas no TFM 2025 por série em cada região do país.

Em todas as regiões do Brasil houve estudantes premiadas na edição de 2025, com maior concentração para as regiões Nordeste e Sudeste. Destaque para a região Sul que mesmo com um número bem menor de participantes apresentou uma quantidade significativa de premiadas.

Entre estudantes de escolas públicas e privadas a distribuição percentual de medalhas foi de 30% e 70%. Nas regiões Sul e Centro-Oeste o número de medalhistas de escolas públicas supera o número de meninas de escolas privadas, com destaque para a região Sul em que a razão foi de 10 para 1.



Figura 34: Número de estudantes premiadas no TFM 2025 por tipo de escola (pública ou privada) em cada região do país.

Apesar de haver medalhistas nas cinco regiões do país, houve medalhistas de ouro somente no Nordeste e no Sudeste, enquanto na região

Norte as estudantes foram premiadas com medalha de bronze (veja a figura 35).

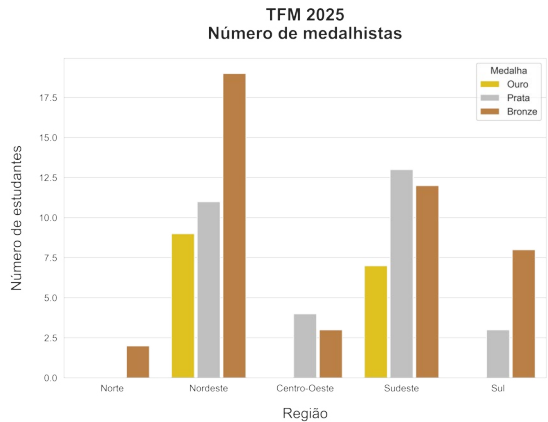


Figura 35: Número de estudantes premiadas no TFM 2025 por tipo de medalha (ouro, prata ou bronze) em cada região do país.

Com relação à distribuição de medalhas entre escolas públicas e privadas, a maior parte das medalhas de estudantes de escolas públicas foi bronze, entretanto também houve medalhistas de ouro em escolas públicas, conforme indicado na figura 36.



Figura 36: Número de estudantes premiadas no TFM 2025 por tipo de medalha (ouro, prata ou bronze) e tipo de escola (pública ou privada).



No mapa da figura 37 está representada a distribuição de medalhistas por estado. O Ceará é o estado com maior número de meninas premiadas, seguido pelo estado de São Paulo.

