

**INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CÂMPUS ARARANGUÁ**

LICENCIATURA EM FÍSICA

LARISSA DO NASCIMENTO PIRES

**AS MULHERES E O PRÊMIO NOBEL: AS PESQUISAS DE MARIA GOEPPERT-
MAYER E DONNA STRICKLAND E SUAS IMPLICAÇÕES NO ENSINO DE FÍSICA**

**ARARANGUÁ
2019**

**INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CÂMPUS ARARANGUÁ**

LICENCIATURA EM FÍSICA

LARISSA DO NASCIMENTO PIRES

**AS MULHERES E O PRÊMIO NOBEL: AS PESQUISAS DE MARIA GOEPPERT-
MAYER E DONNA STRICKLAND E SUAS IMPLICAÇÕES NO ENSINO DE FÍSICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Araranguá, como parte das exigências para obtenção do título em Licenciada em Física.

Orientador: Prof. Me. Israel Müller dos Santos
Coorientador: Prof. Dr. Felipe Damasio

**ARARANGUÁ
2019**

Dedico este trabalho às pessoas que eu mais amo neste mundo: meus pais, Edio e Rose.

AGRADECIMENTOS

Ao escrever estes agradecimentos, o único sentimento que possuo é gratidão por inúmeras pessoas que me apoiaram para que eu pudesse desenvolver este trabalho. Primeiramente, quero agradecer a Deus, por me conceder saúde, me ensinar a ter resiliência frente às adversidades, mas acima de tudo, me abençoar com essas pessoas maravilhosas.

Minha mãe Rose, obrigada por ser a minha melhor amiga, obrigada por acreditar em mim, obrigada por sempre me incentivar a seguir no caminho do conhecimento. Meu pai Edio, que sempre me ensinou a me esforçar pelo que acredito e por sempre me apoiar para que eu pudesse realizar meus sonhos. Meus avós Maria e José, por serem meus exemplos de pessoas guerreiras e amorosas, obrigada pelas constantes palavras de incentivo. Agradeço a minha família como um todo, mas, em especial, ao meu priminho Vicente, que com sua contagiante alegria e pouquíssima idade já sabe que a Lua está no céu. Que Deus sempre abençoe vocês.

Em especial, quero agradecer ao meu orientador Israel Müller dos Santos, pela amizade construída nesses anos de curso, por ser esse incrível orientador e professor, só tenho a agradecer por me ajudar a realizar este trabalho; também, deixo meus agradecimentos ao meu coorientador, Felipe Damasio, por ser uma das pessoas a me oportunizar adentrar no mundo da pesquisa. Também, agradeço aos membros da banca examinadora, Mônica Knöpker e Bernardo Walmott Borges, pelas relevantes contribuições dadas a este trabalho.

De modo geral, agradeço aos demais professores e professoras do IFSC pelo excelente trabalho desenvolvido na instituição e por serem meus exemplos de luta a favor de uma educação pública, gratuita e de qualidade. Agradeço aos meus amigos e colegas da licenciatura pelas inúmeras experiências compartilhadas. Em momentos de contratemplos quanto à profissão docente, possuir os maravilhosos exemplos de futuros docentes como vocês é uma das razões que me proporciona acreditar em tempos melhores para a educação.

Por último, quero agradecer a todas as mulheres, especialmente as cientistas, as educadoras e as professoras que pude conhecer na minha trajetória escolar e acadêmica, por serem meus exemplos de resistência frente às adversidades deste mundo e por serem minhas inspirações quanto à profissional que pretendo ser.

Do girls only have to learn how to read just to study cook books?
Maria Goeppert-Mayer, laureada no Prêmio Nobel de Física em 1963

RESUMO

Devido a uma construção histórico-cultural, não somente a ciência, mas a produção intelectual em sua quase totalidade foi compreendida como sendo elaborada predominantemente por homens, o que revela um processo de ocultação histórica das mulheres na construção da ciência. Por exemplo, as premiações no Prêmio Nobel de Física mostram que, desde o ano de 1901, somente três mulheres foram laureadas. Assim, percebe-se que a ausência da diversidade e da pluralidade no meio científico ainda se apresenta no histórico da premiação. Ao se pensar no contexto da educação básica, o panorama que se apresenta é um tanto semelhante, pois há um desconhecimento, por parte dos alunos e alunas, sobre figuras femininas que representem cientistas. A partir desse contexto, considerando aspectos da Teoria da Aprendizagem Significativa Crítica e das Unidades de Ensino Potencialmente Significativas, além dos pressupostos epistemológicos de Paul Feyerabend, este trabalho apresenta, organizados no formato de artigos, textos instrucionais e propostas didáticas que abordem os conhecimentos desenvolvidos pelas cientistas Maria Goeppert-Mayer e Donna Strickland, laureadas no Prêmio Nobel de Física, cujas contribuições são relativas, respectivamente, às áreas de física nuclear e de física dos lasers. Embora os materiais não tenham sido implementados, acredita-se que estes possam ajudar docentes de Física a inserirem discussões sobre a presença das mulheres na ciência, além de propiciarem o reconhecimento das pesquisas desenvolvidas por estas cientistas. Dessa maneira, entende-se que este trabalho pode ajudar docentes e discentes a construir uma visão científica com mais pluralidade.

Palavras-chave: Ensino de Física. Mulheres na Ciência. Prêmio Nobel de Física. Maria Goeppert-Mayer. Donna Strickland.

ABSTRACT

Due to a historical-cultural building, not only science, but almost all intellectual production was understood to be predominantly elaborated by men, which reveals a process of historical hiding of women in the construction of science. For example, the awards in Physics Nobel show that, since 1901, just three women were awarded. Accordingly, it's possible to realize that the absence of diversity and plurality in the scientific environment is still perceived in the history of the award. When thinking about the context of scientific education, the scenario presented is somewhat similar, because there is a lack of knowledge about females who represent scientists. From this context, taking into account aspects of Theory of Meaningful Critical Learning and Potentially Meaningful Teaching Units such as epistemological postulates of Paul Feyerabend, this work presents, in the format of articles, instructional texts and didactical proposals that address the knowledge developed by scientists Maria Goeppert-Mayer and Donna Strickland, winners of the Nobel Prize in Physics, whose contributions are related, respectively, to the areas of nuclear physics and physics of lasers. Although the materials have not been implemented, it is believed they can help physics teachers to insert discussions about the presence of women in science, in addition to providing recognition for the researches developed by these scientists. Thus, it is understood this work can help teachers and students to build a scientific view with more plurality.

Keywords: Physics Teaching. Women in Science. Nobel Prize in Physics. Maria Goeppert-Mayer. Donna Strickland.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Maria Goeppert-Mayer

Figura 1 - Maria Goeppert-Mayer	29
Figura 2 - Maria Goeppert-Mayer e Max Born em meados dos anos 30	30
Figura 3 - Maria Goeppert-Mayer e seu esposo	32
Figura 4 - Maria Goeppert-Mayer e outros cientistas em Argonne.....	33
Figura 5 - Maria Goeppert-Mayer na cerimônia do Nobel	33
Figura 6 - Carta de Nuclídeos	37
Figura 7 - Goeppert-Mayer em meados dos anos 50.....	38
Figura 8 - Artigo <i>On Closed Shells in Nuclei</i>	39
Figura 9 - Números mágicos nas cartas de nuclídeos	40
Figura 10 - Números mágicos e exemplos de átomos.....	40
Figura 11 - Enrico Fermi e Maria Goeppert-Mayer em Michigan, EUA.....	41
Figura 12 - Níveis de energia de núcleons agrupados em camadas	42
Figura 13 - Tabela de isótopos organizados pelo número atômico	46

Donna Strickland

Figura 1 - Arthur Ashkin, Gérard Mourou e Donna Strickland	63
Figura 2 - Donna Strickland em 1985	64
Figura 3 - Donna Strickland e Francis Arnold, que recebeu a láurea em Química	64
Figura 4 - Charles Townes em 1961	65
Figura 5 - Artigo <i>Infrared and Optical Masers</i>	66
Figura 6 - Theodore Maiman em 1960.....	67
Figura 7 - Artigo <i>Spectroscopy and Stimulated Emission in Ruby</i>	67
Figura 8 - Sérgio Porto	67
Figura 9 - (a) Emissão estimulada e (b) emissão espontânea.....	69
Figura 10 - Sistema de três e quatro níveis energéticos	71
Figura 11 - Representação da luz <i>laser</i> em termos da ondulatória.....	72
Figura 12 - Arthur Ashkin em 1988	73
Figura 13 - Variação do momento linear do fóton	74
Figura 14 - Esquema de forças aplicadas pela pinça óptica	75
Figura 15 - Artigo <i>Compression of Amplified Chirped Optical Pulses</i>	76
Figura 16 - Esquema da técnica <i>chirped pulse amplification</i>	77
Figura 17 - Constituição das frequências de pulsos curtos	78
Figura 18 - Gráficos relativos aos pulsos de <i>laser</i> de curta duração	79
Figura 19 - Experimento relativo à reflexão interna total de um feixe de luz.....	81

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1	Aporte Educacional: Teoria de Aprendizagem Significativa Crítica	12
2.2	Aporte Epistemológico: Filosofia da Ciência de Paul Feyerabend.....	14
2.3	Aporte Metodológico: Unidades de Ensino Potencialmente Significativas	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Abordagem sobre mulheres cientistas no ensino de Física	18
3.2	Abordagem da temática <i>laser</i> no ensino de Física	19
3.3	Abordagem da temática <i>física nuclear e atômica</i> no ensino de Física	21
4	METODOLOGIA.....	23
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
5.1	Maria Goeppert-Mayer.....	24
5.2	Donna Strickland.....	59
5.3	Impressões dos Artigos e das Propostas Didáticas.....	93
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98

1 INTRODUÇÃO

Ao analisar a produção científica nos últimos 300 anos, Attico Chassot descreve em seu reconhecido trabalho *A Ciência é Masculina? É Sim Senhora!* que a concepção sobre a ciência ainda é associada a um estereótipo masculino. Devido a uma construção histórico-cultural, não somente a ciência, mas a produção intelectual em sua quase totalidade fora compreendida como sendo elaborada predominantemente pelos homens. Nesse sentido, o trabalho científico se construiu culturalmente como um campo reservado às pessoas com determinadas características, como a objetividade e a racionalidade (FIÚZA *et al.*, 2009), associadas socialmente à figura masculina: essa é ainda uma das concepções deformadas sobre o trabalho científico presentes no imaginário social (GIL-PÉREZ *et al.*, 2001). Em outras palavras, esse discurso desconsidera a ciência como uma atividade coletiva, cooperativa e multifacetária (MOREIRA, MASSONI; OSTERMANN, 2007).

Essa concepção, proveniente de uma narrativa científica baseada na linearização dos feitos científicos (LUCENA, 2019) revela um processo de ocultação histórica das mulheres na construção da ciência (HAYASKI *et al.*, 2007), que, de certo modo, influenciou a construção de preconceitos sociais relativos às mulheres que passaram a ingressar na carreira científica (CHARYTON *et al.*, 2011). É possível dizer que elementos machistas ainda persistem no imaginário social, como justamente o entendimento de que homens e mulheres possuem diferentes aptidões para determinadas carreiras (CUNHA *et al.*, 2014). Considerando a existência desse contexto, podemos responder afirmativamente a seguinte pergunta: será que “não continuamos demarcando quais são os espaços públicos ou quais as profissões dos homens e quais as das mulheres?” (CHASSOT, 2019, p. 63).

Historicamente, apesar da constante participação oculta das mulheres na ciência, muitas delas enfrentaram percalços nessa trajetória, como na área da Física. A célebre Marie Curie (1867-1934), por exemplo, vivenciou algumas dificuldades na tentativa de ser reconhecida em suas pesquisas sobre a natureza atômica das radiações de Urânio, que lhe concedeu o Nobel de Física de 1903, em parceria com seu marido Pierre Curie (1859-1906) e Henri Becquerel (1852-1908). Todavia, antes disso, Marie Curie necessitou enfrentar a discriminação de físicos franceses, que enviaram cartas de indicação ao Comitê do Prêmio solicitando a exclusão da cientista de sua própria pesquisa (CORDEIRO, 2017).

Outras cientistas mulheres vivenciaram situações semelhantes: a física austríaca Lise Meitner (1878-1968), responsável pela descrição do processo de fissão nuclear, não fora reconhecida no Prêmio Nobel de Física de 1944, que laureou somente Otto Hahn (1879-

1968), seu parceiro de trabalho (MIZRAHI, 2006). Isso também ocorreu de maneira mais expressiva com a britânica Rosalind Franklin (1920-1958): a cientista morreu antes que pudesse contestar a decisão proferida pelo Nobel de Medicina de 1962, entregue a James Watson (1928-) e Francis Crick (1916-2004). Sem o consentimento da cientista, os laureados utilizaram os resultados de Franklin sobre a determinação do modelo de dupla hélice do DNA, obtidos por meio do processo de difração de raios-X (CHARYTON *et al.*, 2011). Também, a educação científica não retrata a trajetória acadêmica da astrônoma britânica Jocelyn Bell Burnell (1943-), igualmente não reconhecida no Prêmio Nobel de Física de 1974 por suas pesquisas sobre a existência dos pulsares (GARRETT, 2018).

Frente ao exposto, um possível indicador que possibilita problematizar a presença da mulher na ciência são as premiações científicas, como o Prêmio Nobel (ZAGUETTO; VENANCIO, 2014), considerado a láurea de maior prestígio na comunidade científica desde o início do Século XX (CORDEIRO, 2017). Apesar dessa premiação, em específico, descrever referências aos trabalhos de vários cientistas em suas Conferências Nobel, (CORDEIRO, 2016), a ausência da diversidade e da pluralidade no meio científico é ainda percebida no histórico da premiação (CHARYTON *et al.*, 2011).

Apesar do exemplo da premiação do Prêmio Nobel da Paz para a paquistanesa Malala Yousafzai, considerada símbolo da luta dos direitos ao acesso à educação para meninas e adolescentes (ADABO; QUITÉRIO, 2014), a ausência da diversidade se apresenta no fato das mulheres corresponderem a pouco mais de 5% das personalidades laureadas. Mais especificamente, no caso do Nobel de Física, enquanto 210 homens foram premiados (NOBEL PRIZE, 2019), somente três mulheres foram laureadas: Marie Curie (1903), Maria Goeppert-Mayer (1963) e Donna Strickland (2018). A partir desses números, calculou-se que a participação feminina no Nobel de Física corresponde a pouco mais de 1%. Em comparação a porcentagem de mulheres presentes nas outras categorias, o Prêmio Nobel de Física apresenta a menor quantidade de mulheres laureadas.

Ao pensarmos no contexto da educação básica, o panorama que se apresenta é um desconhecimento, por parte dos alunos e alunas, sobre figuras femininas que representem cientistas (CARVALHO; CASAGRANDE, 2011), que pode estar vinculado com o fato de que “a disseminação de uma concepção elitista da ciência tem sido também fator para a invisibilidade da mulher no conhecimento científico escolar” (CORDEIRO, 2016, p. 154). Em outras palavras, narrativas sobre mulheres cientistas ainda se demonstram pouco exploradas em disciplinas relacionadas às Ciências, principalmente a Física e a Química

(SCHIEBINGER, 2008). Esta situação pode ser proveniente de um ensino que apresenta os conhecimentos sem considerar seu processo de construção (HEERDT; BATISTA, 2016).

Dessa maneira, considerando a visível necessidade quanto à mudança dessa realidade, este trabalho pretende responder ao seguinte **problema de pesquisa**: *É possível desenvolver ações no contexto de ensino de ciências que possibilitem os meninos e meninas construírem uma visão científica com mais pluralidade para que possam se reconhecer como possíveis atuantes no meio científico?* Para responder a esse questionamento, este trabalho considerará como **hipótese** que, a partir do desenvolvimento de textos instrucionais e de propostas didáticas que discutam exemplos de mulheres na ciência, como as físicas premiadas no Nobel de Física, há a possibilidade de que, por meio da ação docente, os alunos e as alunas possam compreender a ciência como construída com base na representatividade e diversidade. Dito de outra forma, o desenvolvimento e a disponibilização desses materiais para os docentes pode ajudar na elaboração de momentos em sala de aula que contenham discussões sobre a presença das mulheres na ciência. Cabe enfatizar que a escolha do Prêmio Nobel de Física para essa discussão é apenas um recorte para abordagem dessa temática na educação científica, considerando que se entende que há outras premiações igualmente relevantes para reconhecimento de pesquisas científicas.

Como apresentado em pesquisas em educação em ciências (CORDEIRO, 2016; DAMASIO, 2017; JORGE, 2018), este **trabalho** descreverá dois artigos sobre as contribuições das cientistas laureadas no Prêmio Nobel de Física, Maria Goeppert-Mayer e Donna Strickland, além de propostas didáticas que articulem os conhecimentos desenvolvidos pelas cientistas no contexto de ensino de Física. Ainda que não seja uma prática comum, a escrita dos artigos possibilitará um destino mais imediato e maior visibilidade dos resultados para os docentes, visto que ao serem publicados em periódicos, os artigos possibilitam “uma maior contribuição tanto para os professores que pretendam fazer uso dos artigos em suas atividades de sala de aula, quanto para os pesquisadores que queiram utilizar os mesmos em suas investigações” (TEIXEIRA, 2010, p. 15).

Considerando o aporte metodológico das Unidades de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) construídas sobre o referencial educacional descrito pela Teoria da Aprendizagem Significativa Crítica (TASC) de Marco Antônio Moreira, além da epistemologia de Paul Feyerabend, nesses artigos serão apresentados textos instrucionais e propostas didáticas que vislumbrem possíveis aplicações dos conhecimentos desenvolvidos pelas cientistas no contexto de ensino de Física, de maneira a contrapor a ausência de pesquisas no viés da educação científica que explorem mulheres cientistas (LIMA, 2015).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo da educação em ciências diz respeito a possibilitar que os alunos possam interpretar o mundo a partir da linguagem da ciência (MOREIRA, 2004). Essa interpretação deve considerar não somente a reflexão de problemas que envolvem os conceitos científicos, mas também que os alunos sejam capazes de abordar aspectos históricos, epistemológicos, sociais e culturais acerca das ciências. A partir dessas considerações, Moreira (2004) ratifica a importância do desenvolvimento de pesquisas sobre educação em ciências. Contudo, apesar da existência de pesquisas substanciais acerca desse campo de estudo, o autor descreve que muitas delas, por exemplo, são omissas na definição de referenciais teóricos, metodológicos e epistemológicos. Segundo o autor, entretanto, quando estes referenciais são abordados, muitas vezes não se articulam de maneira coerente com a proposta de pesquisa.

Em busca de não repetir isso, serão evidenciados aspectos dos aportes que conduzirão este trabalho, a saber: referencial educacional – Teoria de Aprendizagem Significativa Crítica; referencial epistemológico – Filosofia da Ciência de Paul Feyerabend; e referencial metodológico – Unidades de Ensino Potencialmente Significativas. Compreende-se que a articulação desses aportes, que se apresentam como complementares (DAMASIO; PEDUZZI, 2015), possibilitará o desenvolvimento de propostas didáticas que considerem discussões *de e sobre* ciência, de maneira que os alunos possam compreender o empreendimento científico como uma atividade baseada na pluralidade.

2.1 Aporte Educacional: Teoria da Aprendizagem Significativa Crítica

A Teoria da Aprendizagem Significativa Crítica, desenvolvida por Marco Antonio Moreira, é baseada na Teoria de Aprendizagem Significativa proposta por David Ausubel. Esse autor descreve que o elemento mais importante para a aprendizagem significativa diz respeito aos conhecimentos que o aprendiz já sabe (MOREIRA, 1999). Esse processo ocorrerá, portanto, quando “uma nova informação se relaciona com um aspecto relevante da estrutura de conhecimento do indivíduo” (MOREIRA; MASINI, 2001, p. 17).

Dito de outra forma, a aprendizagem significativa se manifesta quando os conhecimentos científicos se associam de maneira não arbitrária e substantiva à estrutura cognitiva do aprendiz (MOREIRA, 2011). A característica de não arbitrariedade está relacionada com os novos conhecimentos que interagem com os chamados subsunçores, que são justamente esses conhecimentos que preexistem na estrutura cognitiva dos alunos (MOREIRA; MASINI, 2001). Nesse sentido, “a aprendizagem significativa ocorre quando a

nova informação ancora-se em *conceitos ou proposições relevantes*, preexistentes na estrutura cognitiva do aprendiz” (MOREIRA, 1999, p. 151, grifo do autor). A substantividade, por sua vez, diz respeito ao processo em que os conhecimentos se ancoram na estrutura cognitiva de maneira não literal, o que implica que o conhecimento é incorporado na estrutura cognitiva do aprendiz com um determinado significado para o indivíduo.

Moreira (2011) descreve que a aprendizagem significativa só será desenvolvida ao se preconizar as seguintes condições: o material de aprendizagem deve ser potencialmente significativo, sendo “relacionável com a sua estrutura de conhecimento de forma não-arbitrária e substantiva” (MOREIRA; MASINI, p. 23). Cabe destacar que os materiais de aprendizagem possuem somente uma potencialidade em serem significativos, pois a atribuição de significados aos materiais só ocorrerá por meio dos indivíduos. Além disso, o aprendiz deve possuir uma predisposição para aprender, o que implica da parte de quem aprende querer relacionar os novos conhecimentos com seus subsunçores. Nesse sentido, Moreira (1999, p. 144) argumenta que “independente de quão potencialmente significativo seja o material a ser aprendido, se a intenção do aprendiz for simplesmente memorizá-lo [...] tanto o processo de aprendizagem quanto seu produto serão mecânicos”.

Entretanto, considerando os atuais tempos de mudanças rápidas e drásticas, o autor também argumenta que não basta que a aprendizagem seja significativa; ela igualmente necessita ser subversiva e crítica. Nesse sentido, a Teoria da Aprendizagem Significativa Crítica indica elementos que possibilitam ao sujeito fazer parte de sua cultura, mas, ao mesmo tempo, se posicionar de maneira reflexiva sobre ela (DAMASIO; PEDUZZI, 2015). A partir disso, possibilita que, para a sobrevivência em nossa sociedade contemporânea, o indivíduo compreenda que o desenvolvimento científico está longe de ser permeado por verdades fixas, definições absolutas e entidades isoladas (MOREIRA, 2006).