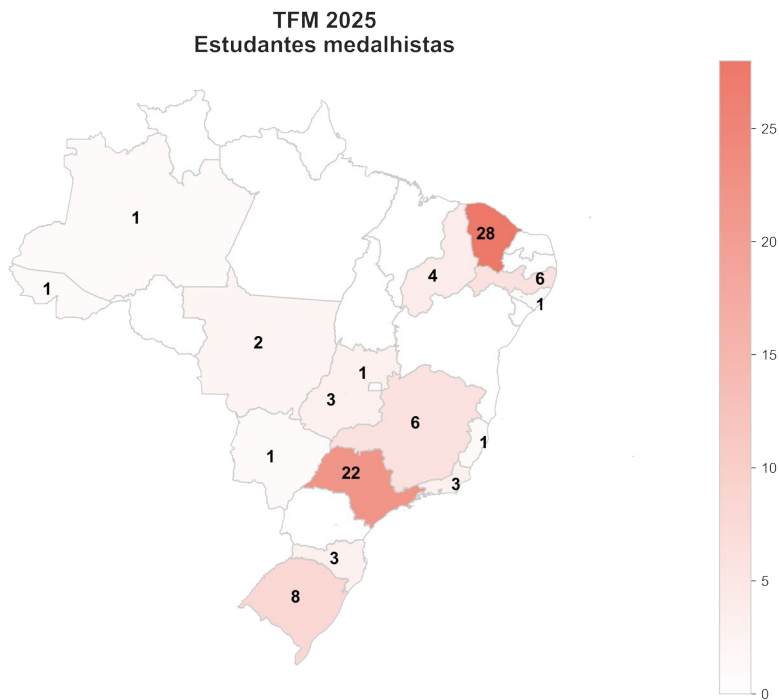
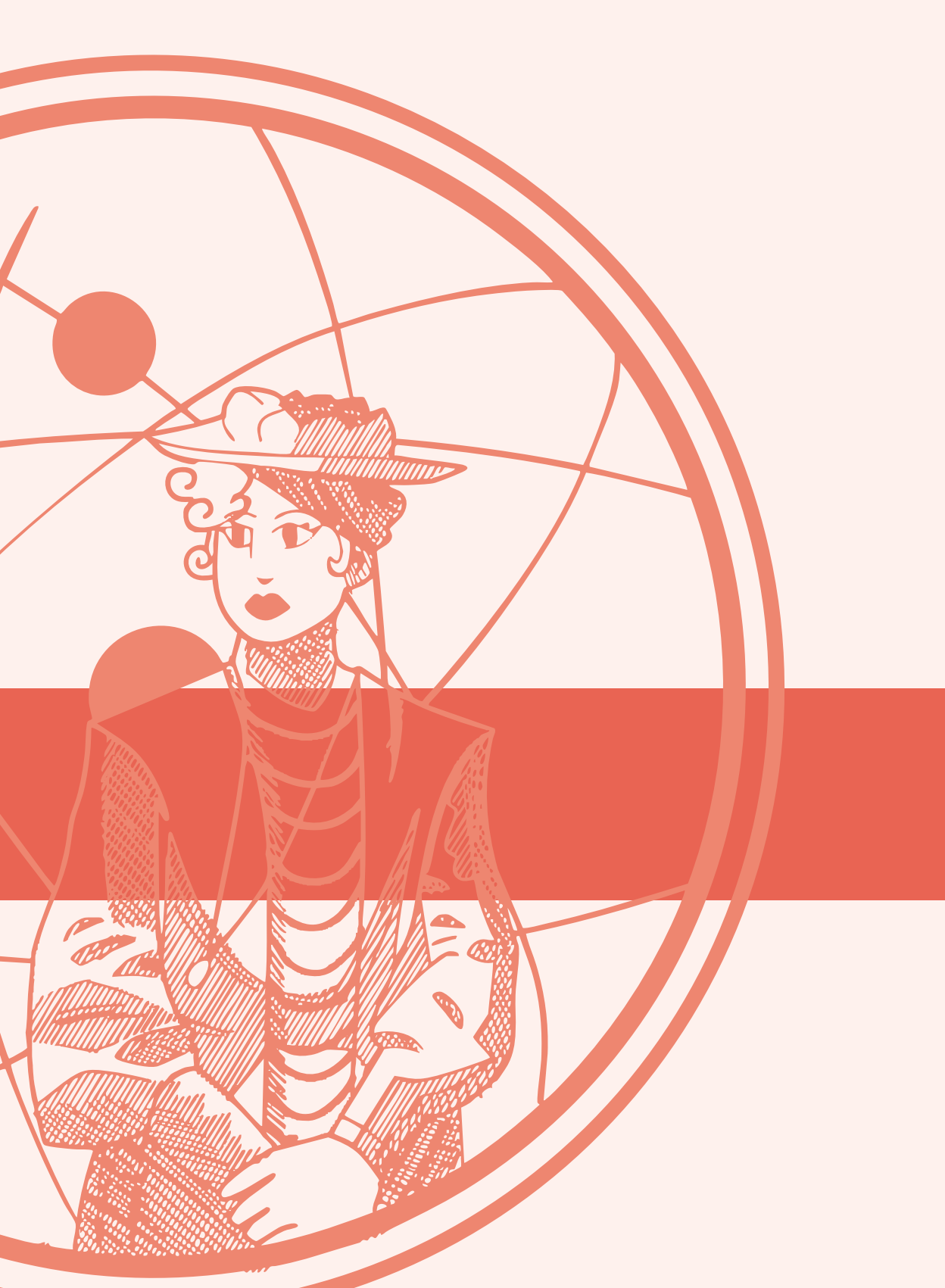


Figura 37: Número de estudantes medalhistas no TFM 2025 em cada estado brasileiro.