Concluindo, entende-se que os princípios da Aprendizagem Significativa Crítica descrita por Marco Antônio Moreira podem servir de auxílio à construção de propostas didáticas, como as relativas às mulheres laureadas no Prêmio Nobel de Física, que possibilitem aos estudantes aprenderem criticamente sobre ciência: questionando o que aprendem, aprendendo a procurar outras fontes de conhecimento e entendendo que o desenvolvimento científico possui um caráter dinâmico e humano (DAMASIO; PEDUZZI, 2015).

2.2 Aporte Epistemológico: Filosofia da Ciência de Paul Feyerabend

Ainda que o professor ou a professora não tenha consciência, o posicionamento epistemológico sobre a ciência possivelmente influencia as práticas dos docentes em ciências, mesmo que não abordem aspectos sobre História ou Filosofia da Ciência de maneira explícita em suas aulas (ARTHURY, 2010). Nesse sentido, Matthews (1995) argumenta que no processo de educação científica sempre há uma imagem de ciência que é apresentada pelo docente. Gil-Pérez *et al.* (2001) apresenta que, por meio uma análise dos discursos do professorado, o trabalho científico é geralmente descrito como sendo uma atividade empírico-indutivista, rígida, exclusivamente analítica, acumulativa, individualista e elitista.

A partir desse contexto, se percebe que visões epistemológicas como as supracitadas podem causar a construção de opiniões inadequadas acerca do empreendimento científico e, no contexto de sala de aula, esse posicionamento evidencia a ocorrência de um treinamento científico (ARTHURY, 2010). Dessa maneira, como uma possível alternativa para evitar demasiadas simplificações e deformações sobre a ciência, se considera como relevante a discussão de aspectos histórico-filosóficos no contexto de ensino de ciências, que possibilitam

[...] humanizar as ciências e aproximá-las dos interesses pessoais, éticos, culturais e políticos da comunidade; [...] tomar as aulas de ciências mais desafiadoras e reflexivas, permitindo, deste modo, o desenvolvimento do pensamento crítico; [...] contribuir para um entendimento mais integral de matéria científica, isto é, podem contribuir para a superação do “mar de falta de significação” que se diz ter inundado as salas de aula de ciências, onde fórmulas e equações são recitadas sem que muitos cheguem a saber o que significam; [...] melhorar a formação do professor auxiliando o desenvolvimento de uma epistemologia da ciência mais rica e mais autêntica (MATTHEWS, 1995, p. 165).

Nesse sentido, de maneira a possibilitar a discussão de uma ciência como uma atividade repleta de incertezas e questionamentos, se considerará como aporte epistemológico a Filosofia da Ciência de Paul Feyerabend (1924-1994) para construção das propostas didáticas. Ainda que muitos trabalhos lhe submetam a alcunha de “pior inimigo da ciência” (DAMASIO; PEDUZZI, 2017), seus conhecimentos difundiram o conceito de *anarquismo epistemológico*. Isto porque, Feyerabend diz que “a ciência é um empreendimento essencialmente anárquico: o anarquismo teórico é mais humanitário e mais suscetível de estimular o progresso do que suas alternativas representadas por ordem e lei” (1977, p. 17).

Nesse sentido, Feyerabend considera o conceito de anarquismo como necessário não somente para o progresso da ciência, mas também para o desenvolvimento da cultura em sua totalidade (FEYERABEND, 1977). Dessa forma, suas reflexões filosóficas nos permitem

entender que, no contexto da ciência, não se deve existir um conjunto de regras imutáveis, fixas e universais que caracterizem o processo de *se fazer ciência* (REGNER, 1996), pois, historicamente, o que se apresenta é que a partir da transgressão dessas regras que se possibilitou o progresso da ciência. Feyerabend (1977, p. 29) argumenta que “a ideia de conduzir os negócios da ciência com o auxílio de um método, que encerre princípios firmes, imutáveis e incondicionalmente obrigatórios vê-se diante de considerável dificuldade, quando posta em confronto com os resultados da pesquisa histórica”. Nesse sentido, Piovesan e Santos (2017, p. 5) argumentam que “os maiores avanços no campo da física deram-se justamente pelo não seguimento das regras universais da ciência na época impostas ao cientista”.

Dessa forma, a epistemologia de Feyerabend possibilita entender a ciência como construída a partir do pluralismo metodológico, o qual determina a inexistência de princípios universais de racionalidade científica (PIOVESAN; SANTOS, 2017). Ao aproximar sua epistemologia com a proposta deste trabalho, se percebe que, por meio dos exemplos de mulheres cientistas, como Maria Goeppert-Mayer e Donna Strickland, pode ser possível entender a ciência, no contexto de educação científica, como sendo uma construção multifacetária e humana (REGNER, 1996), que sofre influência do contexto sociocultural de cada época e que, principalmente, pode ser desenvolvida a partir do trabalho intelectual de diferentes pessoas. Dessa forma, esses aspectos possibilitam a elaboração de discussões acerca da participação e do reconhecimento de mulheres na ciência.

2.3 Aporte Metodológico: Unidades de Ensino Potencialmente Significativas

De maneira a contribuir quanto às necessárias mudanças nas formas dos processos de ensino, este projeto irá propor como embasamento metodológico as Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS), que, de acordo com Moreira (2011, p. 2) “são sequências de ensino fundamentadas teoricamente, voltadas para a aprendizagem significativa, não mecânica, que podem estimular a pesquisa aplicada em ensino, aquela voltada diretamente à sala de aula”. Isto é, essas sequências de ensino consideram o aporte educacional descrito pela Teoria de Aprendizagem Significativa Crítica.

Para a construção das UEPS, se exige a consideração dos chamados *aspectos sequenciais*, que possibilitam atentar quanto às características necessárias na sequência didática. Esses aspectos recomendam que, primeiramente, seja definido o tópico específico que será abordado, elencando seus aspectos conceituais e procedimentais. Sabendo que é

necessário considerar as experiências anteriores dos alunos, é preciso desenvolver situações nas quais os alunos manifestem seus conhecimentos prévios, além de propor situações-problema em nível introdutório em que alunos possam mobilizar seus conceitos prévios. Em seguida, deve-se apresentar o conhecimento a ser estudado, considerando o processo de *diferenciação progressiva*, que significa discutir o conhecimento, primeiramente, em seus aspectos mais gerais, e na sequência, vincular aspectos mais específicos desse conhecimento em um nível mais alto de complexidade por meio de novas situações-problema. Na conclusão da unidade, é necessário elaborar uma retomada dos conhecimentos mais relevantes, procurando promover a *reconciliação integradora*, a qual consiste em um momento de discussão dos conhecimentos em uma perspectiva integradora (MOREIRA, 2011).

Moreira (2011) argumenta quanto à necessidade da avaliação da aprendizagem ser realizada ao decorrer da implementação das unidades de ensino, por meio das avaliações formativa e somativa. A primeira diz respeito a uma avaliação elaborada de maneira contínua, a qual avalia o progresso dos discentes no processo de aprendizagem. A segunda, por sua vez, implica na elaboração de uma avaliação que proponha questionamentos que promovam captação de significados e que possam abordar os conhecimentos abordados em diferentes contextos. Ainda segundo o autor, considera-se que a unidade de ensino só será exitosa ao promover evidências de aprendizagem significativa. É relevante ressaltar que, esse processo deve considerar integralmente a mediação do professor, bem como a socialização dos conhecimentos entre os alunos.

Procurou-se considerar os aspectos supracitados no desenvolvimento das propostas didáticas, baseadas nas Unidades de Ensino Potencialmente Significativas, para a abordagem dos conhecimentos desenvolvidos pelas cientistas Maria Goeppert-Mayer e Donna Strickland, laureadas no Prêmio Nobel de Física. Nos artigos que foram desenvolvidos, esses aspectos sequenciais foram considerados na construção das propostas didáticas, que consideram a discussão concomitante de conhecimentos de Física Moderna e Contemporânea, além de discussões *sobre* ciência, relativas ao reconhecimento de mulheres cientistas no empreendimento científico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Antes de tudo, é possível dizer que essa seção do trabalho se justifica pelo fato das temáticas que foram analisadas não se evidenciarem em livros didáticos; o que possivelmente indica que os materiais mais próximos aos professores não estão próximos daquilo que as pesquisas em educação em ciências há tempos preconizam. Assim, a revisão bibliográfica se configurou a partir de um recorte de artigos científicos do último decênio (2008 a 2018), objetivando-se reconhecer e se apropriar de trabalhos científicos já existentes que abordem as temáticas que foram discutidas no desenvolvimento da pesquisa. Os descritores que guiaram a revisão foram os seguintes: pesquisas que abordem discussões sobre mulheres cientistas ou que utilizem esses exemplos no contexto das aulas de física; pesquisas que promovam a abordagem em sala de aula da temática *laser*; e trabalhos que apresentem a abordagem da temática *física nuclear e atômica* em sala de aula.

É relevante destacar que não se pretende elaborar um estado da arte sobre os indicadores apresentados, mas descrever os trabalhos que contribuíram de alguma maneira com o desenvolvimento desta pesquisa. Os periódicos consultados possuem conceitos A e B no Qualis/CAPES na área de ensino. Considerando a busca em periódicos que promovam a divulgação científica dessas temáticas na área de ensino de Física, as revistas selecionadas foram as seguintes: Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF), Caderno Brasileiro de Ensino de Física (CBEF), Investigação em Ensino de Ciências (IENCI), Experiências em Ensino de Ciências (EENCI), Ciência & Educação (C&E), Física na Escola (FnE) e Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (EPEC). A Tabela 1 apresenta a quantidade de artigos respectivos a cada descritor encontrados em cada periódico.

Tabela 1 - Lista de periódicos analisados

PERIÓDICO	MULHERES CIENTISTAS	TEMÁTICA <i>LASER</i>	TEMÁTICA <i>FÍSICA NUCLEAR E ATÔMICA</i>
RBEF	Agrello e Garg (2009)	Toledo <i>et al.</i> (2010) Silva Neto e Freire Junior (2017)	Parente, Santos e Tort (2014)
CBEF	Cordeiro (2017) Menezes <i>et al.</i> (2018)		Boff, Bastos e Melquiades (2017)
IENCI	Heerdts e Batista (2016)		
EENCI		Vicentini <i>et al.</i> (2011) Andrade, Genovese e Genovese (2017)	Alves e Alves (2017) Brugliato e Almeida (2017) Ribeiro e Gonçalves (2018)
C&E	Silva e Ribeiro (2014)		Silva <i>et al.</i> (2014)
FnE	Brunelli, Damasio e Raicik (2017)		Schappo (2010)
EPEC	Teixeira e Costa (2008)		

Fonte: Autoria própria, 2019.

3.1 Abordagem sobre mulheres cientistas no ensino de Física

Primeiramente, se procurou por pesquisas as quais apresentassem uma abordagem quanto à participação de mulheres na ciência. A partir de um retrato estatístico sobre a realidade acadêmica de alguns países em desenvolvimento, tais como o Brasil e a Índia, Agrello e Garg (2009) apresentaram um cenário de baixa representatividade das mulheres em diferentes campos da Física. Considerando as estatísticas referentes à área acadêmica no Brasil, as autoras descreveram que a porcentagem de mulheres no campo da Física é inexpressiva desde a sua admissão nos cursos de graduação: apenas 15%. Nesse contexto, as autoras argumentam a necessidade de uma alteração desse cenário, a partir de uma mudança na percepção das meninas sobre os cientistas e sobre as mulheres como cientistas.

Da mesma maneira, a pesquisa de Menezes *et al.*, (2018) contribuiu nessa discussão com um entendimento quantitativo acerca da presença das mulheres na ciência nos cursos de graduação e de pós-graduação em Física da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Ao investigar os dados relativos ao período de 1988 a 2017, os autores argumentaram a existência do chamado *efeito tesoura*, o qual descreve que, de maneira oposta ao percentual de homens que permanecem nos programas de pós-graduação, a quantidade de mulheres sofre uma tendência de diminuição conforme se avança na trajetória científica e acadêmica.

De forma a evidenciar os possíveis motivos que resultam na baixa representatividade de mulheres na ciência, a pesquisa de Silva e Ribeiro (2014) desenvolveu uma investigação, por meio de entrevistas, sobre a trajetória acadêmica e profissional de algumas mulheres que atuam em universidades e instituições de pesquisa no Rio Grande do Sul. A análise elaborada pelas autoras elencou que são inúmeros os contratemplos que se colocam frente à perspectiva de uma mulher para seguir a carreira científica: a dupla jornada de trabalho, a maternidade e o preconceito de gênero. Dessa maneira, as autoras concluíram que há a necessidade de problematizar a neutralidade da ciência frente às questões de gênero, com o objetivo de revelar as problemáticas que perpassam o campo científico, como a supracitada sub-representação feminina em determinadas áreas da ciência.

Analisando o campo da educação científica, cabe destacar a importância de pesquisas sobre o posicionamento dos docentes em relação à presença das mulheres no campo científico. Dentre as investigações desse gênero, há a de Teixeira e Costa (2008), na qual realizaram uma análise com estudantes universitários de um curso de Licenciatura em Física. Os pesquisadores constataram que os licenciandos, apesar da menção expressiva da cientista Marie Curie, reconheciam poucos exemplos de mulheres cientistas, ao contrário da

diversidade de exemplos masculinos apresentadas pelos alunos. Nesse sentido, os autores argumentam que há a necessidade de uma mudança na perspectiva dos futuros docentes, que os coloquem como agentes de mudança dessa realidade em suas futuras práticas pedagógicas para que apresentem a ciência como um empreendimento coletivo, construído tanto por homens quanto por mulheres.

Reconhecendo a necessidade de mudanças nesse contexto, Heerdt e Batista (2016) elaboraram e implementaram uma unidade didática que abordou aspectos sobre Natureza da Ciência vinculada à visibilidade de gênero em um curso de formação de professores. Segundo as autoras, a análise dos dados pode evidenciar que, apesar de alguns docentes naturalizarem e desconsiderarem as discussões de gênero, além de apresentar posicionamentos lineares e acumulativos sobre a ciência, outros docentes, a partir do entendimento que o conhecimento científico é provisório e está relacionado aos contextos sociais e culturais, passaram a considerar a existência das questões de gênero na ciência, possibilitando que desenvolvam um ensino mais contextualizado sobre as ciências.

Também se elaborou uma análise quanto à existência de pesquisas que discutam a utilização de exemplos de mulheres cientistas no contexto do ensino de Física. Nessa perspectiva, segundo a pesquisa realizada por Cordeiro (2017), a discussão em sala de aula sobre o reconhecimento da história de cientistas mulheres e seus respectivos percalços é uma das maneiras mais consistentes de propiciar o interesse quanto à participação na ciência não somente pelas meninas, mas também pelos meninos. Nesse sentido, um possível exemplo relacionado à abordagem no contexto do ensino de Física, de maneira mais específica, foi descrita na pesquisa de Brunelli, Damasio e Raicik (2017), a qual abordou os conhecimentos desenvolvidos pela cientista brasileira Márcia Barbosa sobre as anomalias da água.

Dessa maneira, ainda que se apresente um consenso, nas pesquisas em educação em ciências, quanto à necessidade de discussão sobre a participação das mulheres na ciência, ainda existem poucos trabalhos que abordem essa temática no contexto da educação básica. Como se pode perceber, não se apresentam trabalhos que abordem, de maneira específica, as cientistas Maria Goepfert-Mayer e Donna Strickland. Nesse sentido, este trabalho, por meio do planejamento de propostas didáticas, objetiva justamente contribuir com essa abordagem.

3.2 Abordagem da temática *laser* no ensino de Física

A escolha da temática *laser* para a elaboração dessa revisão se justifica por ser o conceito da Física que se relaciona diretamente com a pesquisa de Donna Strickland, além de

ser o conceito que contextualizará as contribuições da cientista durante a redação do artigo. Assim, analisando as pesquisas elaboradas entre os anos de 2008 e 2018, percebe-se a existência de poucos trabalhos nos quais é abordada a temática *laser* no ensino de Física. O artigo de Silva Neto e Freire Júnior (2017), por exemplo, se apresentou como um material de apoio para discussões relativas ao desenvolvimento do *laser*. Nesse trabalho, os pesquisadores discorreram a respeito de uma abordagem histórica e conceitual, a partir de aspectos entre ciência e sociedade, em que discutem o desenvolvimento do *laser* no contexto da Guerra Fria.

Os demais trabalhos encontrados apresentaram relatos de experiências sobre a discussão dessa temática em sala de aula. A pesquisa de Vicentini *et al.* (2011) abordou a instrumentação no ensino de Física Moderna a partir do desenvolvimento de experimentos de baixo custo, que foram tanto apresentados em colégios quanto em cursos de formação de professores da rede pública. Uma das propostas experimentais desse projeto utilizou *lasers* para a discussão do conceito de difração da luz.

Outro relato de experiência diz respeito à implementação de uma sequência didática com uma turma de segundo ano do ensino médio, na qual se abordou a temática *laser*, ainda que de maneira pontual, para a discussão sobre as controvérsias existentes entre os formatos de discos para gravação de dados digitais. Nesse sentido, a pesquisa de Andrade, Genovese e Genovese (2017) descrevem que os alunos trouxeram inúmeros exemplos cotidianos acerca de aplicações do *laser*, bem como se mostraram interessados em compreender os processos de gravação e leitura de dados em discos que utilizam o conceito *laser*.

Um último relato de experiência que aplica a discussão sobre os *lasers* de maneira interessante diz respeito à pesquisa de Toledo *et al.* (2010), relativa à construção de um aparato experimental para a obtenção de hologramas. Os autores argumentaram que os *lasers* possuem inúmeras aplicações, podendo, por exemplo, serem utilizados em atividades de ensino-aprendizagem no ensino de Física. Também, os pesquisadores descreveram que a aplicação dessa proposta favoreceu uma melhor compreensão a respeito dos conceitos de óptica associado ao processo holográfico, além de propiciar uma maior motivação dos alunos para o aprendizado da física.

Nesse sentido, ainda que se reconheça a importância dos *lasers* em inúmeras aplicações tecnológicas e cotidianas, percebe-se que poucas pesquisas sobre essa temática foram elaboradas em um período de dez anos. Nesse sentido, a proposta didática relativa aos conhecimentos desenvolvidos com a ajuda de Donna Strickland pretende contribuir com a discussão dos conhecimentos acerca da temática *laser*. Afinal, conforme apontam as

pesquisas supracitadas, essa abordagem se apresenta como positiva para ser desenvolvida no contexto do ensino de Física.

3.3 Abordagem da temática *física nuclear e atômica* no ensino de Física

Antes de prosseguir à análise, cabe justificar que a escolha da temática *física nuclear e atômica* por serem as áreas da Física que poderão contextualizar historicamente a pesquisa de Maria Goeppert-Mayer durante a escrita do artigo. Assim, de maneira geral, foram encontrados poucos exemplos de trabalhos que abordavam essas temáticas, o que se apresentou de maneira mais expressiva na análise de pesquisas relativas à discussão sobre *física nuclear*. Um dos exemplos encontrados diz respeito à pesquisa de Boff, Bastos e Melquiades (2017). A partir do reconhecimento das carências quanto à elaboração de atividades experimentais no campo da física nuclear, os pesquisadores desenvolveram um aparato experimental com materiais de baixo custo para discussão de conceitos como decaimento radioativo e alcance de partículas alfa. Os autores argumentaram que, apesar da grande maioria dos materiais didáticos não apresentarem experimentos os quais abordem conceitos de física nuclear, é possível realizar uma adaptação nesses conteúdos, como por meio de experimentos de baixo custo.

Ainda sobre trabalhos sobre o ensino de física nuclear, Schappo (2010) elaborou uma espécie de modelização para abordagem do conceito de estabilidade nuclear. Considerando aspectos teórico-metodológicos e epistemológicos, a pesquisa apresentou os fundamentos relativos ao modelo teórico nuclear de gota líquida, levados em consideração na construção de um modelo concreto de núcleo, o qual estabelece uma analogia com o referido modelo teórico. Apesar de não apresentar nenhum relato de experiência em sala de aula, a pesquisa descreveu que a modelização pode contribuir para entendimento de muitos conceitos no âmbito do ensino de Física.

Em relação às discussões específicas sobre *física atômica*, a pesquisa de Brugliato e Almeida (2017) realizou uma análise dos efeitos da elaboração de uma atividade de leitura de um texto de divulgação científica que abordava o modelo atômico de Rutherford e sua possível relação com o desenvolvimento da bomba atômica. Os autores argumentaram que o uso de diferentes formas de discurso que vão além dos livros didáticos, como os textos de divulgação científica, possibilita a discussão de uma física mais próxima da realidade do aluno, além de incentivar o desenvolvimento de atividades de leitura no ambiente escolar.

A pesquisa de Silva *et al.*, (2014), por sua vez, relatou a elaboração de uma oficina temática para ensino do modelo atômico de Bohr. Nesse sentido, os pesquisadores utilizaram uma atividade experimental que abordava a emissão luminosa proveniente dos saltos eletrônicos, que se apresenta em pulseiras distribuídas em festas. Segundo os autores, essa abordagem objetivou aproximar os fundamentos do modelo atômico de Bohr em um possível aspecto do cotidiano dos estudantes, o que proporcionou uma maior participação discente nas atividades propostas em sala de aula.

Ainda com relação ao modelo atômico de Bohr, os pesquisadores Parente, Santos e Tort (2014) elaboraram uma proposta para introdução dos conhecimentos sobre o modelo de Bohr no ensino médio. De maneira a possibilitar um entendimento mais consistente sobre esse modelo atômico, os autores propuseram, para explicação do postulado de quantização do momento angular, a elaboração de uma analogia com o conceito da dualidade onda-partícula proposta pelo físico De Broglie. Os autores destacam que, entretanto, docentes e discentes devem estar familiarizados com o conceito de analogia, entendendo que este é apenas um instrumento para facilitação do processo de aprendizagem.

A pesquisa de Alves e Alves (2017) consiste em um relato de experiência relativo à elaboração, de maneira lúdica, de filtros dos sonhos para o aprendizado dos conhecimentos que envolvem a atomística, a partir da representação dos modelos de Dalton, Thomson, Rutherford e Bohr. É importante destacar que os autores esclarecem sobre a escassez de propostas didáticas para a compreensão dos modelos atômicos, além de argumentarem sobre a necessidade das atividades experimentais estarem vinculadas com aspectos teóricos.

A pesquisa de Ribeiro e Gonçalves (2018), a qual se preocupou em refletir sobre a formação docente, elaborou uma análise, com o auxílio de entrevistas, sobre como os professores planejavam suas aulas relativas ao conceito de modelos atômicos. A análise demonstrou que, no geral, as práticas desses docentes apresentam um posicionamento a-problemático e a-histórico, além de não fornecerem finalidades ou justificativas para estudo dos modelos atômicos.

Levando esses aspectos em consideração, essa breve revisão bibliográfica demonstrou a existência de pesquisas isoladas sobre diferentes conteúdos acerca da temática *física nuclear e atômica*. Também permitiu perceber que, em nenhuma delas, há indícios de abordagem no contexto do ensino de Física sobre os conhecimentos desenvolvidos por Maria Goeppert-Mayer e seu modelo nuclear em camadas, que é considerado de extrema relevância para o desenvolvimento dos conhecimentos da física nuclear e atômica.

4 METODOLOGIA

Reconhecendo a possível ausência de pesquisas com a abordagem dos conhecimentos desenvolvidos pelas supracitadas cientistas laureadas no Nobel de Física, este trabalho objetiva estudar sobre a produção acadêmica das cientistas, além de se redigir propostas didáticas para o contexto de ensino de Física, baseadas nas Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS). Nesse sentido, visando um compartilhamento mais efetivo dos resultados para os docentes, redigiram-se textos no formato de artigos para que possam ser veiculados em periódicos da área. Dessa maneira, a metodologia adotada na pesquisa se baseou nas seguintes etapas:

(a) revisão bibliográfica de trabalhos relativos às contribuições das pesquisas da cientista Donna Strickland; (b) apropriação dos conceitos da física dos *lasers* para compreensão dos conhecimentos desenvolvidos pela cientista; (c) redação de artigo científico acerca de uma abordagem das contribuições de Donna Strickland no contexto da educação básica; (d) revisão bibliográfica de trabalhos relativos às pesquisas de Maria Goeppert-Mayer; (e) apropriação dos conceitos de física nuclear e atômica para compreensão dos conhecimentos desenvolvidos pela cientista; (f) e redação de artigo científico acerca da abordagem dos conhecimentos desenvolvidos pela cientista no contexto da educação básica. Por último, se desenvolveu uma (g) análise livre sobre os resultados produzidos, em termos da produção textual dos artigos e das suas respectivas propostas didáticas, objetivando-se articular esses resultados com os aportes educacional, epistemológico e metodológico preconizados na fundamentação teórica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo, serão apresentados os resultados no formato de artigos, sobre a produção das cientistas Maria Goeppert-Mayer e Donna Strickland, bem como posteriores sugestões de como articular seus conhecimentos no âmbito da educação científica.

5.1 Maria Goeppert-Mayer

NÚMEROS MÁGICOS E O MODELO NUCLEAR EM CAMADAS: OS ESTUDOS DE MARIA GOEPPERT-MAYER NO ENSINO DE FÍSICA NUCLEAR

Larissa do Nascimento Pires

Israel Müller dos Santos

Felipe Damasio

Resumo

Historicamente, evidencia-se que a presença feminina na construção científica ocorreu em meio a inúmeras barreiras para galgarem posições de destaque na ciência. A análise das láureas concedidas pelo Prêmio Nobel demonstram que as premiações na área da Física apresentam a menor quantidade de mulheres laureadas. Como consequência, no contexto da educação científica, se apresenta um desconhecimento de exemplos de mulheres cientistas cujas contribuições causaram transformações na ciência e na tecnologia. Para contrapor esse contexto, este artigo pretende apresentar os conhecimentos desenvolvidos pela cientista Maria Goeppert-Mayer, cujas pesquisas são consideradas significativas na história da física nuclear. A partir de estudos de artigos científicos que mencionem e que estejam relacionados com as contribuições da cientista, os resultados apresentam um texto instrucional que poderá ser utilizados pelos professores em aulas sobre física nuclear. Também, este artigo descreve uma proposta didática, baseada nas Unidades de Ensino Potencialmente Significativas, que possa servir de sugestão para a abordagem desses conhecimentos no ensino de Física.

Palavras-chave: Ensino de Física. Nobel de Física. Mulheres na Ciência. Maria Goeppert-Mayer. Modelo Nuclear em Camadas.

INTRODUÇÃO

“Mathematics began to seem too much like puzzle solving. Physics is puzzle solving, too, but of puzzles created by nature, not by the mind of man”.¹

Maria Goeppert-Mayer

É considerado um consenso, no campo acadêmico e científico, a desconsideração da participação feminina na ciência. Os estudos feministas, por exemplo, evidenciaram que historicamente se apresentou uma invisibilidade quanto à presença feminina na produção científica (SILVA; RIBEIRO, 2014), implicando que mulheres necessitaram atravessar muitas barreiras para galgarem posições de destaque na ciência (LIMA, 2015). No contexto universitário, por exemplo, as mulheres passaram a ser admitidas como docentes e discentes somente a partir do final do século XIX (CARVALHO; CASAGRANDE, 2011). Ainda assim, mesmo com o resistente acesso das mulheres a essas instituições, cientistas reconhecidas como Marie Curie (CORDEIRO, 2013) e Lise Meitner (LIMA, 2015) precisaram conviver com situações de discriminação na academia, sendo relegadas ao desenvolvimento de pesquisas científicas de maneira subordinada, em espaços improvisados, sem quaisquer rendimentos.

Embora esses contextos não sejam visíveis nos dias de hoje, considerando o crescente aumento das mulheres na atividade científica (CORDEIRO, 2013), existem mecanismos que descrevem a presente desproporção entre homens e mulheres na ciência (OLINTO, 2011). Um desses elementos diz respeito às escolhas profissionais sofrerem influência de crenças instituídas socialmente que estabelecem diferentes habilidades para homens e mulheres (CUNHA *et al.*, 2014), resultando que “escolhas de carreiras sejam marcadamente segmentadas por gênero” (OLINTO, 2011, p. 69): a chamada segregação horizontal. Assim, esses imperativos sociais condicionam as escolhas profissionais de meninos e meninas, os quais internalizam que as profissões relativas às ciências exatas são associadas ao masculino, enquanto profissões relacionadas às ciências humanas e biológicas são associadas ao feminino (CORDEIRO, 2013). Na prática, se evidencia uma diferença quanto à participação de homens e mulheres a depender da área do conhecimento: “as mulheres são a grande maioria nas ciências da saúde, educação e humanas, ou seja, nas áreas do cuidado, enquanto elas são minoria significativa nas ciências exatas” (CARVALHO; CASAGRANDE, 2011, p. 30).

¹“A matemática começou a parecer muito com a resolução de quebra-cabeças. A física também é a solução de quebra-cabeças, mas de quebra-cabeças criados pela natureza, não pela mente do homem”. Disponível em: <<https://www.thoughtco.com/maria-goeppert-mayer-biography-3530367>>. Acesso em: 30 nov. 2019.

Decorrente desse cenário se apresenta a segregação vertical, que pode ser observada no contexto da ascensão profissional e acadêmica. Esse mecanismo consiste na baixa representatividade feminina nos estágios mais avançados da carreira e em posições de prestígio profissional (SAITOVITCH; LIMA; BARBOSA, 2015). Esse efeito, denominado de *efeito tesoura*, considera que a análise quantitativa da presença das mulheres e homens na atividade científica reflete que menos rostos femininos se apresentam na medida em que se observa a ascensão na carreira científica (OLINTO, 2011).

Também, reflexões sobre elementos históricos possibilitam problematizar a participação das mulheres no desenvolvimento científico, como as premiações científicas, a exemplo dos Prêmios Nobel (ZAGUETTO; VENANCIO, 2014; VOLPATO; MORAIS, 2019). Os números presentes na página oficial da premiação apresentam que, até 2019, de 950 laureados, somente 54 são mulheres. Desde o ano de 1901, vinte prêmios foram concedidos para mulheres nas áreas das ciências: doze em Medicina ou Fisiologia, cinco na Química e apenas três mulheres laureadas na Física (NOBEL PRIZE, 2019). Especificamente, o Nobel de Física é categoria da premiação com a menor quantidade de mulheres laureadas: Marie Curie (1867-1934), em 1903, por suas pesquisas relativas à natureza atômica das radiações de urânio; Maria Goeppert-Mayer (1906-1972), em 1963, cuja pesquisa descreveu um modelo para a estrutura do núcleo atômico; e Donna Strickland (1959-), laureada em 2018, por suas contribuições à física dos *lasers*. Nesse sentido, é possível argumentar que os prêmios científicos, como os Prêmios Nobel, podem evidenciar a ciência como sendo predominantemente eurocêntrica e patriarcal (LIMA, 2015).

A conjuntura histórica responsável por tal invisibilidade feminina na ciência, presente na história de renomadas cientistas, nas premiações científicas e até de certa forma no panorama científico e acadêmico da atualidade, é um possível reflexo de uma ciência moderna que se construiu associada predominantemente a narrativas masculinas (CHASSOT, 2004; LIMA, 2015). Devido a uma construção histórica e cultural, se compreendeu o empreendimento científico como uma atividade guiada pelos atributos de neutralidade, racionalidade e objetividade, características socialmente associadas à figura masculina (FIÚZA *et al.*, 2009), antagônicas às características socialmente atribuídas às mulheres.

Da mesma forma, no cenário da educação científica, se reproduz justamente a ciência como uma atividade salvacionista, elitista, individualista, desenvolvida a partir dos esforços de gênios. De acordo com GIL-PÉREZ *et al.*, (2001) essas concepções, reforçadas pelas representações midiáticas (REZNIK *et al.*, 2017), são responsáveis por disseminar uma imagem deformada sobre o trabalho científico. Esse contexto se apresenta como uma possível

consequência de uma alfabetização científica baseada na transmissão desarticulada de conhecimentos, que provocam a construção de concepções que consideram o distanciamento das mulheres nas ciências como algo natural (LIMA; DANTAS; CABRAL, 2017), perpetuando uma ciência distante da realidade de meninas e mulheres (CORDEIRO, 2017).

De maneira geral, as pesquisas sobre as concepções dos discentes e dos docentes sobre a ciência e o cientista sugerem que possuem um entendimento sobre a ciência que corrobora as características supracitadas. Em nível de exemplo, Reznik *et al.*, (2017) elaboraram um estudo com grupos focais compostos por estudantes meninas de escolas públicas e privadas do Rio de Janeiro. Os autores elencaram que as alunas destacaram, enfaticamente, o estereótipo de cientista maluco e isolado em seu laboratório. Essa visão possui a capacidade de “afastar adolescentes do interesse pela carreira científica por trazer a noção de que é necessário ter um dom inato para a profissão” (REZNIK *et al.*, 2017, p. 845). Entretanto, é importante ressaltar que, no contexto de ensino, antes de modificar essas concepções sobre ciência que são construídas pelos alunos, há a igual necessidade de modificar o posicionamento dos professores sobre a ciência (FERNANDEZ *et al.*, 2002), pois garantir “uma noção mais realista da dinâmica científica e uma compreensão epistemológica adequada da Ciência permite ao docente organizar seu saber para um ensino contextualizado, dialógico e tolerante” (HEERDT; BATISTA, 2016, p. 30).

Portanto, se apresenta como necessário que os alunos, considerando a orientação dos professores, construam concepções críticas e articuladas sobre a ciência, que de outra maneira, a coloquem como uma atividade indissociável dos contextos sociais, culturais e históricos de cada época (SILVA; RIBEIRO, 2014) e construída a partir da contribuição de diferentes pessoas, inclusive de mulheres. Apesar desse aspecto, as pesquisas em educação em ciências evidenciam que além de uma possível omissão de exemplos de mulheres cientistas em livros didáticos (CORDEIRO; PEDUZZI, 2014), se apresenta uma possível escassez de estudos que abordem, de maneira específica, exemplos de mulheres cientistas no contexto da educação científica (LIMA, 2015).

Reconhecendo essa lacuna, objetivando auxiliar a elaboração de práticas de ensino-aprendizagem que possibilitem a discussão, no contexto de sala de aula, de uma ciência que contempla “casualidades, erros, intuições, ações criativas; produção de homens e mulheres” (PEDUZZI; RAICIK, 2019, p. 40), se propõe a elaboração de uma proposta didática a qual auxilie os docentes na abordagem sobre mulheres cientistas. A partir desse contexto, acredita-se que é possível superar justamente o entendimento da construção científica como um processo puramente neutro, pois “desconstruir a natureza supostamente neutra da ciência

tende a dar visibilidade a mulheres que fizeram parte das transformações científicas e tecnológicas” (LIMA; DANTAS; CABRAL, 2017, p. 5608).

Assim sendo, considerando as supracitadas discussões, essa pesquisa pretende descrever alguns dos aspectos dos conhecimentos desenvolvidos pela cientista Maria Goeppert-Mayer, que, ao lado de Curie e Lise Mietner, fora responsável pelas contribuições mais significativas para a história da física nuclear (CHASSOT, 1997). De fato, a área da física nuclear “é emblemática em um aspecto inusitado, como em nenhum outro momento anterior na História da Ciência: o protagonismo de cientistas mulheres no desenvolvimento científico” (CORDEIRO; PEDUZZI, 2014, p. 558). O desenvolvimento do modelo nuclear em camadas (GOEPPERT-MAYER, 1948), considerado possivelmente como a primeira estrutura nuclear descrita por meio da Mecânica Quântica (CORTES, 2018), possibilitou a Maria Goeppert-Mayer ser laureada, no ano de 1963, no Prêmio Nobel de Física.

Reconhecendo o reduzido número de trabalhos sobre História da Ciência os quais envolvam a abordagem sobre mulheres cientistas (SILVEIRA; PINTO NETO, 2009), argumenta-se que a escolha da figura de Maria Goeppert-Mayer se fundamenta por ser uma célebre cientista do século XX cujas contribuições são pouco mencionadas ou reconhecidas no contexto acadêmico do ensino de Física (CORTES, 2018). Seus conhecimentos são mencionados apenas de maneira pontual na literatura brasileira, como em publicações acadêmicas relativas à história da física nuclear (LEPINE-SZILY, 2005; TAVARES, 2019). Assim, este trabalho objetiva-se responder aos seguintes questionamentos: *Quem é Maria Goeppert-Mayer? Quais as contribuições dessa cientista para a física nuclear que a levaram a ser laureada no Nobel de Física? Considerando a discussão sobre a presença das mulheres na ciência, como seu trabalho pode ser apresentado no contexto do ensino de Física?*

Nesse sentido, esta pesquisa se propõe a amenizar possíveis lacunas relativas à ausência de investigações nas quais se abordem os conhecimentos desenvolvidos por Maria Goeppert-Mayer no contexto de educação e divulgação científica no ensino de Física. É importante colocar que a utilização do Prêmio Nobel como contexto de discussão quanto à participação das mulheres na ciência consiste apenas em um recorte para abordagem dessa temática, pois, além de se considerar que há outras lãureas relevantes que reconhecem pesquisadores e pesquisadoras, é importante reconhecer essas premiações não fogem de complexos elementos, como influências políticas, que determinam as escolhas dos laureados (FARIAS, 2001).

Dessa maneira, este artigo considera como hipótese que, a partir da elaboração de propostas didáticas que apresentem modelos de mulheres cientistas, é possível se desenvolver, no contexto de sala de aula, ambientes e condições propícios para que os discentes possam

reconhecer a ciência como uma construção humana. Esses exemplos podem incentivar os meninos, mas especialmente as meninas, para que possam se reconhecer como futuros atuantes no meio científico, pois exemplos “que mostram mulheres cientistas podem servir de motivação para as meninas na busca pela profissão científica, pois geram empatia e reconhecimento” (REZNIK *et al.*, 2017, p. 845). Mais do que isso, parafraseando Maria Goeppert-Mayer, é possível demonstrar que meninas podem estudar não somente para lerem livros de receitas.

MARIA GOEPPERT-MAYER

Após sessenta anos da premiação de Marie Curie, a cientista teuto-americana Maria Goeppert-Mayer (Figura 1) fora a segunda mulher a ser premiada no Nobel de Física, no ano de 1963, sendo também a terceira mulher na história a receber a láurea em uma categoria relacionada à ciência (SACHS, 1982). Considerando que a cientista vivenciou um contexto social relativo à Segunda Guerra Mundial, estando imersa em um mundo em pleno desenvolvimento tecnológico, a história de Goeppert-Mayer e suas respectivas contribuições científicas nesse contexto são pouco reconhecidas na literatura sobre a História da Ciência (PADILHA, 2001).



Figura 1 - Maria Goeppert-Mayer

Fonte: Nobel Prize, 2019.

É possível dizer que a ciência sempre consistiu na temática principal na vida de Maria Goeppert-Mayer (SACHS, 1982), sendo que seu contexto de vida fora fundamental para a construção da sua carreira: Maria Goeppert-Mayer pertencia a uma família de pesquisadores e acadêmicos, estando desde muito cedo imersa no ambiente universitário. A figura mais encorajadora em sua vida fora seu pai, cuja preocupação com a carreira de sua filha era tão

evidente que ele sempre a encorajava a ser mais do que uma mulher (MCGRAYNE, 1995): o que significava naquela época, na visão de seu pai, ser somente uma dona de casa.

Maria Gertrud Kate Goeppert nasceu no dia 28 de junho de 1906, na cidade de Katowice na região da Alta Silesia, pertencente então à Alemanha; hoje, a região integra a Polônia. A cientista era filha única de Maria Goeppert-Mayer Wolff e de Friederich Goeppert, este que, em 1905, contribuiu na erradicação da epidemia de meningite ocorrida na região da Silesia (GRZYBOWSKI; PIETRZAK, 2013). Cinco anos depois, esse trabalho científico rendeu ao pai de Maria Goeppert-Mayer uma habilitação para trabalhar na Universidade de Göttingen, para trabalhar como professor de pediatria. Nesse sentido, ela cresceu em um ambiente de fascinação com a ciência, além de possuir o suporte de sua família para seguir na



Figura 2 - Maria Goeppert-Mayer e Max Born em meados dos anos 30
Fonte: Nobel Prize, 2019.

carreira científica. De fato, ela sentiria orgulho de pertencer à sexta geração de professores universitários da família (SACHS, 1982).

Apesar de seu desejo de ingressar na universidade, não havia escolas para preparação de meninas para este propósito. Em 1921, Maria Goeppert-Mayer deixou a escola pública para estudar em uma pequena escola particular, administrada por mulheres sufragistas, que possuíam a intenção de preparar meninas para os exames de admissão das universidades. No entanto, em consequência de problemas financeiros, a instituição fechou as portas antes que pudesse concluir seu curso. Apesar disso, na primavera do ano de 1924, Maria Goeppert-Mayer fora aprovada no exame e admitida como estudante de Matemática na Universidade

de Göttingen. Exceto por um período na Universidade de Cambridge, a sua carreira como estudante universitária fora desenvolvida em Göttingen, na Alemanha (SACHS, 1979; SACHS, 1982).

Nessa época, essa instituição, também conhecida como Universidade Georgia Augusta, estava repleta de grandes nomes da Matemática e da Física; cabe apontar, expressivamente homens. Durante sua vida acadêmica, Maria Goeppert-Mayer veio a conhecer, por exemplo: Arthur Compton, Paul Dirac, Enrico Fermi, Werner Heisenberg, Linus Pauling e Wolfgang Pauli. Os seminários sobre Mecânica Quântica do físico Max Born (JOHNSON, 1986) foram uma das suas influências para que ela adentrasse na Física

(BANERJEE, 2007). Max Born (Figura 2) se tornou próximo da família de Maria Goeppert-Mayer bem como a orientou em seus primeiros trabalhos acadêmicos.

Seus estudos acerca dos conhecimentos de Mecânica Quântica resultaram no desenvolvimento do seu doutorado, apresentado no ano de 1930. Esse trabalho, considerado por Eugene Wigner (1902-1995) como uma “obra prima de clareza e concretude”, abordou o processo do fóton duplo, que descreve a possibilidade de um elétron sofrer transições eletrônicas a partir da emissão ou absorção simultânea de dois fótons. Esse processo fora primeiramente descrito sem qualquer evidência experimental. Após o desenvolvimento dos lasers e da óptica não linear nos anos 60, fora possível corroborar experimentalmente essas previsões elaboradas por Mayer (SACHS, 1979; GRZYBOWSKI; PIETRZAK, 2013). Nesse momento, vale uma observação curiosa: esse trabalho de Maria Goeppert-Mayer fora citado no trabalho de doutorado de Donna Strickland, laureada com o Nobel de Física em 2018.

Após a publicação de seu doutorado, o pai de Maria Goeppert-Mayer veio a falecer. Esse acontecimento agravou a situação financeira da família, que necessitou alugar parte do apartamento em que moravam para estudantes. Um desses estudantes era o químico Joseph Mayer, que posteriormente acabou por se casar com Maria Goeppert-Mayer; juntos tiveram dois filhos: Marianne, nascida em 1933; e Peter, nascido em 1938 (MCGRAYNE, 1995). Embora seu marido tenha assumido um papel importante na carreira científica de Maria Goeppert-Mayer (JOHNSON, 1986), por sempre encorajá-la e persuadi-la a continuar na ciência, McGrayne (1985) conta que a cientista chegou a relatar a culpa de não poder estar tão presente na vida dos filhos por conta dos compromissos acadêmicos. Durante essa década, Maria Goeppert-Mayer e seu marido se mudaram para a cidade norte-americana de Baltimore, no estado de Maryland. Na Universidade Johns Hopkins, Maria Goeppert-Mayer trabalhava nas atividades científicas da instituição, também lecionando algumas palestras para estudantes de graduação (SACHS, 1982) sem quaisquer remunerações financeiras (MCGRAYNE, 1995). Essa situação era resultado dos problemas salariais durante a Grande Depressão (GRZYBOWSKI; PIETRZAK, 2013), bem como devido à vigência de uma lei contra o nepotismo (BANERJEE, 2007).