Foram premiadas estudantes em 16 estados diferentes. Apesar da concentração em determinados estados, isso mostra o empenho do TFM na busca por uma diversidade geográfica de estudantes medalhistas. Inspirar meninas é o principal objetivo do TFM, e buscamos cada vez mais descentralizar a distribuição de medalhas.







Comissão organizadora



Comissão Organizadora

Maria Luiza Miguez (UECE & IIF-UFRN)
Coordenadora Geral

Nara Martini Bigolin (UFSM)
Coordenadora do Movimento Meninas Olímpicas

Graciana dos Santos de Sousa (IFPA)

Juliana Rodrigues Franco (IFMG)

Nathália Beretta Tomazio (IF-USP)

Yara Hellen Firmo Gomes (IFSC-USP)

Fernando Wellysson de Alencar Sobreira (IFCE & IIF-UFRN)

Klaus Werner Capelle (UFABC & IIF-UFRN)

Robson Campanerut da Silva (IFCE)



Instituições apoiadoras



Instituições promotoras

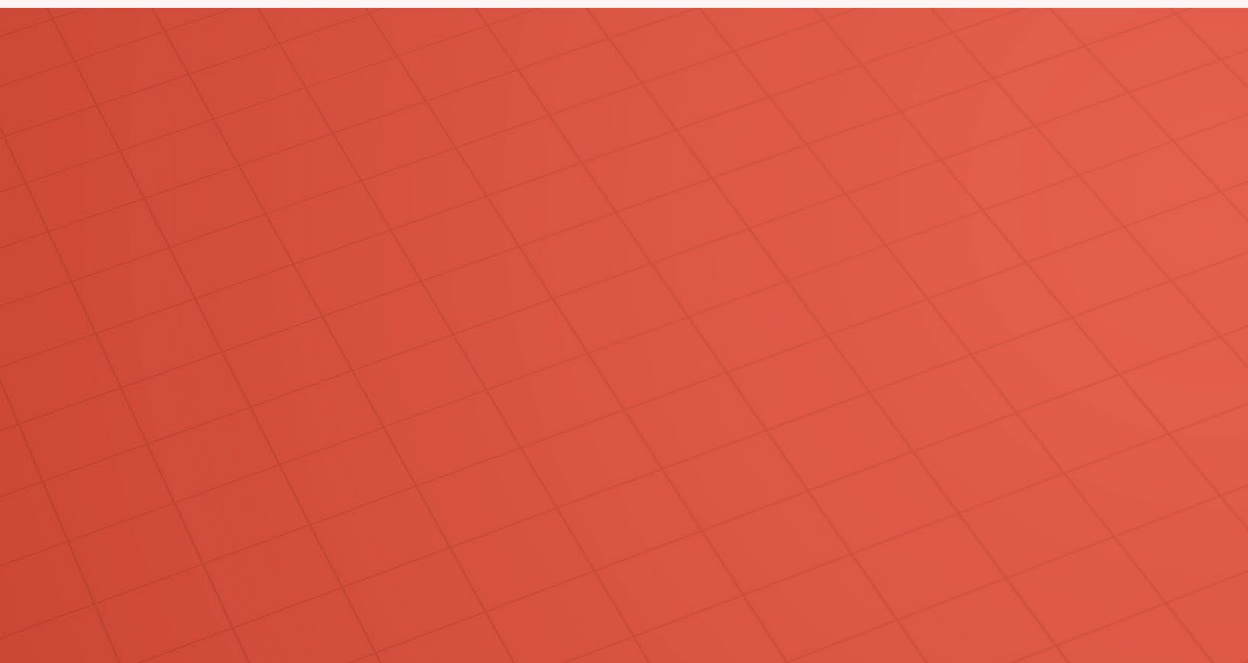


Financiamento

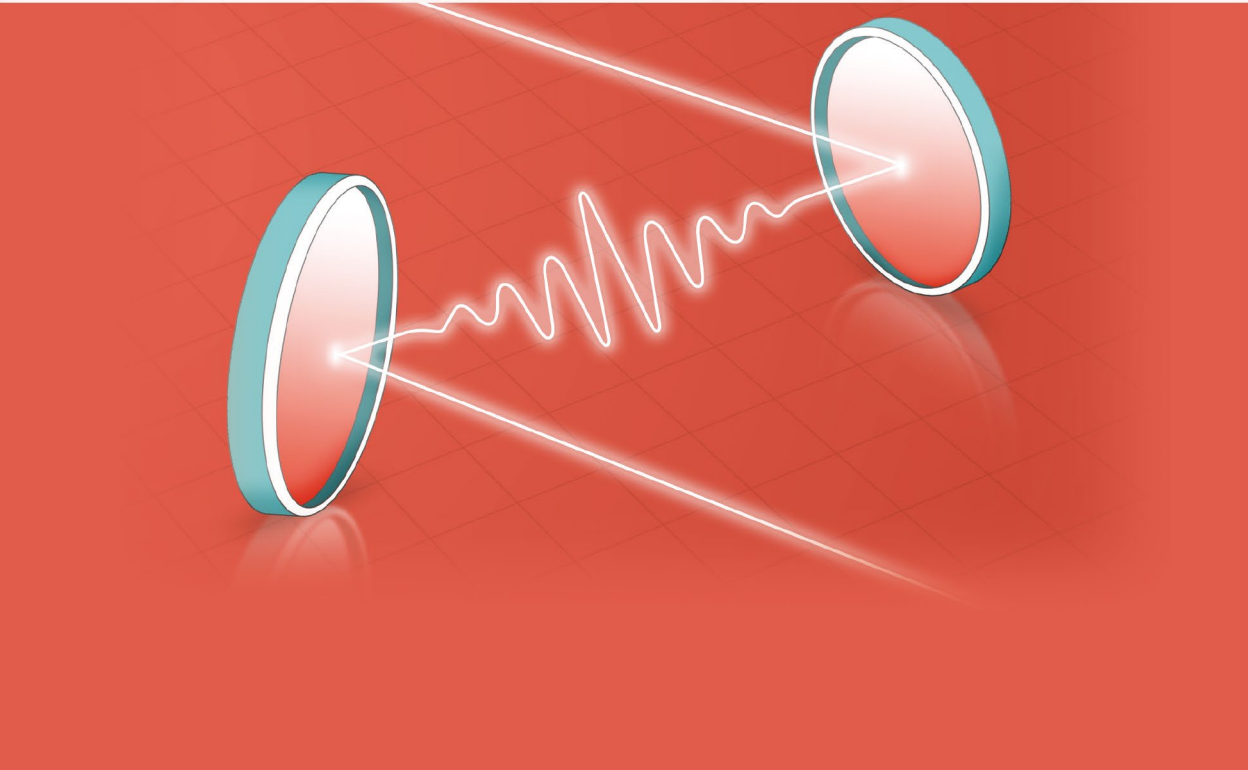


Instituição realizadora











ALECE

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA
DO ESTADO DO CEARÁ

Mesa Diretora 2025-2026

Deputado Romeu Aldigueri
Presidente

Deputado Dannel Oliveira
1º Vice-Presidente

Deputada Larissa Gaspar
2º Vice-Presidente

Deputado De Assis Diniz
1º Secretário

Deputado Jeová Mota
2º Secretário

Deputado Felipe Mota
3º Secretário

Deputado João Jaime
4º Secretário



Escaneie o QR CODE
e acesse nossas
publicações