Durante a sua estadia em Baltimore, a cientista começou a adentrar na área da física nuclear, cujo primeiro trabalho abordava o decaimento *double beta-decay*, utilizando a recente teoria de decaimento beta proposta por Enrico Fermi. Publicado no ano de 1935, esse trabalho representara a utilização das mesmas técnicas que havia aplicado em sua tese de doutorado, mas em um contexto completamente diferente. Robert Sachs, que fora aluno de Maria Goeppert-Mayer durante sua graduação (JOHNSON, 1986), descreve que suas



Figura 3 - Maria Goeppert-Mayer e seu esposo

Fonte: Baldwin, 2018.

palestras eram técnicas e organizadas, além de possuir muita afinidade com elementos de física teórica (SACHS, 1982).

Em 1939, Joseph e Maria Goeppert-Mayer (Figura 3) se mudaram para Nova York, onde trabalharam na Universidade de Columbia (SACHS, 1982). Nessa época, a cientista começou a estudar a estrutura eletrônica de elementos transurânicos (GRZYBOWSKI; PIETRZAK, 2013). O casal possuía uma popularidade entre os alunos, sendo chamados de “Joe e Maria Goeppert-Mayer”. Em 1940 se envolveram na escrita e publicação de um livro chamado *Statistical Mechanics* (BANERJEE, 2007); alguns cientistas da universidade chegaram a desconsiderar Maria Goeppert-Mayer na autoria dessa

publicação, sendo reconhecida como somente assistente de seu marido (MCGRAYNE, 1995). No ano seguinte, ela conseguiu, pela primeira vez, uma posição remunerada de meio período na faculdade Sarah Lawrence, onde pode desenvolver e apresentar um curso de ciência unificada (SACHS, 1982; MCGRAYNE, 1995).

A carreira de Maria Goeppert-Mayer sofre uma considerável mudança a partir da entrada dos Estados Unidos na Segunda Guerra Mundial (JOHNSON, 1986), pois em 1942, Maria Goeppert-Mayer é convidada, pelo físico Harold Urey (1893-1981), laureado no Prêmio Nobel de Química em 1934 pela obtenção do deutério (SABIROVA, 2016), para cooperar em um grupo secreto no Projeto Manhattan para separação do Urânio-235 a partir do urânio natural, sendo parte do trabalho para o desenvolvimento de uma bomba atômica. Apesar de ser alemã, não simpatizava com os sentimentos fascistas da Segunda Guerra Mundial. Academicamente, esse momento lhe serviu como uma possibilidade de utilizar seu conhecimento em físico-química, podendo pesquisar acerca das propriedades termodinâmicas do hexafluoreto de urânio, bem como estudar separação de isótopos por reações fotoquímicas. Este último método, naquela época, não resultou em muitas possibilidades práticas (SACHS, 1982).

Depois da Guerra, em 1946, Joseph e Maria Goeppert-Mayer se mudam para a cidade de Chicago. Novamente, Maria Goeppert-Mayer acabou por trabalhar como professora voluntária na Universidade de Chicago, devido às mesmas regras contra o nepotismo, que não permitiam a contratação de casais em cargos acadêmicos (SACHS, 1979). Ao mesmo tempo,

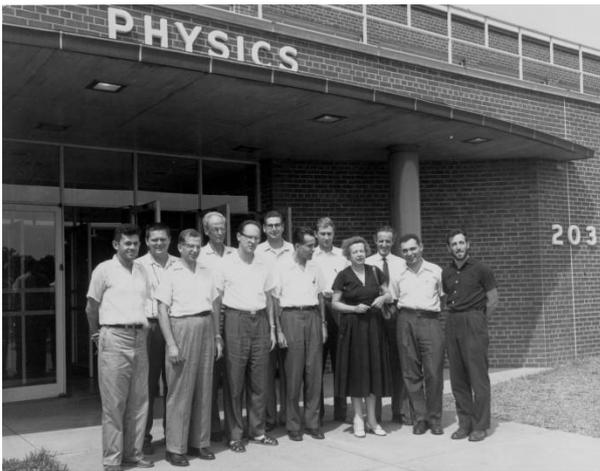


Figura 4 - Maria Goeppert-Mayer e outros cientistas em Argonne

Fonte: Nobel Prize, 2019.

Maria Goeppert-Mayer passou a colaborar em pesquisas sobre física nuclear no recém-formado Laboratório Nacional de Argonne (Figura 4), coordenado por Robert Sachs, um de seus alunos de graduação durante a década de 1930 (JOHNSON, 1986). O apoio financeiro dessa instituição fora crucial para que Maria Goeppert-Mayer pudesse desenvolver sua maior contribuição para o campo da física nuclear (SACHS, 1982).

Igualmente, sua familiaridade com os processos experimentais, apreendida em suas

pesquisas anteriores, possibilitou a Maria Goeppert-Mayer contribuir nos estudos acerca do comportamento nuclear: ela percebeu que certos núcleos atômicos de alguns elementos com números específicos de prótons e nêutrons eram mais estáveis do que outros elementos, o que veio a denominar de *números mágicos*. Ainda que essa teoria tenha sido proposta, em 1933, pelo físico francês Walter Elsasser (1904-1991), o aprofundamento teórico por parte de Maria Goeppert-Mayer lhe rendeu uma futura premiação no Nobel de Física (GRZYBOWSKI;

PIETRZAK, 2013).



Figura 5 - Maria Goeppert-Mayer na cerimônia do Nobel

Fonte: Purtil, 2018.

O reconhecimento da propriedade dos núcleos atômicos a partir de um ordenamento seguindo os chamados *números mágicos* (LEPINE-SZILY, 2005) fora também descrita de maneira independente pelo físico alemão Johannes Hans Daniel Jensen (1907-1973). Quando se encontraram na Alemanha em meados da década de 1950, Mayer e Jensen realizaram uma cooperação científica acerca desse modelo atômico, que culminou na publicação de uma obra acerca do modelo nuclear em camadas, no ano de 1955. Maria Goeppert-Mayer e Hans Jensen receberam a premiação do Nobel de Física em 1963 (Figura 5) por suas descobertas relativas à estrutura nuclear, prêmio também compartilhado com Eugene Wigner, responsável por cunhar a definição dos *números mágicos*. Durante a entrega, descreve-se que a cientista

proferiu a seguinte frase²: “Ganhar o prêmio não foi tão emocionante quanto fazer o trabalho em si”; entretanto, ironicamente, um dos jornais da localidade veiculou sua láurea da seguinte maneira: “Mãe de San Diego ganha o Prêmio Nobel” (PACHECO, 2019).

Em meados da década de 1960, após a sua láurea, Maria Goeppert-Mayer fora nomeada professora titular de Física na Universidade da Califórnia. Entretanto, após a sua chegada à cidade de San Diego, ela sofreu um derrame, o que fez com que os seus anos seguintes fossem marcados por constantes problemas de saúde. Mesmo assim, Maria Goeppert-Mayer sempre continuou a disseminar e expor os conhecimentos acerca do modelo³ nuclear em camadas, publicando uma revisão sobre seu trabalho a partir de uma colaboração com Hans Jensen. Maria Goeppert-Mayer veio a falecer devido a uma embolia pulmonar no início do ano de 1972 (MCGRAYNE, 1995). Como homenagem póstuma, a Sociedade Americana de Física desenvolveu o Prêmio Maria Goeppert-Mayer, como forma de ilustrar jovens mulheres dedicadas à Física; inclusive uma cratera em Vênus fora nomeada com seu nome em sua homenagem (PACHECO, 2019).

FÍSICA ATÔMICA E NUCLEAR

Antes de discutir os conhecimentos desenvolvidos por Maria Goeppert-Mayer que a levaram a ser laureada no Prêmio Nobel de Física, cabe descrever alguns elementos relativos ao contexto histórico da física atômica e nuclear os quais ajudam a compreender o ambiente de inserção das suas contribuições científicas. Para tanto, em meio ao contexto do final do século XIX se construiu o cenário para desenvolvimento dos conhecimentos da física atômica e nuclear, a partir das influências de diferentes campos da física, como o desenvolvimento da Radioatividade e o estabelecimento da Mecânica Quântica. De maneira mais geral, nesse cenário se desenvolveram incontáveis estudos para se compreender a constituição da matéria (MELZER; AIRES, 2015).

Desses estudos, se destacam as observações sobre a radiação emitida por determinados átomos, desenvolvidas por Antoine Henri Becquerel e por Marie e Pierre Curie (SOUZA; DANTAS, 2010). A partir de estudos desenvolvidos por estes e por outros cientistas, as pesquisas vieram indicar a existência da emissão de diferentes formas de radiação dos átomos, como “[...] partículas ou ondas eletromagnéticas emitidas pelo núcleo durante o processo de reestruturação interna” (TAUHATA, 2014, p. 19) e que viriam a ser chamadas de alfa, beta e gama (OLIVEIRA, 2017); em outras palavras, a liberação dessas partículas permite aos

² Em inglês: “Winning the prize wasn't half as exciting as doing the work itself”.

³ Em inglês, esse conceito é conhecido como “shell model”.

núcleos dos átomos atingirem a estabilidade nuclear: esse processo é chamado de decaimento radioativo. Nesse sentido, a radiação alfa se manifesta devido à repulsão elétrica entre prótons que constituem um núcleo instável, o que gera a emissão de dois prótons e dois nêutrons; a radiação beta, por sua vez, se apresenta na emissão de elétrons de origem nuclear, cujo surgimento ocorre mediante a transformação de um nêutron em um próton e um elétron. Por último, a radiação gama se manifesta como a energia excedente dos processos de emissão alfa ou beta, emitindo energia na forma de ondas eletromagnéticas (TAUHATA, 2014; OLIVEIRA, 2017). Assim, os elementos dados como radioativos, emitem radiação nuclear até atingirem a estabilidade; esta é uma relevante evidência que viria a ajudar a corroborar a pesquisa desenvolvida por Maria Goeppert-Mayer.

Todavia, o entendimento desses fenômenos da radioatividade foi possível mediante o estudo da estrutura dos átomos. Primeiramente, o desenvolvimento do modelo atômico de J. J. Thomson (1856-1940) possibilitou a verificação da existência de partículas com carga elétrica negativa por meio dos estudos do comportamento de feixes luminosos nos tubos de raios catódicos (ALVES; ALANIS; COSTA, 2010); entretanto, o físico inglês Ernest Rutherford (1871-1937) pode ser considerado a figura histórica responsável por possivelmente determinar a existência da física nuclear (MARINELLI, 1989), ao possibilitar a determinação da estrutura atômica (SOUZA; DANTAS, 2010) por meio do processo de espalhamento das partículas alfa a partir de seu bombardeamento em lâminas metálicas. A reconhecida experiência de Rutherford realizada por meio do processo de espalhamento dessas partículas no ano de 1911 possibilitou ao cientista identificar que o átomo possuiria uma região central de carga positiva concentrada, sendo rodeado por uma distribuição de carga elétrica oposta (MELZER; AIRES, 2015).

Cabe ressaltar que o modelo atômico proposto por Rutherford, com a definição de um núcleo atômico, havia sido sugerido anteriormente de maneira teórica por outros cientistas. Em nível de exemplo, no ano de 1904, o físico japonês Hantaro Nagaoka descreveu seu modelo como composto por um núcleo extremamente denso e por elétrons distribuídos ao seu redor em um movimento de rotação. No entanto, sua proposta suscitou questionamentos com os quais Rutherford se deparou anos depois: Considerando os pressupostos do eletromagnetismo clássico, como explicar a estabilidade dos núcleos formados por prótons que eram submetidos à repulsão coulombiana? (ALVES; ALANIS; COSTA, 2010). Como entender que os elétrons se manteriam em órbitas ao redor do núcleo, se quando eles estão em movimento há a emissão de radiação e a perda de energia, que poderiam acarretar o colapso do átomo? (LONDERO, 2014).

A dúvida que pairava nas mentes dos físicos da época consistia no entendimento da estabilidade nuclear e atômica. Sabendo que o núcleo se apresenta como constituído por cargas somente positivas, entende-se que a força eletromagnética existente na estrutura nuclear possibilitaria a repulsão dos prótons. Após a descoberta do nêutron por James Chadwick no ano de 1932, ao refazer experiências relativas ao bombardeio de núcleos de átomos de Berílio com partículas alfa (TOLENTINO; ROCHA FILHO, 2000), o físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981) desenvolveu a hipótese da existência das forças nucleares (ALVES; ALANIS; COSTA, 2010). Dessa forma, se propôs a existência de uma força atrativa e mais intensa do que a força coulombiana repulsiva, denominada força nuclear forte. Sabendo que essa interação é de curto alcance, a qual manteria prótons e nêutrons estáveis no interior do núcleo (LEPINE-SZILY, 2005), a força nuclear forte é considerada “aproximadamente duas mil vezes mais intensa que a força eletromagnética que caracteriza a interação do elétron com os constituintes nucleares” (MARINELLI, 1989, p. 236).

Todavia, o desenvolvimento da física atômica e nuclear só fora possível com a influência dos conhecimentos da Mecânica Quântica. Na verdade, “a teoria quântica surgiu para descrever a física dos átomos e de seus núcleos” (LEPINE-SZILY, 2005, p. 76). Nesse sentido, o cientista dinamarquês Niels Bohr, dentre outras contribuições, argumentou quanto à necessidade do desenvolvimento de novos conceitos físicos para compreensão de certos fenômenos que a Física Clássica não conseguiria explicar (MELZER; AIRES, 2015). Dentre esses fenômenos, se insere o processo de estabilidade atômica, uma vez que o modelo atômico de Rutherford apresentava uma instabilidade perante o eletromagnetismo clássico.

À vista disso, objetivando explicar o questionamento relativo à estabilidade atômica, Niels Bohr baseou-se não somente nos pressupostos do modelo atômico de Rutherford, mas também no efeito fotoelétrico de Einstein e principalmente nos construtos teóricos de Planck: como resultado, em 1913, Bohr postulou um modelo atômico (LONDERO, 2014), considerando o conceito de quantização de energia proposta por Max Planck em 1900. Ao entender a existência de uma possível “relação entre as energias dos elétrons em suas órbitas atômicas e as correspondentes frequências” (LONDERO, 2014, p. 16), no modelo atômico de Bohr, se descreve que “os elétrons giram ao redor do núcleo em um número limitado de órbitas circulares e bem definidas” (LONDERO, 2014, p. 16). Dessa maneira, os elétrons se movimentariam somente em determinadas órbitas permitidas sem quaisquer emissões de energia e sem se colapsar com o núcleo atômico (ALVES; ALANIS; COSTA, 2010). No entanto, as emissões de energia poderiam ocorrer somente quando os elétrons migrassem de um estado estacionário para o outro. Essa quantidade de energia E não seria emitida de

maneira contínua, mas sim, seria emitida em pacotes chamados de quanta (LONDERO, 2014), descritos matematicamente pela Equação 1, onde ν é a frequência de emissão do quantum e h é a constante de Planck:

$$E = h\nu \quad (1)$$

O modelo atômico proposto por Niels Bohr se manteve durante o processo inicial de desenvolvimento da teoria quântica. Entretanto, em meio aos estudos sobre as propriedades dos elétrons, compreendidos por meio do conceito de uma nuvem de probabilidade, começou a ser desenvolvido o modelo atômico que hoje é conhecido como modelo atômico de Schrodinger. Além disso, em meio a esse contexto, muitos esforços foram direcionados para o entendimento do núcleo dos átomos, por meio de elaborações tanto teóricas quanto experimentais (SILVA, 2016). Um dos modelos nucleares que fora proposto é o modelo de gota líquida, idealizado por Niels Bohr em 1935, o qual descreve a estabilidade dos prótons e nêutrons por meio da existência da força nuclear forte (ACEVEDO-DIAZ *et al.*, 2017). Esse modelo possibilitou a interpretação do processo de fissão nuclear, observado em 1939 por Lise Mietner, Otto Hahn e Fritz Strassmann, por meio da irradiação de urânio com nêutrons que produziam elementos químicos mais leves (CORDEIRO; PEDUZZI, 2014).

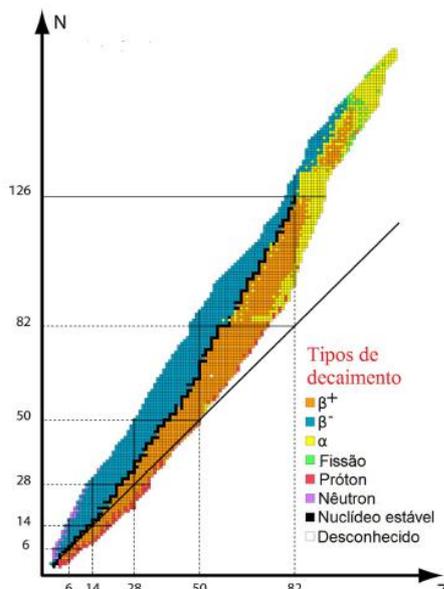


Figura 6 - Carta de Nuclídeos
Fonte: Galetti e Mizrahi, 2019.

Entretanto, com o passar do tempo se apresentou a ausência de uma construção teórica que pudesse explicar o comportamento da estrutura nuclear em sua completude ou que conseguisse conciliar todos os dados experimentais já obtidos sobre os núcleos atômicos (ABEID, 2004). Nesse sentido, “vários modelos foram desenvolvidos, cada qual correlacionando os dados experimentais de um conjunto mais ou menos limitado de fenômenos nucleares” (PALANDI *et al.*, 2010, p. 15). Entre os modelos propostos, além do modelo de gota líquida, está o modelo nuclear de camadas. Este, em específico, apontava argumentos que demonstravam a estabilidade de alguns núcleos com determinados números de prótons e nêutrons. As cartas de núclídeos

(Figura 6), que consistem na espécie de um gráfico o qual organiza os elementos químicos conforme seus números de nêutrons e prótons, cujo eixo vertical é relativo aos nêutrons e o

eixo horizontal se refere aos prótons, ajudam a compreender o modelo proposto pela cientista. Segundo Maria Goeppert-Mayer, a abundância de elementos não estava baseada em sua periodicidade apresentada na Tabela Periódica, mas sim, que poderia estar vinculada a estabilidade nuclear (PACHECO, 2019). Nesse contexto, se inserem as contribuições da cientista, desenvolvidas em meados da década de 1940.

MODELO NUCLEAR EM CAMADAS E NÚMEROS MÁGICOS

O núcleo atômico pode ser compreendido de duas maneiras diferentes: como uma massa homogênea de material, como descrito pelo modelo de gota líquida; ou pode ser entendido como um conjunto de partículas discretas (JOHNSON, 1986). A partir desses últimos princípios, Maria Goeppert-Mayer desenvolveu seu modelo nuclear em camadas. Nesse modelo, prótons e nêutrons, reconhecidos como núcleons, se movimentam no núcleo em um potencial produzido pela ação dos demais prótons e nêutrons (FIOLHAIS, 1991; LEPINE-SZILY, 2005) de maneira independente, possuindo níveis de energia, spins e momentos angulares próprios (ABEID, 2004). De maneira análoga às camadas eletrônicas para os elétrons descritas pelo modelo atômico de Bohr, os núcleons ocupam “invólucros” nucleares (DEAN, 2007) que, quando preenchidos completamente em um determinado número de núcleons resultam em um átomo estável (GOEPPERT-MAYER, 1948; GOEPPERT-MAYER, 1963).



Figura 7 - Goeppert-Mayer em meados dos anos 50

Fonte: Nobel Prize, 2019.

Durante sua estadia na Universidade de Chicago como professora voluntária, a cientista se debruçou sobre estudos sobre a origem dos elementos químicos (JOHNSON, 2004), existentes devido aos dados experimentais obtidos no contexto da Segunda Guerra Mundial (TALMI, 2018). Sob esse contexto, o primeiro projeto que Maria Goeppert-Mayer (Figura 7) começou a pesquisar com o incentivo do físico teórico Edward Teller (1908-2003) dizia respeito ao desenvolvimento de uma listagem sobre a abundância dos elementos químicos disponíveis na época (JOHNSON, 1986). A partir da análise desses dados, alguns padrões surgiram: a cientista percebeu a existência de certa regularidade associada a

determinados elementos químicos com maior estabilidade e abundância (WIECKOWSKI, 2019).

Durante sua pesquisa, Maria Goeppert-Mayer reconheceu as sugestões elaboradas por Walter Elsasser, no ano de 1933, quanto à existência dos chamados *números mágicos* (GOEPPERT-MAYER, 1963). Realizando um estudo sistemático em termos das características dos elementos químicos (SPRADLEY, 1989), como energias de ligação e momentos magnéticos, a cientista encontrou evidências que apontavam que os números mágicos poderiam ser cruciais para se compreender a estrutura dos núcleos atômicos (SACHS, 1979). Suas primeiras conclusões foram publicadas no ano de 1948 (Figura 8) pela cientista na revista *Physical Review* (GOEPPERT-MAYER, 1948). Na época, os cientistas assumiam o conceito de números mágicos de maneira depreciativa, como se a estrutura proposta por Maria Goeppert-Mayer fosse um tanto improvável (SACHS, 1982). Apesar da aceitação do modelo de gota líquida que explicava satisfatoriamente a recente descoberta da fissão nuclear, Maria Goeppert-Mayer persistiu no desenvolvimento do seu modelo nuclear.

THE PHYSICAL REVIEW

A journal of experimental and theoretical physics established by E. L. Nichols in 1893

SECOND SERIES, VOL. 74, No. 3

AUGUST 1, 1948

On Closed Shells in Nuclei*

MARIA G. MAYER

Argonne National Laboratory and Institute for Nuclear Studies, University of Chicago, Chicago, Illinois

(Received April 16, 1948)

Experimental facts are summarized to show that nuclei with 2, 8, 20, 28, 50, 82, or 126 neutrons or protons are particularly stable.

Figura 8 - Artigo *On Closed Shells in Nuclei*

Fonte: Goeppert-Mayer, 1948.

Os números mágicos de prótons e nêutrons observados pela cientista, que ilustravam uma possível estabilidade nuclear dos núcleos, eram os seguintes: 2, 8, 20, 28, 50, 82 e 126 (GOEPPERT-MAYER, 1963). De maneira a ilustrar essa organização, a Figura 9 esquematiza os núcleos em termos do seu número atômico no eixo vertical *versus* número de nêutrons no eixo horizontal, nos quais as regiões em preto denotam os elementos estáveis; os isótopos radioativos que foram produzidos e os isótopos radioativos que ainda não foram observados são representados pelas regiões em amarelo e verde, respectivamente; e por último, as linhas tracejadas correspondem aos números mágicos; todavia, cabe destacar que o círculo em vermelho ilustra a detecção, desenvolvida por Jones *et al.* (2010), de que o isótopo

de estanho radiativo ^{132}Sn possui características duplamente mágicas: 50 prótons e 82 nêutrons (COTTLE, 2010).

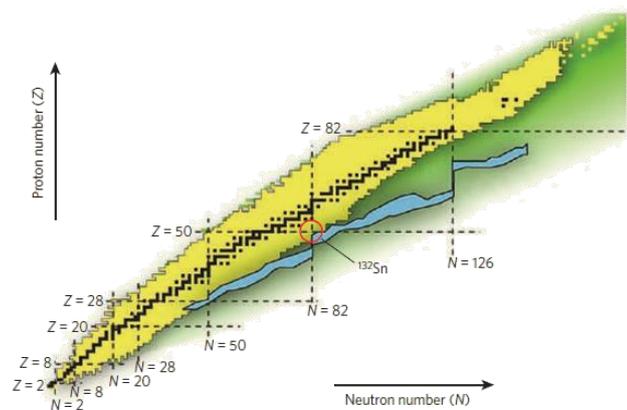


Figura 9 - Números mágicos nas cartas de nuclídeos
Fonte: Cottle, 2010.

Algo semelhante acontece com outros elementos químicos, estudados extensivamente por sessenta anos (COTTLE, 2010): núcleos de hélio com número de massa 4 são duplamente mágicos ao possuírem dois prótons e dois nêutrons; duplamente mágicos também são os núcleos de oxigênio 16 que possuem 8 prótons e 8 nêutrons e cálcio 40, possuindo 20 prótons e 20 nêutrons. O maior núcleo estável é o de chumbo com número de massa 208, com seus 82 prótons e 126 nêutrons. É interessante mencionar que este elemento “[...] é o produto final de três séries de decaimento radioativos, e o seu mais abundante isótopo é exatamente aquele com $N = 126$ ” (FREITAS; BONAGAMBA, 1999, p. 16). A Figura 10 apresenta a listagem dos elementos químicos estáveis observados pela cientista organizada com base em sua construção teórica:

Number of protons	2	8	20	28	50	82	126
^4He	^{16}O	^{40}Ca	^{58}Ni	^{112}Sn	^{204}Pb		
	^{17}O	^{42}Ca	^{60}Ni	^{114}Sn	^{206}Pb		
	^{18}O	^{43}Ca	^{61}Ni	^{115}Sn	^{207}Pb		
		^{44}Ca	^{62}Ni	^{116}Sn	^{208}Pb		
		^{46}Ca	^{64}Ni	^{117}Sn			
		^{48}Ca		^{118}Sn			
				^{119}Sn			
				^{120}Sn			
				^{122}Sn			
				^{124}Sn			

Number of neutrons	2	8	20	28	50	82	126
^4He	^{15}N	^{16}S	^{48}Ca	^{86}Kr	^{136}Xe	^{208}Pb	
	^{16}O	^{37}Cl	^{50}Ti	^{87}Rb	^{138}Ba	^{209}Bi	
		^{38}Ar	^{51}V	^{88}Sr	^{139}La		
		^{39}K	^{52}Cr	^{89}Y	^{140}Ce		
		^{40}Ca	^{54}Fe	^{90}Zr	^{141}Pr		
				^{92}Mo	^{142}Nd		
					^{144}Sm		

Figura 10 - Números mágicos e exemplos de átomos
Fonte: Goepfert-Mayer, 1963.

Não somente a estabilidade desses elementos, relacionada à energia de ligação, a pesquisa de Goepfert-Mayer indicou a existência de uma possível abundância dos elementos químicos mágicos. Segundo Freitas e Bonagamba (1999, p. 15), “quanto maior for a energia de ligação de um determinado núcleo, mais estável ele será e, portanto maior deverá ser a abundância natural relativa dessa espécie nuclear”. Dessa maneira, a quantidade de isótopos ou isótonos estáveis indicam a existência dos números mágicos; em termos de exemplos, enquanto existem seis isótopos para o cálcio 20, os isótopos vizinhos apresentam apenas dois. Como observado na Figura 10, o estanho 50 é o que apresenta a maior quantidade de isótopos estáveis (GOEPPERT-MAYER, 1948).

E os núcleos que não possuem números mágicos? Nos casos de núcleos cujos números



Figura 11 - Enrico Fermi e Maria Goeppert-Mayer em Michigan, EUA

Fonte: Nobel Prize, 2018.

imediatamente superiores ou inferiores aos números mágicos, as ligações nos núcleos atômicos deixavam de ser estáveis, como ocorre de maneira similar com a estrutura eletrônica dos átomos (BATHISTA; NOGUEIRA, 2001). Sendo assim, “os núcleos mágicos são particularmente estáveis sendo a sua energia de ligação maior do que a dos seus vizinhos com mais ou menos um núcleon” (FIOLHAIS, 1991, p. 29). Ou seja, elementos compostos por números mágicos de prótons ou nêutrons possuíam valores de energia de ligação que eram consideravelmente superiores em comparação a outros elementos sem essa característica, de maneira análoga com o que ocorre com os gases nobres (FREITAS; BONAGAMBA, 1999).

Para compreensão do conceito de números mágicos, é preciso considerar que os núcleons se movem livremente, como os elétrons de um átomo, devido à existência de um potencial esféricamente simétrico no núcleo atômico (VELUSAMY, 2007). Apesar de reconhecer que essas partículas se movimentam individualmente em suas órbitas devido seu momento angular orbital, Maria Goeppert-Mayer não conseguiu explicar, em princípio, a existência dos números mágicos maiores, como 50, 82, e 126.

A solução para essa problemática surgiu em meados de 1949, quando a cientista estava discutindo essa questão com o físico italiano Enrico Fermi (Figura 11). Ele sugeriu a Goeppert-Mayer que o *spin* dos prótons e nêutrons poderia interferir de alguma maneira com

as órbitas dos núcleons. Em outras palavras, a sugestão de Fermi à Goeppert-Mayer fora de considerar a dependência da interação spin-órbita como uma possível explicação para a movimentação dos núcleons (BANERJEE, 2007). Nesse sentido, ainda que o modelo de camadas que descreve a estrutura dos elétrons, desenvolvido por Bohr, seja semelhante ao modelo nuclear em camadas, há algumas diferenças, justamente como “a presença de um termo importante de interação spin-órbita e a existência de dois tipos de núcleons, prótons e nêutrons” (SILVEIRA, 2004, p. 10). Nesse sentido, conhecimentos de Mecânica Quântica se apresentam, pois o comportamento desses núcleons pode ser descrito por meio da Equação de Schrodinger estacionária, que em suas variáveis, apresentam a interação spin-órbita, relativa à

relação entre o momento angular orbital \vec{l} e o spin do núcleon \vec{s} (BARROZO, 2012).

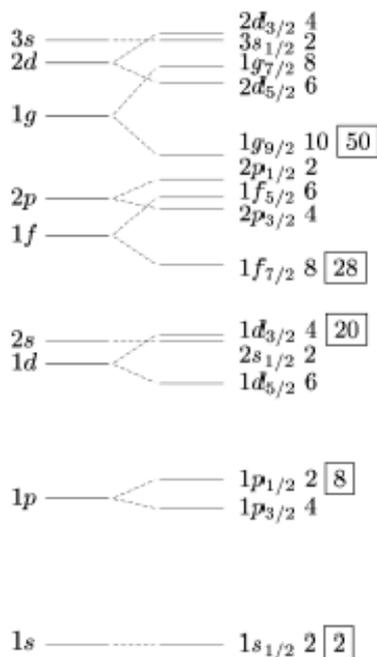


Figura 12 - Níveis de energia de núcleons agrupados em camadas

Fonte: Barrozo, 2012.

Essas partículas preenchem as camadas mediante o Princípio de Exclusão de Pauli (WIECKOWSKI, 2019), o qual descreve que “um nível energético individual não pode ser ocupado por mais do que dois férmions” (FIOLHAIS, 1991, p. 23). Assim, o comportamento de partículas, como núcleons, pode ser descrita por meio de um conjunto de números quânticos: número quântico principal n , que corresponde ao nível de energia ocupado pelo núcleon; momento angular total j , que consiste na soma do momento angular orbital l e o spin do núcleon, que pode assumir dois valores ($s = \pm 1/2$). O número quântico orbital l corresponde aos estados (s, p, d, f...) que podem ser ocupados pelos núcleons dentro de um nível de energia, de maneira similar aos estados de elétrons de um átomo (BARROZO, 2012). Como dito anteriormente, ao

ser somado com o spin resulta no número quântico de momento angular $j = l + s$, em que cada nível de energia está associado a um número de núcleons ocupantes (WIECKOWSKI, 2019), igual a $2j + 1$. A Figura 12 demonstra que determinados níveis de energia se agrupam na forma de camadas que, quando completamente preenchidas correspondem a núcleos com números mágicos; cabe destacar que isso se aplica para camadas de prótons e para as camadas de nêutrons.

Mas no que consiste o acoplamento spin-órbita, que descreve o comportamento dos números mágicos? Para que pudesse explicar isso à sua filha, Maria Goeppert-Mayer utilizou a seguinte analogia: imagine uma sala onde há vários casais valsando e que se movem ao redor da sala em círculos concêntricos. Analogamente, cada círculo corresponde a um nível energético, onde cada casal, além de orbitar, descreve um movimento de rotação, como um pião. Então, imagine que esses casais orbitam (ou valsam pelo salão) no sentido anti-horário; no entanto, alguns desses casais estarão girando no sentido horário, e outros, no sentido anti-horário (JOHNSON, 1986). Segundo a cientista, estes últimos se movimentarão mais facilmente, necessitando de menos energia, do que aqueles que se movem no sentido oposto. Em outras palavras, a energia necessária para o movimento será diferente entre casais que giram em sentidos contrários, sendo essa diferença de energia que explica a existência dos números mágicos (MCGRAYNE, 1995).

Dessa maneira, a quantidade de energia do núcleon dependerá da “posição” do spin \vec{s} em relação ao seu momento angular orbital \vec{l} (BATHISTA; NOGUEIRA, 2001). Em outras palavras, analogamente, ao considerar os casais como sendo os núcleons, o movimento angular orbital de cada partícula dependerá do sentido da sua rotação, denominado *spin*, que pode ser paralelo ou antiparalelo em relação ao movimento orbital. O *spin* é “uma propriedade intrínseca de uma partícula, análoga à rotação interna de uma partícula clássica, mas cuja justificção é apenas quântica” (FIOLHAIS, 1991, p. 23). A conjunção entre o movimento orbital e a rotação do *spin* consiste no chamado acoplamento spin-órbita. A inserção da interação spin-órbita nos pressupostos do modelo nuclear em camadas possibilitou a sua aceitação perante o modelo de gota líquida, prevendo, por exemplo, que “núcleos com números mágicos de prótons e nêutrons sejam esféricos e que núcleos com camadas abertas sejam, mais ou menos, deformados” (FIOLHAIS, 1991, p. 28). Em relação a esse aspecto, além de descrever características de elementos já conhecidos, a pesquisa de Goeppert-Mayer possibilitou descrever a existência de elementos que seriam identificados futuramente, como o caso do isótopo radioativo do níquel ^{56}Ni : a esfericidade desse isótopo, com 28 prótons e 28 nêutrons fora confirmada no ano de 1998 (COTTLE, 2010).

A publicação da sua explicação sobre a existência dos números mágicos ocorreu no final do ano de 1949. Aparentemente, Maria Goeppert-Mayer aguardara outros cientistas que pudessem propor uma possível explicação: um grupo de cientistas alemães, dentre eles Hans Jensen, submeteram um artigo independentemente com explicações semelhantes. Ao invés de disputar com Jensen sobre a autoria do modelo desenvolvido, a cientista propôs que pudessem compartilhar suas pesquisas, o que resultou na publicação do livro *Elementary Theory of*

Nuclear Shell Structure, que veio a estabelecer suas reputações como cientistas importantes para o desenvolvimento do modelo nuclear em camadas (MCGRAYNE, 1995). Por último, cabe ressaltar as implicações da pesquisa de Goeppert-Mayer e colaboradores para a área da física nuclear: uma dessas implicações consiste na compreensão do processo do fenômeno de ressonância magnética nuclear (FREITAS; BONAGAMBA, 1999), tendo em vista que este processo se baseia no comportamento dos supracitados spins nucleares, que podem ser compreendidos mediante o modelo de camadas.

NÚMEROS MÁGICOS NO ENSINO DE FÍSICA

A partir dos aspectos conceituais apresentados nas seções anteriores, será apresentada uma proposta de ensino-aprendizagem, desenvolvida com base no aporte metodológico descrito pelas Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (MOREIRA, 2011; MOREIRA, 2012). Essa proposta objetiva utilizar o exemplo da cientista Maria Goeppert-Mayer, laureada no Prêmio Nobel de Física de 1963, como elemento motivador para discussão de conceitos sobre física nuclear, como desde aspectos relativos à física atômica e as características dos elementos químicos, até a apresentação do modelo nuclear desenvolvido por Goeppert-Mayer. Além disso, a sugestão também considera discussões sobre ciência, ao possibilitar, em determinados momentos da proposta, a abordagem sobre o contexto de reconhecimento de diferentes cientistas na comunidade científica, como mulheres. Diante disso, a proposta apresentará a articulação desses conhecimentos no contexto do ensino de Física, sendo construída com o auxílio de vídeos educativos e textos de divulgação científica, além de momentos de produção individual ou coletiva de atividades que contribuam para que ocorra a aprendizagem significativa.

Tópico específico a ser abordado

O assunto principal a ser abordado diz respeito aos conceitos de física nuclear, com um enfoque ao modelo nuclear em camadas desenvolvido pela cientista Maria Goeppert-Mayer, laureada no Prêmio Nobel de Física em 1963. Não somente a abordagem desses aspectos, a proposta também descreve elementos para discussões sobre ciência, que podem ser exemplificadas como as implicações sociais do desenvolvimento da física nuclear, além de questões relativas à ascensão e reconhecimento de mulheres na comunidade científica.

Situações iniciais: concepções dos alunos sobre física nuclear

Além de objetivar que os alunos manifestem os seus conhecimentos prévios, os momentos de situações iniciais presentes nessa proposta intencionam apresentar os alunos alguns elementos contextualizados referentes à física nuclear. Assim, a proposta apresenta a utilização de recursos como letras de músicas e textos de divulgação científica que sirvam como organizadores prévios, objetivando uma primeira discussão sobre a temática geral das aulas, por meio de questionamentos norteadores. Ainda que ao final dessa etapa se solicite uma redação dos discentes sobre suas impressões acerca desse campo da Física, considera-se relevante ressaltar que essas respostas não necessitam estarem de acordo com o que é cientificamente aceito, pois elas servirão como ponto de partida para o docente prosseguir com as seguintes etapas.

Situações-problemas: cientistas da física nuclear: quem são?

As situações-problemas serão exploradas por meio de recursos didáticos como vídeos educacionais, mas especialmente pela elaboração e apresentação de uma pesquisa desenvolvida pelos alunos. Em um primeiro momento, a apresentação do vídeo *Se os elementos químicos fossem pessoas* possibilitará que os alunos discorram suas concepções sobre os elementos químicos e a Tabela Periódica, por meio de perguntas norteadoras. Na sequência, se solicitará que cada discente pesquise acerca de cientistas que desenvolveram contribuições relevantes para a área da física atômica e nuclear, necessitando apresentar os resultados da sua pesquisa na forma de cartazes. O objetivo dessa atividade é demonstrar a ciência como resultado de uma construção coletiva, desenvolvida por meio de diferentes cientistas, homens e mulheres, além de poderem perceber as diferentes implicações sociais, políticas, culturais e econômicas que interferem no desenvolvimento científico.

Conhecimento abordado: conceitos de física atômica e nuclear

Após os momentos de situações iniciais e situações-problema, será necessário a discussão dos conceitos mais gerais que possibilitarão compreender a pesquisa desenvolvida por Maria Goeppert-Mayer que lhe concedeu a láurea no Prêmio Nobel de Física em 1963. Por meio de uma diferenciação progressiva, sugere-se apresentar os conhecimentos mais gerais, como alguns conceitos relativos à física atômica e física nuclear, com base em elementos da História da Ciência. Alguns conhecimentos que podem ser revistos são as definições acerca dos isótopos e isótonos, os modelos atômicos e a distribuição eletrônica de Linus-Pauling, este último que será relevante como uma possível analogia para o modelo

nuclear em camadas. Também, a abordagem de conceitos relativos à radioatividade, como decaimento radioativo, é relevante para o posterior entendimento da estabilidade dos núcleos atômicos a luz do modelo nuclear em camadas.

Conhecimento em maior complexidade: a física de Maria Goeppert-Mayer

Após a abordagem dos conceitos relativos ao entendimento do átomo, cabe nessa etapa adentrar no entendimento do núcleo atômico, por meio da abordagem dos aspectos do modelo nuclear em camadas desenvolvido por Maria Goeppert-Mayer. Dessa forma, essa discussão será permeada por elementos da História da Ciência, de maneira a demonstrar aos alunos de que maneira a cientista desenvolveu sua pesquisa. Para tanto, será apresentado exemplos de Cartas de Nuclídeos que representam outra maneira de representação dos elementos químicos, que puderam fazer com que Goeppert-Mayer evidenciasse a relação da abundância dos elementos químicos com os números dos núcleons presentes nos átomos.

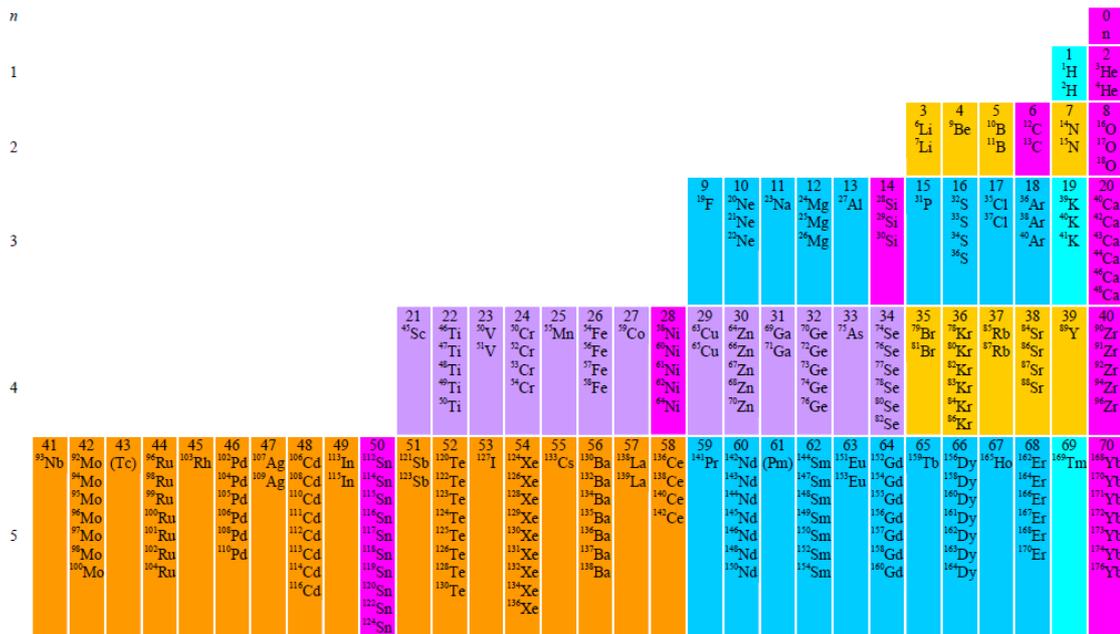


Figura 13 - Tabela de isótopos organizados pelo número atômico
Fonte: Wieckowski, 2019.

Para tanto, esquemas como o apresentado na Figura 13 poderão ser abordados para ilustrar a abundância de determinados elementos químicos a depender dos seus números de prótons ou nêutrons. A ilustração apresenta, na cor roxa, além dos gases nobres na última coluna à direita, os números 28 e 50, que são alguns dos números mágicos indicados por Goeppert-Mayer, os quais apresentam elementos de maior abundância em relação aos números imediatamente maiores ou menores. Após essa discussão, serão explicitados

elementos do modelo nuclear em camadas, por meio da abordagem de conceitos de números quânticos e princípio de exclusão de Pauli; neste momento, cabe ressaltar que é possível estabelecer uma analogia entre o modelo proposto por Goeppert-Mayer e a organização dos elétrons por meio do diagrama de Linus-Pauling. Por último, o fechamento dessa etapa poderá ser desenvolvido mediante a discussão de um trecho do livro *A Colher Que Desaparece*, o qual menciona a figura de Maria Goeppert-Mayer e as dificuldades presentes na sua trajetória acadêmica.

Revisão integrativa dos conteúdos

Nesse momento, de maneira a desenvolver uma integração dos conhecimentos abordados durante as aulas será elaborada uma discussão em grande grupo sobre aspectos do desenvolvimento da física nuclear, como a relevância das mulheres para o desenvolvimento dessa área, bem como as implicações da pesquisa desenvolvida por Maria Goeppert-Mayer para o entendimento do átomo e seu núcleo, além de possíveis aplicações de seus conceitos, como na ressonância magnética. Para tanto, é importante elaborar uma retomada dos questionamentos elaborados nas aulas anteriores, além de se oportunizar uma devolutiva dos momentos de avaliação formativa, como a produção de textos e pesquisas, além das possíveis dúvidas quanto à avaliação somativa.

Avaliação da aprendizagem dos alunos

A avaliação individual somativa será composta por perguntas discursivas, relativas aos conceitos físicos abordados nas aulas para a compreensão do modelo nuclear em camadas e sobre aspectos históricos e sociais presentes no desenvolvimento da física nuclear; cabe ressaltar que, nesses questionamentos, devem se propor situações que promovam a mobilização dos conhecimentos em diferentes contextos. Entretanto, não são somente os momentos de avaliação somativa que constituem a avaliação da aprendizagem dos alunos; a avaliação formativa constitui a consideração de todas as demais atividades desenvolvidas pelos alunos, seja individual ou coletivamente, conforme preconizado por Moreira (2011).

Avaliação da unidade de ensino

Como a proposta didática apenas terá êxito se o desempenho dos alunos demonstrar indícios de aprendizagem significativa (MOREIRA, 2011), questionários poderão ser entregue aos discentes de um questionário, de maneira que possam apresentar suas impressões

sobre os momentos desenvolvidos em sala de aula, mas também possam refletir acerca de seu posicionamento durante as aulas.

PROPOSTA DE UEPS: MARIA GOEPPERT-MAYER E A FÍSICA NUCLEAR

Objetivo: propiciar discussões no contexto da educação básica sobre conceitos da física nuclear, a partir de uma abordagem dos conhecimentos desenvolvidos pela cientista Maria Goeppert-Mayer, laureada no Prêmio Nobel de Física no ano de 1963.

Situação inicial: objetivando introduzir os alunos à temática *física nuclear*, será apresentado o videoclipe da música Enola Gay, lançado no ano de 1980, de autoria da banda Orchestral Manoeuvres In The Dark. Também, será entregue a letra da canção com sua respectiva tradução. Após assistirem ao vídeo e realizarem a leitura da tradução, algumas perguntas serão apresentadas aos alunos, como por exemplo: (i) Quais elementos ou palavras presentes na música lhe chamaram a atenção? Por quê? (ii) Analisando o vídeo e a letra dessa música, você saberia explicar o nome da música? Você já ouviu falar sobre a Enola Gay? (iii) Analisando a letra da música, você saberia indicar o posicionamento apresentado pela letra da música sobre a Enola Gay? Se sim, qual é?

Após esse primeiro momento, será realizada uma leitura em grupo do texto *Um avião chamado Enola*⁴, que elucida o contexto de desenvolvimento das bombas atômicas e suas implicações na história. Em seguida à leitura, as seguintes perguntas serão apresentadas aos alunos: (iv) O que você entende por física nuclear? Qual sua opinião sobre as aplicações da física nuclear que você conhece? (v) Quais são as características dos cientistas que desenvolveram ou desenvolvem essa área da física? (vi) Você acredita que a ciência e tecnologia abordadas nas bombas atômicas podem ser relacionadas em aplicações benéficas?

Pretende-se concluir essa discussão inicial com a distribuição e discussão em grupo de alguns excertos do material *Energia Nuclear e suas aplicações: aprendendo com o nuclídeo*, desenvolvido pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, que apresenta alguns exemplos das aplicações relativas à física nuclear, como o desenvolvimento da medicina nuclear e da radioterapia; a produção de energia elétrica por meio das usinas nucleares; e suas aplicações na agricultura e na indústria. A partir dessa dinâmica, se objetivará discutir os pontos positivos e negativos da física nuclear; objetivando o registro das concepções dos alunos, se

⁴ <http://www.clickideia.com.br/portal/conteudos/c/32/18836>

solicitará que estes façam uma redação de um pequeno texto acerca das perguntas elencadas em aula.

Situações-problema: a primeira situação-problema procurará problematizar o que os alunos entendem por elementos químicos. Nesse sentido, será apresentado o vídeo educativo *Se os elementos químicos fossem pessoas*⁵, que apresentam algumas características importantes de alguns elementos químicos. Após a visualização do vídeo será entregue uma cópia da Tabela Periódica para os alunos, com o objetivo de suscitar as seguintes perguntas: (i) De onde vêm os elementos químicos? (ii) Quais são as características que diferem elementos químicos? Quais são os elementos químicos que você considera mais abundantes na natureza? (ii) Por que existem elementos considerados estáveis e outros elementos que são instáveis? Depois de evidenciar os conceitos que caracterizam os elementos químicos, como (a) número atômico e (b) número de massa, será organizada uma discussão de maneira a elencar alguns dos cientistas que contribuíram para o desenvolvimento da física atômica e nuclear. Nesse sentido, os alunos serão orientados a elaborarem uma pesquisa em livros ou na *internet* sobre algum(a) cientista que possua contribuições relevantes para a área da física atômica e nuclear, elaborando um pequeno cartaz sobre o personagem escolhido e suas respectivas contribuições; espera-se que exemplos como Marie Curie, Ernest Rutherford, Niels Bohr, Lise Mietner, James Chadwick, e é claro, Maria Goeppert-Mayer apareçam nos achados dos discentes. Após esse momento, as produções dos alunos serão apresentadas em grande grupo, objetivando responder a seguinte pergunta: (i) Quais os cientistas que estudaram os conhecimentos sobre física nuclear? (ii) Algum desses cientistas recebeu algum prêmio como forma de reconhecimento de suas pesquisas? Se sim, quais? Além disso, objetivando discutir à baixa representatividade de mulheres cientistas, se considera importante questionar: (iii) Quais as características dos cientistas que contribuíram na área da física nuclear? Quantos deles são homens? E quantos deles são mulheres? (iv) Você acha que existe diferença entre homens e mulheres em conseguirem ascender na carreira científica? Vocês perceberam alguma discussão como essa durante suas pesquisas? O principal objetivo dessa atividade é problematizar a presença das mulheres no desenvolvimento científico, mais especificamente na área da física nuclear.

⁵ https://www.youtube.com/watch?v=NUoqlghM_1U

Revisão sobre Física Nuclear: após as situações-problema, a etapa seguinte consistirá em organizar os conceitos que irão nortear a compreensão do modelo nuclear em camadas. Considerando a utilização de diferentes recursos didáticos, como artigos, vídeos e apresentações de *slides*, serão discutidos o desenvolvimento da área da física nuclear por meio de uma abordagem da História da Ciência. Inicialmente, os alunos serão questionados sobre as seguintes perguntas: (i) De que maneira ocorreu o desenvolvimento da física nuclear? (ii) Qual a diferença entre a física nuclear e a física atômica? Nesse sentido, os conceitos-chave que poderão ser abordados consistem na (a) definição de átomo; (b) isótopos e isótonos; (c) modelos atômicos de Rutherford e Bohr; (d) distribuição eletrônica de Linus-Pauling; (e) radioatividade e estabilidade nuclear. Esses conceitos possivelmente irão delinear o contexto de inserção das contribuições de Maria Goeppert-Mayer no campo da física nuclear.

Modelo Nuclear em Camadas: a partir de semelhante abordagem, será discutido o contexto de desenvolvimento dos modelos nucleares, com enfoque ao modelo nuclear em camadas, desenvolvido por Maria Goeppert-Mayer. Primeiramente, se demonstrará outra maneira de organizar os elementos químicos, com o exemplo da Carta de Nuclídeos, como de Galetti e Mizrahi (2019), que apresenta um esquema dos elementos químicos a partir do seu número atômico e do seu número de nêutrons: com essa representação, é possível ilustrar a existência dos elementos estáveis, mas também dos elementos instáveis. Em seguida, se procurará desenvolver uma retomada histórica da pesquisa desenvolvida por Goeppert-Mayer, ressaltando sua observação quanto à abundância de determinados isótopos e de isótonos, estando estes relacionados a determinados números de prótons e de nêutrons, relativos aos números mágicos. Para desenvolver essa discussão, será elaborada uma exposição dialogada por meio das ilustrações apresentadas por Wieckowski (2019), que construiu um esquema de nuclídeos organizados em sua abundância, em relação ao número de prótons e ao número de nêutrons. Por meio dessa discussão, se demonstrará que determinados isótopos e isótonos que possuem números mágicos são mais abundantes comparados a outros elementos que não possuem essas características. Após essas discussões, por meio de uma apresentação de *slides*, objetivando explicar de maneira breve as contribuições de Goeppert-Mayer para o entendimento dos números mágicos, são discutidos conceitos como (a) números quânticos; (b) princípio de exclusão de Pauli e (c) spin de prótons e nêutrons, que serão necessários para o entendimento dos números mágicos e da constituição do modelo nuclear em camadas. Para explicação do conceito de acoplamento spin-órbita, conceito importante para o modelo desenvolvido por Maria Goeppert-Mayer, será elaborada uma dinâmica na qual alguns alunos

serão convidados para dançar uma valsa frente aos colegas, com a orientação do professor-coreógrafo. O objetivo dessa atividade é estabelecer uma analogia com o possível movimento dos prótons e nêutrons que compõem o núcleo, demonstrando que o movimento em círculos representa o movimento orbital dos núcleons, enquanto o movimento de giro representa o *spin* dessas partículas. A discussão final será desenvolvida por meio da leitura do trecho do livro *A Colher Que Desaparece*, de autoria de Sam Kean, o qual apresenta as contribuições científicas e os desafios enfrentados por Maria Goeppert-Mayer, que propôs o modelo nuclear em camadas. O objetivo é elaborar uma leitura do texto entregue em grande grupo e, posteriormente, discutir as seguintes perguntas: (i) De que maneira Maria Goeppert-Mayer conseguiu ascender na carreira científica? Quais dificuldades essa cientista enfrentou até ser reconhecida como uma cientista importante na área da Física Nuclear? (ii) A partir de quais problemas presentes nos estudos de física nuclear que Maria Goeppert-Mayer desenvolveu seu modelo nuclear? E a pergunta mais relevante, para fechamento da aula: (iii) Quais são as características da estrutura nuclear apresentada por Maria Goeppert-Mayer? De maneira a contribuir com avaliação formativa, se solicitará que os alunos desenvolvam uma pesquisa individual sobre isótopos e isótonos que possuem núcleos mágicos, que deve ser entregue na aula seguinte.

Avaliação Somativa: será proposta uma avaliação individual com perguntas discursivas, que possibilitem aos alunos manifestarem livremente sua compreensão sobre os conhecimentos de física nuclear, como: (i) Quais são as relações que você estabeleceria entre a área da física nuclear com a pesquisa desenvolvida por Maria Goeppert-Mayer? (ii) Considerando os conhecimentos científicos e os acontecimentos históricos que você estudou, de que maneira o empreendimento científico se desenvolve? Assim, serão elaboradas perguntas que promovam uma reflexão dos alunos em relação aos aspectos históricos e sociais do desenvolvimento científico, como as controvérsias existentes no desenvolvimento da física nuclear, bem como sobre a importância da presença de mulheres cientistas na construção desse campo da Física.

Revisão Integrativa: nesse momento se pretende elaborar, em grande grupo, uma revisão sobre os conhecimentos desenvolvidos na unidade de ensino, desde o contexto histórico do desenvolvimento da física nuclear, a presença das mulheres nessa área da física e os conhecimentos desenvolvidos para o entendimento da estrutura atômica e nuclear, como os modelos atômicos de Rutherford e Bohr, e é claro, o modelo nuclear em camadas, este último elaborado por Maria Goeppert-Mayer. Também, nessa etapa é relevante desenvolver a

devolutiva dos momentos de avaliação formativa desenvolvidos durante a sequência, como a produção dos textos e pesquisas, além da discussão sobre os questionamentos presentes na avaliação somativa.

Avaliação da Aprendizagem: essa etapa será baseada na participação dos alunos durante os momentos de questionamentos, bem como durante o desenvolvimento das atividades propostas, como na elaboração das pesquisas e na produção dos textos, além da avaliação somativa que corresponderá a 50% da avaliação geral do aluno. Isso implica que a avaliação da aprendizagem deva ser desenvolvida durante todo o processo de aprendizagem.

Avaliação da UEPS: a unidade de ensino potencialmente significativa poderá ser avaliada por meio de um questionário, no qual os alunos podem expor sua opinião acerca dos momentos de aula, bem como refletir sobre sua aprendizagem. Neste questionário, poderão ser apresentadas perguntas como: (i) Qual sua opinião sobre os conhecimentos da Física abordados nas aulas? Você achou interessante? (ii) E sobre as atividades desenvolvidas nas aulas, qual sua opinião? (iii) Como você considera sua participação nos momentos das aulas? Em quais momentos você sentiu que conseguiu aprender? E em quais deles você sentiu mais dificuldades? Essa etapa é importante ao se considerar que a proposta só poderá ser exitosa caso os alunos apresentem indícios de aprendizagem significativa.

Total de aulas: 16 aulas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho objetivou apresentar uma das contribuições científicas de Maria Goeppert-Mayer para a área da física nuclear: o modelo nuclear em camadas. Como percebido no decorrer do trabalho, embora seu trabalho possua enorme relevância para a física nuclear, não se encontram pesquisas substanciais na educação científica que abordem as contribuições de Goeppert-Mayer, aspecto também observado por Cortes (2018). Além disso, cabe destacar que se percebe a importância de desenvolver materiais e propostas didáticas que envolvam elementos históricos vinculados ao ensino de Física, de maneira a possibilitar que professores e posteriormente alunos possam entender os pormenores e os percalços vivenciados por cientistas durante a construção de suas pesquisas.

De fato, a trajetória acadêmica de Maria Goeppert-Mayer possibilita entender a ciência como um construto mais complexo do que a simples elaboração de princípios e conceitos. Nesse sentido, para que suas ideias fossem desenvolvidas, a cientista necessitou da contribuição científica de outros cientistas e de um ambiente acadêmico favorável; mas, apesar de possuir tais condições, Johnson (1986) e McGrayne (1995) elencam que Goeppert-Mayer vivenciou embargos durante sua ascensão acadêmica, como a atuação voluntária e sem remuneração nas universidades, além das dificuldades de conciliar sua vida acadêmica e o cuidado de seus filhos, embora possuísse o apoio de seu esposo. Estes aspectos não devem passar despercebidos durante as discussões sobre as mulheres na ciência desenvolvidas em sala de aula, para que, corroborando Cordeiro e Peduzzi (2014), não se reproduzam implicitamente estereótipos de que apenas mulheres muito especiais participam e participaram da atividade científica.

Ademais, a atenção especial dada à área de física nuclear também pode promover discutir questões que estão diretamente relacionadas com o desenvolvimento científico por meio de seus contextos sociais e culturais; neste caso, em específico, é possível abordar a influência da cientista no desenvolvimento do Projeto Manhattan, além de evidenciá-la como uma das mulheres responsáveis pela consolidação desse campo da Física, juntamente com Marie Curie e Lise Mietner. Como recentemente descrito por Wieckowski (2019), as contribuições de Goeppert-Mayer possibilitam, por exemplo, entender os elementos químicos em suas características, como a estabilidade nuclear, por meio de conhecimentos, como a Carta de Nuclídeos, que vão além dos tradicionalmente abordados somente com a apresentação da Tabela Periódica, possibilitando uma visão diferenciada sobre os elementos químicos e da física nuclear.

REFERÊNCIAS

ABEID, L. R. F. A física nuclear e suas aplicações: uma abordagem voltada para o ensino médio. 2004. 67 f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Física) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

ACEVEDO-DÍAZ, J. A. *et al.* Modelos científicos: significado y papel en la práctica científica. **Revista Científica**, v. 30, n. 3, p. 155-166, 2017.

ALVES, M. F. S.; ALANIS, D.; COSTA, L. G. Um mapa conceitual sobre a evolução do conceito do átomo: uma introdução à Física de partículas elementares para o Ensino Médio. In: **Simpósio Nacional de Ensino de Ciência e Tecnologia**, 2, 2010, Ponta Grossa. Atas... Ponta Grossa, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010.

- BALDWIN, M. **The second woman to win the physics Nobel**. 2018. Disponível em: <<https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/pt.6.4.20181005a/full/>>. Acesso em: 30 nov. 2019.
- BANERJEE, B. Maria Goeppert Mayer. **Resonance**, v. 12, n. 12, p. 6-11, 2007.
- BARROZO, P. Modelos Nucleares. In: BARROZO, P. **Introdução à Física Nuclear e de Partículas Elementares**. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2012.
- BATHISTA, A. L. B. S.; NOGUEIRA, J. S. Elementos históricos de ressonância magnética nuclear. In: **Encontro de Ressonância Magnética Nuclear**, 9., 2001, Maringá. Atas... Maringá, Associação de Usuários de Ressonância Magnética Nuclear, 2001.
- CARVALHO, M. G.; CASAGRANDE, L. S. Mulheres e ciência: desafios e conquistas. **Revista Interthesis**, v. 8, n. 2, p. 20-35, 2011.
- CHASSOT, A. A ciência é masculina? É, sim senhora!... **Revista Contexto e Educação**, v. 19, n. 71, p. 9-28, 2004.
- _____. Nomes que fizeram a química (e quase nunca lembrados). **Química Nova na Escola**, n. 5, p. 21-23, 1997.
- CORDEIRO, M. D. Questões de gênero na ciência e na educação científica: uma discussão centrada no Prêmio Nobel de Física de 1903. In: **Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências**, 9., 2013, Águas de Lindóia. Atas... Águas de Lindóia, Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, 2013.
- _____. Mulheres na Física: um pouco de história. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 3, p. 669-672, 2017.
- CORDEIRO, M. D.; PEDUZZI, L. O. Q. Entre os transurânicos e a fissão nuclear: um exemplo do papel da interdisciplinaridade em uma descoberta científica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 31, n. 3, p. 536-563, 2014.
- CORTES, M. R. Mulher na ciência: “Ciência também é coisa de mulher!”. 2018. 128 f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Licenciatura em Física) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018.
- COTTLE, P. Doubly magic tin. **Nature**, v. 465, p. 430-431.
- CUNHA, M. B. *et al.* As mulheres na ciência: o interesse das estudantes brasileiras pela carreira científica. **Educación Química**, v. 25, n. 4, p. 407-417, 2014.
- DEAN, D. J. Beyond the nuclear shell model. **Physics Today**, v. 60, n. 11, p. 48-53, 2007.
- FARIAS, R. F. As mulheres e o Prêmio Nobel de Química. **Química Nova na Escola**, n. 4, p. 28-30, 2001.

FERNANDEZ, I. *et al.* Visiones deformadas de la ciencia transmitidas por la enseñanza. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 20, n. 3, p. 477-488, 2002.

FIOLHAIS, C. Dos núcleos aos agregados atômicos: campo médio e movimentos colectivos. **Colóquio Ciências: Revista de Cultura Científica**, n. 9, p. 22-42, 1991.

FIÚZA, A. L. C. *et al.* Difusão de tecnologia e sexismo nas Ciências Agrárias. **Ciência Rural**, v. 39, n. 9, p. 2614-2620, 2009.

FREITAS, J. C. C.; BONAGAMBA, T. J. **Os núcleos atômicos e a RMN**. In: Fundamentos e Aplicações da Ressonância Magnética Nuclear. 1999, Rio de Janeiro: AUREMN.

GALETTI, D.; MIZRAHI, S. S. As linhas fronteiriças dos constituintes da matéria. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 1, 2019.

GIL-PÉREZ, D. *et al.* Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.

GOEPPERT-MAYER, M. On closed shells in nuclei. **Physical Review**, v. 74, n. 3, p. 235-239, 1948.

_____. **The shell model**: Nobel Lecture. 1963. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1963/mayer/lecture/>>. Acesso em: 26 nov. 2019.

GRZYBOWSKI, A.; PIETRZAK, K. Maria Goeppert-Mayer (1906–1972): two-photon effect on dermatology. **Clinics in Dermatology**, v. 31, n. 2, p. 221-225, 2013.

HEERDT, B; BATISTA, I, d. L. Questões de gênero e da natureza da ciência na formação docente. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 21, n. 2, p. 30-51, 2016.

JOHNSON, K. E. Maria Goeppert Mayer: Atoms, Molecules and Nuclear Shells. **Physics Today**, v. 39, n. 9, p. 44-49, 1986.

_____. From natural history to the nuclear shell model: Chemical thinking in the work of Mayer, Haxel, Jensen, and Suess. **Physics in Perspective**, v. 6, n. 3, p. 295-309, 2004.

JONES, K. L. *et al.* The magic nature of ^{132}Sn explored through the single-particle states of ^{133}Sn . **Nature**, v. 465, p. 454-457, 2010.

LEPINE-SZILY, A. Rumos da física nuclear. **Revista USP**, n. 66, p. 74-79, 2005.

LIMA, I. P. C. Lise Meitner e a fissão nuclear: uma visão não eurocêntrica da ciência. **Revista Gênero**, v. 16, n. 1, p. 51-65, 2015.

LIMA, L. V. S.; DANTAS, J. M.; CABRAL, C. C. “Cientista, como é?”: concepções de estudantes do ensino médio sobre gênero e natureza da ciência. In: **Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias**, 10., 2017, Sevilla. Atas... Sevilla, Revista Enseñanza de las Ciencias, 2017.

- LONDERO, L. O modelo atômico de Bohr e as abordagens para seu ensino na escola média. **Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias**, v. 9, n. 1, p. 13-37, 2014.
- MARINELLI, J. R. Enxergando o núcleo atômico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 6, n. 3, p. 234-240, 1989.
- MCGRAYNE, S. B. Maria Goeppert Mayer. **The Physics Teacher**, v. 33, n. 424, p. 424-429, 1995.
- MELZER, E. E. M.; AIRES, J. A. A História do desenvolvimento da teoria atômica: um percurso de Dalton a Bohr. **Revista de Educação em Ciências e Matemática**, v. 11, n. 22, p. 62-77, 2015.
- NOBEL PRIZE. **Nobel Prize awarded women**. 2019. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/lists/nobel-prize-awarded-women/>>. Acesso em: 30 nov. 2019.
- OLINTO, G. A inclusão das mulheres nas carreiras de ciência e tecnologia no Brasil. **Inclusão Social**, v. 5, n. 1, p. 68-77, 2011.
- OLIVEIRA, H. U. S. **Radioatividade**: aspectos históricos e evolutivos a serviço da humanidade. 2017. 58 f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Física) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2017.
- PACHECO, M. A. L. Marie Goeppert-Mayer: una mujer excepcional. **Universitario Potosinos: Revista de Divulgación Científica**, v. 15, n. 233, p. 36-37, 2019.
- PADILHA, M. L. C. Las mujeres y la Ciencia: en el centenario de los Premios Nobel de Física: semblanzas de Marie Curie y María Göppert-Mayer. **Revista 100cias@uned**, v. 4, p. 75-80, 2001.
- PALANDI, J. *et al.* **Física Nuclear**. Universidade Federal de Santa Maria: Grupo de Ensino de Física. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/gef/arquivos/fisinuc.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2019.
- PEDUZZI, L. O.; RAICIK, A. C. **Sobre a natureza da ciência**: asserções comentadas para uma articulação com a História da Ciência. 2019. 57 p. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<http://www.evolucaodosconceitosdafisica.ufsc.br>>. Acesso em: 30 nov. 2019.
- PURTILL, C. **The last woman to win the physics Nobel had to work for free most of her career**. 2018. Disponível em: <<https://qz.com/work/1411422/the-last-woman-to-win-the-physics-nobel-had-to-work-for-free-most-of-her-career/>>. Acesso em: 30 nov. 2019.
- REZNIK, G. *et al.* Como adolescentes apreendem a ciência e a profissão de cientista?. **Estudos Feministas**, v. 25, n. 2, p. 829-855, 2017.

SABIROVA, F. M. Study of the contribution of Nobel Prize winners to the development of atomic and nuclear physics in pedagogical universities. **European Journal of Science and Theology**, v. 12, n. 1, p. 69-80, 2016.

SACHS, R. G. Maria Goeppert Mayer. In: NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. **Biographical Memoirs**: Volume 50. Washington: National Academies Press, 1979. p. 310-328.

_____. Maria Goeppert-Mayer – two-fold pioneer. **Physics Today**, v. 35, n. 2, p. 46-51, 1982.

SAITOVITCH, E. B.; LIMA, B. S.; BARBOSA, M. C. Mulheres na Física: uma análise quantitativa. In: SAITOVITCH, E. M. B. et al. (Orgs.). **Mulheres na física**: casos históricos, panorama e perspectivas. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.

SILVA, F. F.; RIBEIRO, P. R. C. Trajetórias de mulheres na ciência: “ser cientista” e “ser mulher”. **Ciência & Educação**, v. 20, n. 2, p. 449-466, 2014.

SILVA, U. U. Estudo do espalhamento e transferência elástica para o sistema ${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$. 2016. 117 f. **Dissertação** (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SILVEIRA, H. E.; PINTO NETO, P. C. Subsídios para formação docente: a presença (ou ausência) das mulheres em artigos de História da Ciência em periódicos brasileiros de química. In: **Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências**, 7., 2009, Florianópolis. Atas... Florianópolis, Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, 2009.

SILVEIRA, M. A. G. ${}^{58}\text{Co}$: estudo de um núcleo ímpar-ímpar na camada pf. 2004. 149f. **Tese** (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

SOUZA, M. A. M.; DANTAS, J. D. Fenomenologia nuclear: uma proposta conceitual para o ensino médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 27, n. 1, p. 136-158, 2010.

SPRADLEY, J. L. Women and the elements: the role of women in element and fission discoveries. **The Physics Teacher**, v. 27, n. 6, p. 656-662, 1989.

TALMI, I. The nuclear shell model: simplicity from complexity. **Frontiers in Physics**, v. 13, n. 6, p. 1-17, 2018.

TAUHATA, L. *et al.* **Radioproteção e Dosimetria**: Fundamentos. 10. ed. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2014.

TAVARES, O. A. P. 80 anos da fissão nuclear: a mais abundante fonte de energia disponível para a humanidade. **Ciência e Sociedade**, v. 2, n. 6, p. 19-34, 2019.

TOLENTINO, M.; ROCHA FILHO, R. C. Sobre a estrutura do núcleo atômico antes da descoberta do nêutron. **Educación Química**, v. 11, n. 3, p. 315-318, 2000.

VELUSAMY, R. Mayer-Jensen shell model and magic numbers. **Resonance**, v. 12, n. 12, p. 12-24, 2007.

VOLPATO, G.; MORAIS, J. L. A invisibilidade das mulheres na ciência: história e conjuntura atual. In: **Seminário de Filosofia e Sociedade**, 9., 2019, Criciúma. Atas... Criciúma, Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2019.

WIECKOWSKI, A. B. Periodic table of nuclides based on the nuclear shell model. **Romanian Journal of Physics**, v. 64, n. 303, p. 1-19, 2019.

ZAGUETTO, A. P.; VENANCIO, T. Os percalços do Nobel: deslizos e polêmicas do grande prêmio. **ComCiência**, n. 164, 2014.

5.2 Donna Strickland

AS MULHERES E O PRÊMIO NOBEL: AS CONTRIBUIÇÕES DE DONNA STRICKLAND NOS ESTUDOS DE FÍSICA DOS *LASERS*

Larissa do Nascimento Pires

Israel Müller dos Santos

Felipe Damasio

Resumo

É consenso que os *lasers* consistem em uma das temáticas que demonstram potencialidade para serem exploradas no ensino de Física, pelo fato de propiciar uma aproximação com o cotidiano dos alunos e alunas, além de possibilitar discutir sobre aspectos históricos e epistemológicos presentes na construção dessa tecnologia. De fato, percebendo a relevância dos *lasers* na atualidade, a temática das l ureas no Prêmio Nobel de Física de 2018 consistiu em reconhecer cientistas cujas contribui es fossem relevantes para a área da física dos *lasers*. Nesse sentido, com base no estudo de artigos científicos e obras acadêmicas que discorram sobre aspectos de física dos *lasers*, este trabalho objetiva apresentar, para o contexto de ensino de Física, as contribui es desenvolvidas pelos laureados no Nobel de Física, a partir de um enfoque   cientista canadense Donna Strickland, além de apresentar uma proposta didática, constituída nos pressupostos da Unidade de Ensino Potencialmente Significativa. A partir desses materiais, espera-se contribuir com a es docentes que possam discutir, no ambiente de sala de aula, conhecimentos relativos à Física Moderna e Contemporânea, além de problematizar elementos para a abordagem de questões relativas a presença de mulheres cientistas.

Palavras-chave: Ensino de Física. Física Moderna e Contemporânea. Mulheres na Ciência. Donna Strickland. Chirped Pulse Amplification.

INTRODUÇÃO

“I have great faith in lasers, but no one’s putting one near my eye!”¹

Donna Strickland

Há tempos que se apresenta a necessidade de uma reformulação do ensino de Física quanto aos conteúdos abordados na educação básica, considerando o distanciamento entre a ciência ensinada no meio escolar e aquela que se apresenta, por exemplo, nos meios de comunicação. Nesse sentido, Terrazzan (1992) é um dos primeiros que advogam a favor da abordagem dos conhecimentos da Física Moderna e Contemporânea (FMC) na educação básica, considerando que somente a partir de conceitos desenvolvidos durante o século XX, será possível entender, uma gama de fenômenos cotidianos, além de aparelhos e artefatos da atualidade.

Ostermann (1999), em sua pesquisa de doutorado, elencou alguns dos exemplos de temáticas de FMC, apontados pelos professores de Física, como essenciais para a formação dos alunos do ensino médio; alguns desses exemplos descritos pela autora são: o efeito fotoelétrico, a relatividade restrita, as partículas elementares, origem do universo, inclusive até aparatos tecnológicos, como os *lasers* e as fibras ópticas. De fato, a abordagem dessas temáticas é preconizada nos documentos oficiais, como nos Parâmetros Curriculares Nacionais, que descrevem que as discussões de aspectos da FMC são “indispensáveis para permitir aos jovens adquirir uma compreensão mais abrangente sobre como se constitui a matéria, de forma que tenham contato com diferentes e novos materiais, cristais líquidos e *lasers* presentes nos utensílios tecnológicos” (BRASIL, 2006, p.70).

As luzes dos *lasers*, em específico, são consideradas uma das ferramentas mais revolucionárias que foram desenvolvidas durante o século XX. Essa tecnologia encontrou imprescindíveis aplicações em diversos ramos da medicina, desde terapias médicas até procedimentos cirúrgicos (SILVA NETO; FREIRE JUNIOR, 2017). Não somente isso, os *lasers* apresentaram aplicações ainda mais próximas do cotidiano dos alunos: além de alimentarem histórias de fantasia, como a franquia *Star Wars* com seu raio da morte, os *lasers* são utilizados, por exemplo, em leitores de código de barras. A existência de variedades de *lasers* e suas inúmeras aplicações possibilita que possam ser utilizados como um instrumento gerador de discussões de vários conceitos físicos em sala de aula (HAKIME, 2015).

¹ “Eu tenho muita fé nos *lasers*, mas se ninguém colocar um perto dos meus olhos!”.

Disponível em: <<https://www.theguardian.com/science/2018/oct/20/nobel-laureate-donna-strickland-i-see-myself-as-a-scientist-not-a-woman-in-science>>. Acesso em: 5 jul. 2019.

Assim, a importância da abordagem dos *lasers* em sala de aula não se restringe somente a proximidade dessa tecnologia ao cotidiano dos alunos, mas também “entender o *laser* e suas características nos remete à discussão de fenômenos de grande importância para o entendimento da Física do Século XX, incluindo as interpretações filosóficas” (CAVALCANTE; TAVOLARO; GUIMARÃES, 2005, p. 2). Segundo estes autores, sabendo que o desenvolvimento dos *lasers* ocorreu em meio às discussões sobre a dualidade onda-partícula, sua abordagem no contexto de ensino básico possibilita a apresentação desse episódio histórico que é considerado um dos mais interessantes da História da Física. Entretanto, diferentemente disso, a realidade que se apresenta de certa maneira consiste no enfoque pontual dos conhecimentos de FMC, o que gera “uma notória diminuição da discussão sobre o problema físico, dos envoltos epistemológicos, da História e Filosofia da Ciência” (NASCIMENTO; ALVETTI, 2006, p. 33) presentes nesses conhecimentos.

Com isso, argumenta-se que além de se desenvolver uma abordagem que seja motivacional para os alunos, “tópica e informativa como alento à exaustão provocada pelas aulas de Física” (REZENDE JUNIOR; SOUZA CRUZ, 2009, p. 312), a apresentação de conhecimentos relativos à FMC, como no exemplo dos *lasers*, deve ser desenvolvida além de um aspecto informacional e complementar aos conceitos já tradicionais abordados, de maneira que os alunos entendam os processos de modelização que envolvem esses conhecimentos e suas relações com o desenvolvimento científico da atualidade.

Nesse sentido, reconhecendo a importância dos *lasers* como uma relevante tecnologia, a Academia Sueca de Ciências, no ano de 2018, escolheu como temática das láureas justamente pesquisas cujas contribuições fossem relevantes para a física dos *lasers*. Nesse sentido, Donna Strickland, Gerard Mourou e Arthur Ashkin receberam as láureas no Prêmio Nobel de Física pelas “invenções inovadoras no campo da física dos *lasers*” (NOBEL PRIZE, 2018). Primeiramente, Strickland com a colaboração de Gérard Mourou, dividiram a metade do prêmio pelo desenvolvimento da técnica chamada *chirped pulse amplification* (STRICKLAND; MOUROU, 1985), cujo objetivo é produção de *lasers* supercurtos de alta intensidade, que podem ser utilizados em inúmeras aplicações na medicina. A outra metade do prêmio fora destinada a Arthur Ashkin, pelo desenvolvimento pioneiro das pinças ópticas (ASHKIN, 1970), cujas aplicações são visualizadas em sistemas biológicos.

A inserção em discussões em sala de aula de exemplos atuais de pesquisas científicas, como aquelas expostas no Prêmio Nobel de Física de 2018, pode permitir uma abordagem contextualizada da FMC, além de possibilitar que os alunos percebam a ciência como um construto inacabado, cujas implicações de seus resultados não se apresentam de maneira

imediate, por sofrerem interferências de aspectos sociais, econômicos e culturais (GIL-PÉREZ *et al.*, 2001). Mais do que isso, possibilita entender a complexa relação entre ciência e tecnologia ao longo da história, tendo em vista que, muitas vezes, “a tecnologia foi precedida pelo desenvolvimento da física, como no caso da fabricação de *lasers*, ou, em outras, foi a tecnologia que antecedeu o conhecimento científico” (BRASIL, 2006, p. 64).

Além de aspectos relativos ao desenvolvimento científico, a utilização do exemplo do Prêmio Nobel pode suscitar outra discussão: a presença das mulheres na ciência (CHASSOT, 2004; CHASSOT, 2019). Embora seja um prêmio que apresente vários cientistas em sua premiação, o Nobel de Física, em específico, revela uma discrepância no número de homens e mulheres laureados: as mulheres equivalem pouco mais de 1% das láureas em Física, sendo a categoria da premiação com o menor número de mulheres laureadas. Nesse sentido, críticas acabam sendo direcionadas à premiação, como o fato da listagem de premiados terem omitido potenciais cientistas de receberem a láurea ao longo da história (ZAGUETTO; VENANCIO, 2014), como Lise Mietner e Chien Shiung Wu.

Na verdade, entende-se que as produções científicas deveriam ser divulgadas unicamente por sua qualidade, não precisando ser associadas a determinadas características de quem a produziu (CHASSOT, 2019); entretanto, ao se efetuar uma análise das discussões *sobre* ciência desenvolvidas no ambiente de sala de aula, Lima (2015, p. 53) apresenta um panorama que nos faz perceber a importância de se inserir discussões acerca da diversidade de pessoas e da pluralidade de ideias na ciência, pois os alunos e alunas compreendem o empreendimento científico sem “a colaboração de mulheres, latinas/os, negras/os, africanas/os, orientais [...] assumindo como inexistentes as contribuições desses grupos para o desenvolvimento científico e tecnológico”.

Esse contexto demonstra a relevância da discussão dessas questões na educação básica, ao considerar que pouco se inserem abordagens desses assuntos nos materiais didáticos que chegam aos professores, além do fato de que as práticas educacionais, principalmente no ensino de Física, não inserem a figura feminina na construção do conhecimento científico (SCHIEBINGER, 2008). Com isso, sabendo que a atuação do professor é um dos principais meios para a divulgação científica (TEIXEIRA; COSTA, 2008), as **questões** com que a pesquisa relatada neste trabalho pretende contribuir são: *Quem é Donna Strickland? Quais as contribuições dessa cientista no campo da física dos lasers que a fizeram ser laureada no Prêmio Nobel de Física em 2018? Considerando discussões acerca da necessidade da presença de mulheres no empreendimento científico, como seu trabalho pode ser abordado no contexto de ensino de Física?*

Este artigo objetivará contribuir com a produção de um texto instrucional e uma proposta didática, que abordem aspectos relativos à Física Moderna e Contemporânea. Além disso, acredita-se que com o desenvolvimento de práticas de ensino que utilizem e discutam exemplos de mulheres reconhecidas (CORDEIRO, 2017) como a física Donna Strickland, premiada no Nobel de Física, é possível que os alunos e alunas construam uma visão científica com mais representatividade, de maneira a evitar que meninos e meninas reconheçam a trajetória científica de maneira diferente (TEIXEIRA; COSTA, 2008). Nesse sentido, nesta proposta se intenciona oferecer subsídios aos professores para que possam inserir discussões em suas aulas sobre aplicações atuais dos *lasers*, como descritos pelas pesquisas desenvolvidas pelos laureados em Física em 2018, além de abrir precedentes para a abordagem de questões relativas à presença das mulheres na ciência.

DONNA STRICKLAND E A FÍSICA DO *LASER*



Figura 1 - Arthur Ashkin, Gérard Mourou e Donna Strickland

Fonte: Nobel Prize, 2019.

Donna Theo Strickland, nascida no dia 27 de maio de 1959 na cidade canadense de Guelph, é uma física especializada no estudo dos *lasers*, sendo a terceira mulher a receber um Prêmio Nobel de Física. Além de ser premiada com seu parceiro de trabalho Gérard Mourou, Strickland compartilhou a premiação com o norte-americano Arthur Ashkin. Este, com a idade de 96 anos, é o cientista mais velho a ser premiado com um Prêmio Nobel, cuja

pesquisa explora o desenvolvimento das pinças ópticas (CHO, 2018). A Figura 1 apresenta o tradicional desenho dos laureados.

Em 1981, Donna Strickland graduou-se em Engenharia da Física pela Universidade MacMaster, no Canadá. Em 1989, na Universidade de Rochester, localizada em Nova Iorque, ela cursou seu doutorado em óptica. A pesquisa, elaborada com seu orientador Gérard Mourou, possuía a intenção de desenvolver uma técnica para aprimorar a intensidade de pulsos de *lasers* ultracurtos, sem que destruíssem o meio amplificador. Na verdade, essa técnica fora descrita pela primeira vez por Donna Strickland (Figura 2) em um artigo científico de três páginas publicado no ano de 1985 (STRICKLAND; MOUROU, 1985).

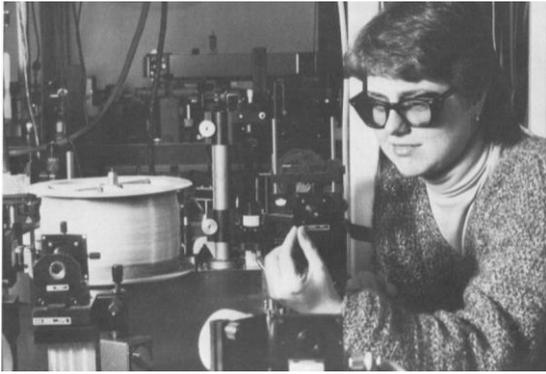


Figura 2 - Donna Strickland em 1985

Fonte: Nobel Prize, 2019.

Donna Strickland encontrou dificuldades para ingressar em posições universitárias, pelos problemas em encontrar cargos para acadêmicos que são casados. Em 1991, Strickland veio a ser casar com o também físico Doug Dykaar; entretanto, enquanto seu marido conseguiu ocupar cargos em universidades nos anos seguintes, Strickland acabou por ocupar posições externas à academia por alguns anos (NOBEL PRIZE, 2019), evidenciando, historicamente, as visíveis dificuldades das cientistas de se colocarem nos espaços acadêmicos. Em nível de exemplo, a cientista atuou como pesquisadora no Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá entre 1988 e 1991, trabalhou no Laboratório Nacional Lawrence Livermore e no Centro de Tecnologia Avançada de Fotônica e Materiais Optoeletrônicos de Princeton, nos anos de 1991 e 1992. A pesquisadora também se tornou membro da Sociedade Óptica da América, sendo vice-presidente em 2011 e presidente em 2013. Desde 1997, Donna Strickland atua como professora associada na Universidade de Waterloo, no Canadá, liderando pesquisas relacionadas à física dos *lasers*. Os princípios expostos em seu trabalho, que lhe concederam o Prêmio Nobel de Física, puderam intensificar o interesse e as pesquisas sobre o uso de *lasers* de alta intensidade em aplicações complementares na medicina, como na realização de cirurgias oculares e nas terapias contra o câncer.



Figura 3 - Donna Strickland e Francis Arnold, que recebeu a láurea em Química

Fonte: CBC News, 2018.

No seu discurso na Cerimônia do Prêmio Nobel (Figura 3)², Donna Strickland relata que ao mesmo tempo em que trabalhava no projeto que futuramente a colocaria em uma posição de prestígio científico, a cantora norte-americana Cyndi Lauper lançara um grande hit chamado *Girls Just Wanna Have Fun*, cujo contexto mostra que as pessoas gostam de se divertir sem pensar nas ocupações diárias. No entanto, a pesquisadora afirma que a sua diversão está justamente em seu trabalho: “Nem todo mundo acha que a Física é divertida, mas eu acho que

² <https://www.youtube.com/watch?v=pan9HeLdK4E>

sim. A Física Experimental é especialmente divertida porque não só você consegue resolver enigmas sobre o Universo ou sobre a Terra, mas porque há brinquedos muito legais nos laboratórios. No meu caso, eu começo a brincar com *lasers* de alta intensidade que podem fazer coisas mágicas”.

Entretanto, Donna Strickland não possuía uma página sobre sua biografia na Wikipédia, diferentemente de seus colegas laureados, até o momento do anúncio da láurea em meados de outubro de 2018. Apesar de ser citada indiretamente na página do seu colaborador, uma página própria sobre a história de vida e avanços da cientista ainda não havia sido autorizada pelos moderadores. Segundo a notícia³ veiculada pela revista norte-americana *The Atlantic*, um usuário solicitou a criação de uma página sobre a cientista em maio de 2018, mas o pedido fora negado por um moderador do *site*, alegando que não havia referências suficientes que qualificassem a criação de um artigo sobre a cientista. Com isso, apesar das importantes contribuições de Strickland para a física dos *lasers*, o reconhecimento da cientista em uma página da Wikipédia ocorreu simultaneamente com a divulgação midiática da sua láurea no Nobel de Física (KOREN, 2018).

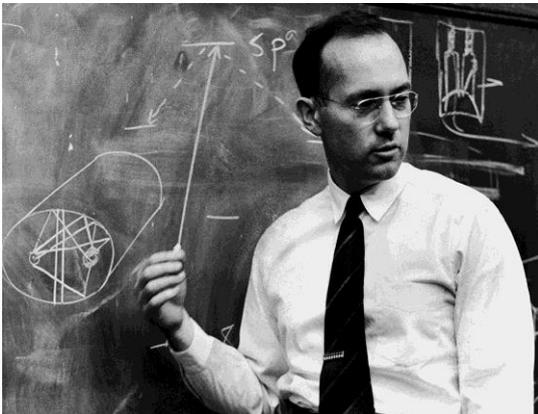


Figura 4 - Charles Townes em 1961

Fonte: Alfred Eisenstaedt/Getty Images.

LASER: UM BREVE HISTÓRICO

Embora a história do *laser* esteja repleta de contribuições teóricas e experimentais de vários cientistas, cabe mencionar que a discussão abaixo se refere a um recorte de fatos históricos que constituem essencialmente no desenvolvimento do *laser*.

Assim, ainda que o *laser* tenha sido desenvolvido somente na década de 1960, seus princípios teóricos para seu funcionamento foram

elencados no início do século XX, por meio dos estudos relacionados à Mecânica Quântica. Em 1917, Albert Einstein (1879-1955), utilizando o trabalho desenvolvido por Max Planck (1958-1947), propôs teoricamente o conceito de emissão estimulada de radiação, que consiste em um fenômeno quântico cuja interação de um fóton com um átomo excitado provoca a produção de outro fóton idêntico (EINSTEIN, 1917).

³ <https://www.theatlantic.com/science/archive/2018/10/nobel-prize-physics-donna-strickland-gerard-mourou-arthur-ashkin/571909/>

Existem autores que sugerem que os primeiros estudos para aplicação da emissão estimulada foram desenvolvidos em meio ao contexto da Segunda Guerra Mundial (SILVA NETO; FREIRE JUNIOR, 2017). Os primeiros indícios para o desenvolvimento do *laser* são reconhecidos nas pesquisas do físico norte-americano Charles Townes (1915-2015), na época professor na Universidade de Columbia. Com o auxílio de seus colaboradores, um estudante de doutorado e um pós-doutorando, Townes (Figura 4) desenvolve um dispositivo de amplificação de radiação a partir do uso do espectro eletromagnético das micro-ondas, sendo chamado de *maser* (KAMINSKY, 2009), acrônimo para *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.

Em 1958, visionando a possibilidade da construção de um aparelho que pudesse amplificar ondas eletromagnéticas no espectro da luz visível, Charles Townes e seu colega Arthur Schawlow (1921-1999) estabeleceram algumas possibilidades de desenvolver um *maser óptico*. Os resultados dessa análise (Figura 5) foram publicados na revista *Physical Review* (SCHAWLOW; TOWNES, 1958): por essa pesquisa, Townes fora reconhecido por meio do Prêmio Nobel de Física de 1964 devido às contribuições na área da eletrônica quântica (GROSS; HERRMANN, 2007). A láurea também fora compartilhada com os físicos soviéticos Alexander Mikhailovich Prokhorov (1916-2002) e Nikolai Gennadievich Basov (1922-2001) que, de forma independente, haviam também desenvolvido conhecimentos relevantes acerca do *maser óptico* (BARTHEM, 2005).

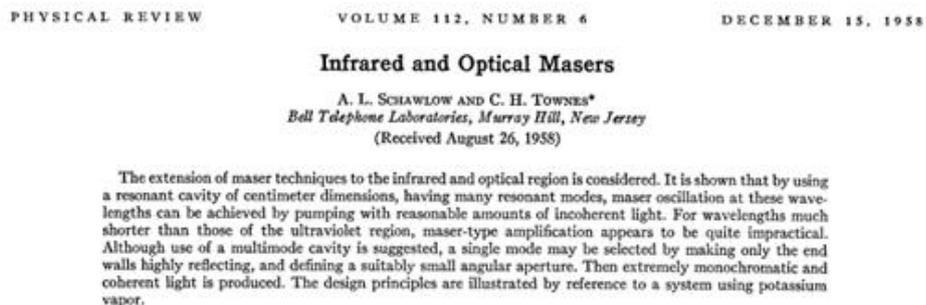


Figura 5 - Artigo *Infrared and Optical Masers*

Fonte: Schawlow e Townes, 1958.

Esse artigo, publicado por Schawlow e Townes em 1958, se tornou um trabalho clássico da área da física dos *lasers* (SILVA NETO; FREIRE JUNIOR, 2017) e desencadeou uma corrida para um desenvolvimento experimental que apresentasse o funcionamento do *maser óptico*. A possível primeira demonstração é creditada ao físico Theodore Harold Maiman (1927-2007), que em 1960, na época, trabalhava nos Laboratórios Hughes, na Califórnia (Figura 6). Ele desenvolveu um aparato cuja montagem consistia em um cristal de

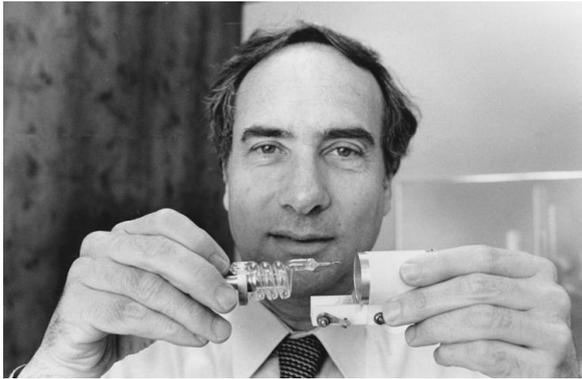


Figura 6 - Theodore Maiman em 1960

Fonte: Madison.com, 2016.

rubi inserido no interior de uma lâmpada de flash. As extremidades desse cristal eram cobertas com camadas de prata e, em um desses lados, a camada era semitransparente, de maneira que a radiação eletromagnética produzida pudesse ser transmitida (SILVA NETO; FREIRE JUNIOR, 2017). A proposta de Theodore Maiman (Figura 7) fora publicada igualmente na Revista *Physical Review* (MAIMAN *et al.*, 1961).

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 123, NUMBER 4

AUGUST 15, 1961

Stimulated Optical Emission in Fluorescent Solids. II. Spectroscopy and Stimulated Emission in Ruby

T. H. MAIMAN,* R. H. HOSKINS,* I. J. D'HAENENS, C. K. ASAWA, AND V. EYUHOV
Hughes Research Laboratories, A Division of Hughes Aircraft Company, Malibu, California
(Received January 27, 1961)

Optical absorption cross sections and the fluorescent quantum efficiency in ruby have been determined. This data has been used to correlate calculations with the analysis of the preceding paper. Stimulated emission from ruby under pulsed excitation has been studied in some detail; the observations are found to depend strongly on the perfection of the particular crystal under study. A peak power output of approximately 5 kw, total output energy of near 1 joule, beam collimation of less than 10^{-2} rad, and a spectral width of individual components in the output radiation of about 6×10^{-4} Å at 6943 Å have been measured. It is suggested that mode instabilities due to temperature shifts and a time-varying magnetic field are contributing to an oscillatory behavior of the output pulse.

Figura 7 - Artigo *Spectroscopy and Stimulated Emission in Ruby*

Fonte: Maiman *et al.*, 1961.

Além disso, é possível dizer que o desenvolvimento da tecnologia dos *lasers* extrapolou os limites norte-americanos e soviéticos, exercendo influência significativa na ciência brasileira. Em 1959, o físico brasileiro Sérgio Porto (Figura 8), doutor em física pela

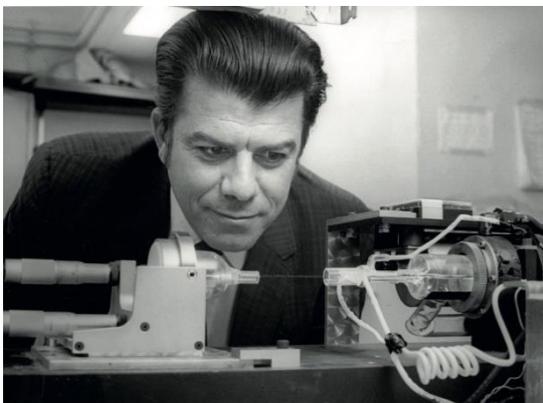


Figura 8 - Sérgio Porto

Fonte: Andrade, 2019.

Universidade Johns Hopkins de Baltimore e então professor de mecânica estatística no Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA) conhece o artigo *Infrared and Optical Masers*, publicado um ano antes pelos físicos supracitados Arthur Schawlow e Charles Townes, que trabalhavam nos Laboratórios Bell, em Nova Jersey. Refletindo quanto às suas insatisfações enquanto professor e pesquisador no Brasil (SANTANA; FREIRE JUNIOR, 2010), Sergio aceita o convite de um

representante dos Laboratórios Bell para que pudesse cooperar em trabalhos relacionados à física dos *lasers*, no ano de 1960. Suas pesquisas acerca das aplicações tecnológicas com base no uso dos *lasers* se tornaram extremamente relevantes, o que permitiu que o Brasil se tornasse reconhecido internacionalmente na utilização de *lasers* na medicina (SILVA NETO; FREIRE JUNIOR, 2017).

LASER: UM AMPLIFICADOR ÓPTICO

Ainda que o *laser*, acrônimo para “*light amplification by stimulated emission of radiation*” (BARTHEM, 2005) possa ser compreendido mediante conceitos da Óptica e da Ondulatória, seu entendimento só é possível a partir de conhecimentos relativos à Mecânica Quântica, sendo o modelo atômico descrito por Niels Bohr (1885-1962) suficiente para a compreensão de seu funcionamento. Em 1917, Albert Einstein descreveu o fenômeno luminoso a partir da teoria quântica (EINSTEIN, 1917), cujo primeiro princípio postula que a luz propaga-se em pacotes de energia denominados fótons; e o segundo princípio assume que a maioria dos átomos e moléculas existe em um estado de baixa energia (GROSS; HERRMANN, 2007). Não somente isso, os átomos e moléculas possuem níveis de energia quantizados, cujos elétrons só podem ocupar certos níveis conforme quantidades específicas de energia.

No entanto, em situações que ocorre a mudança de um elétron de um nível energético para outro é desencadeada a absorção ou a emissão de energia. Os fótons consistem justamente nessa quantidade de energia que é absorvida ou emitida pelos elétrons. Sendo assim, ao mudar para um nível de maior energia, o elétron precisa absorver fótons, o que ocorre somente se sua energia for idêntica a diferença de energia entre os níveis energéticos (SCHITTLER, 2015); porém, para mudar para um nível de menor energia, o elétron precisa emitir fótons (SILVA NETO; FREIRE JUNIOR, 2017). Considerando h como a constante de Planck e f a frequência da radiação (BAGNATO, 2001), essa quantidade de energia emitida ou absorvida pelo elétron é descrita pela equação (1):

$$\Delta E = hf \quad (1)$$

Quando elétrons em um átomo estão em um estado excitado, a emissão de energia para que retornem ao seu estado fundamental pode ocorrer de duas maneiras: pela emissão espontânea ou pela emissão estimulada (ANDRADE, 2016). Considerando a instabilidade do estado excitado, passado certo intervalo de tempo, naturalmente ocorre transferência do elétron para um nível mais baixo de energia, o que diz respeito ao processo de emissão

espontânea; entretanto, nesse caso, a emissão de um fóton pode ser relativamente demorada, necessitando de um agente externo que acelere esse processo (BAGNATO, 2001). Nesses casos, pode se aplicar o processo de emissão estimulada, desenvolvido teoricamente por Einstein: é justamente outro fóton externo, que pode ser oriundo de uma emissão espontânea, que incide no átomo excitado fazendo com que este emita um fóton idêntico ao incidente (VALADARES; MOREIRA, 1998). Os fótons incidente e emitido emergem juntos do sistema quântico, com a mesma energia e na mesma direção. A Figura 9 demonstra uma representação esquemática da emissão estimulada (a) e da emissão espontânea (b). Como representado na figura, na emissão estimulada, o elétron, em seu estado fundamental, absorve a energia proveniente de um fóton, se posicionando em um nível excitado; na sequência, este elétron interage com outro fóton externo, fazendo com que retorne ao estado fundamental, gerando, por fim, a emissão de dois fótons idênticos. Diferente do que acontece na emissão espontânea, o elétron posicionado em um nível excitado emite a energia absorvida na forma de um fóton, retornando ao seu nível fundamental.

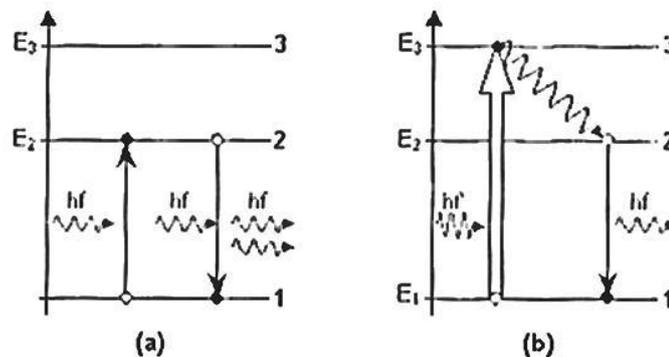


Figura 9 - (a) Emissão estimulada e (b) emissão espontânea

Fonte: Barthem, 2005.

Em outras palavras, os fótons emergentes devido à emissão estimulada podem influenciar outros átomos que estejam em um estado excitado, causando a liberação de outros fótons idênticos aos iniciais. É sob essa condição que é possível compreender o funcionamento do *laser*: um dispositivo que é capaz de produzir um intenso feixe luminoso (ou feixe de fótons) justamente a partir da emissão estimulada (CAVALCANTE; JARDIM; BARROS, 1999). É importante ressaltar que os fótons provenientes desse processo oscilam em fase e em uma determinada faixa de frequência bastante estreita (GROSS; HERRMANN, 2007).

Esse processo é responsável por definir algumas características do *laser*, como o elevado grau de monocromaticidade. Diferentemente da luz branca que é composta por vários

comprimentos de onda, possuindo um espectro contínuo, o feixe *laser* é formado por uma estreita faixa de frequência (BAGNATO, 2001). Isso implica que o feixe luminoso de *laser* não é precisamente monocromático, pois a energia dos níveis atômicos não é rigorosamente definida, além dos fótons emitidos possuírem um comprimento de onda que sofre uma variação em torno de um valor médio (DIONISIO, 1993). Em termos do comportamento ondulatório do *laser*, outra característica diz respeito à coerência do *laser*, que se relaciona com a condição das ondas eletromagnéticas estarem em fase (ANDRADE, 2016). Nos feixes de *laser*, as ondas eletromagnéticas se propagam em fase e na mesma frequência. Por outro lado, considera-se que a luz branca é incoerente, cujos fótons (ou ondas eletromagnéticas) são emitidos de maneira desordenada, além de possuírem diferentes comprimentos de onda (VALADARES; MOREIRA, 1998). Além disso, o *laser* possui a característica de ser uma fonte de luz intensa e colimada, podendo emitir radiação em uma direção bem definida.

A constituição mais comum do *laser* é representada por um meio ativo ou meio amplificador, uma fonte de energia para o bombeamento óptico e dois espelhos, um que seja semitransparente e o outro totalmente reflexivo (BARTHEM, 2005). O meio ativo do *laser* consiste na região em que os átomos ou moléculas sofrem o processo de emissão estimulada, cujos elétrons interagem com a radiação luminosa. O meio ativo ou meio amplificador pode ser constituído no estado gasoso (como o *laser* de hélio-neônio e o de CO₂), no estado líquido (como os *lasers* de corantes) e no estado sólido, como a caneta *laser* (VALADARES; MOREIRA, 1998). Ainda, o meio amplificador pode ser também um cristal: a história relata que o *laser* de rubi, desenvolvido por Theodore Harold Maiman, fora o primeiro *laser* a ser desenvolvido (HOROWICZ, 1999).

Naturalmente, os átomos do meio amplificador se apresentam no estado de baixa energia. Nessas condições o *laser* não poderá funcionar, considerando que os elétrons não estão em um estado mais energético. Para isso, é necessária a presença de uma fonte de energia que provoque a produção de estados metaestáveis (BARTHEM, 2005). Para tanto, deve-se considerar a transição entre dois níveis de energia E_0 e E_1 , no qual o nível E_0 corresponde ao estado fundamental e o nível E_1 corresponde ao estado metaestável. Caso a maioria dos átomos que compõem o meio ativo esteja no nível de energia E_0 , o fenômeno observado será de absorção; caso contrário, em que a maioria dos átomos esteja no nível de energia E_1 , o efeito observado será de emissão estimulada (RODRIGUES, 2007). No entanto, a probabilidade de transição eletrônica entre os níveis E_0 para E_1 e entre os níveis E_1 para E_0 são iguais mesmo com a presença de uma fonte de energia. Nesse caso, a população de

elétrons em ambos os níveis energéticos passa a se igualar, não gerando quaisquer feixes de luz (BARTHEM, 2005).

Dessa forma, a emissão de luz *laser* ocorrerá mediada pela chamada inversão de população, que se apresenta quando existe maior emissão do que absorção de fótons pelos átomos presentes no meio amplificador (SCHITTLER, 2015). Isso ocorre por meio de um processo chamado de bombeamento óptico, que mantém a inversão de população por meio da inserção de energia no meio amplificador. Sabendo que somente dois estados de energia não são suficientes para que ocorra a emissão estimulada, há a necessidade de estados de energia mais altos para que ocorra o bombeamento. Tendo isso em vista, os meios amplificadores que compõem os *lasers* apresentam três ou até quatro níveis de energia (SILVA, 2009), como ilustrado na Figura 10:

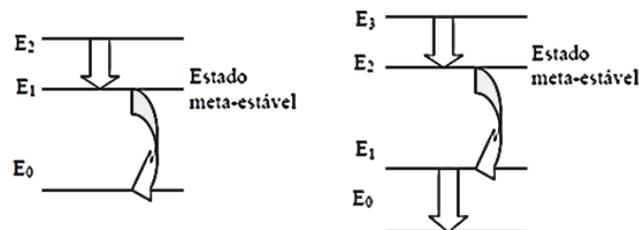


Figura 10 - Sistema de três e quatro níveis energéticos

Fonte: Silva, 2009.

Em *lasers* que possuem três níveis, durante o fornecimento de energia ao meio ativo por meio do bombeamento óptico - em *lasers* de diodo esse processo é realizado por meio de uma corrente elétrica em um semicondutor; em *lasers* de hélio-neônio, a partir de descargas elétricas causadas por lâmpadas (BARTHEM, 2005) - os átomos ou moléculas presentes no estado fundamental E_0 são transferidas para o estado mais energético E_2 , absorvendo energia. Em seguida, sofrem decaimento espontâneo para o estado metaestável E_1 . Por fim, a emissão estimulada ocorre no decaimento para o estado fundamental E_0 . No sistema de quatro níveis, o estado de energia E_2 é o estado metaestável. Na transição entre $E_2 \rightarrow E_1$ ocorre emissão estimulada (SILVA, 2009).

Na medida em que ocorre o decaimento dos átomos e moléculas para o estado fundamental, os fótons emergentes passam a interagir com os átomos do meio amplificador, produzindo mais fótons por meio do processo de emissão estimulada. É importante ressaltar que nem todos os fótons inicialmente produzidos irão compor o feixe de *laser*, pois podem se direcionar para as paredes da cavidade. Outros fótons irão se mover paralelamente ao eixo do tubo e são estes que induzirão outras emissões estimuladas (RODRIGUES, 2007). A

frequência f desses fótons emergentes consiste na razão entre a diferença de energia entre os estados fundamental e metaestável e a constante de Planck, apresentada em (2):

$$f = \frac{E}{h} \quad (2)$$

Esse processo é mediado por meio de dois espelhos perfeitamente planos e estritamente paralelos (ANDRADE, 2016), situados nas extremidades do meio ativo, chamada de cavidade óptica ressonante (HOROWICZ, 1999). Essa configuração permite que os fótons que se deslocam paralelamente à cavidade óptica sejam refletidos pelos espelhos e retornem aos átomos do meio amplificador, produzindo mais emissões estimuladas, aumentando o número de fótons de forma exponencial (SILVA NETO; FREIRE JUNIOR, 2017). Para que uma porção dessa luz possa sair na forma de raio *laser*, é necessário que um dos espelhos não seja totalmente reflexivo. Dessa forma, um dos espelhos é semitransparente ou parcialmente refletor. Com isso, ainda que a cavidade óptica possua uma grande quantidade de fótons entre os dois espelhos sofrendo reflexão, apenas uma pequena parcela escapa de maneira a formar o feixe de luz *laser* (RODRIGUES, 2007).

Sob o ponto de vista da ondulatória, que se apresentará como importante no posterior entendimento da técnica desenvolvida por Donna Strickland, a luz *laser* se mantém aprisionada no formato de uma onda estacionária no interior da cavidade óptica, obedecendo a modos de vibração que dependem da velocidade da luz em seu interior (BARTHEM, 2005) e da dimensão da cavidade, cujo comprimento deve ser determinado da maneira que a onda eletromagnética refletida seja somada à onda incidente; assim, o comprimento da cavidade deve ser de um número inteiro de metades de comprimento de onda (SILVA, 2009). De outra maneira, somente um conjunto de frequências entendidas como os modos de vibração longitudinais sofrerão interferência construtiva em cada volta completa no interior da cavidade, como demonstrado na Figura 11. Assim, as frequências emitidas por um *laser* são aquelas que estiverem dentro do espectro de emissão do meio amplificador, além de satisfazerem as supracitadas condições da ondulatória (OLIVEIRA, 2012):

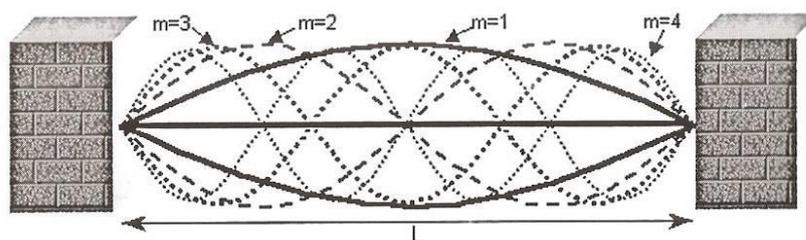


Figura 11 - Representação da luz *laser* em termos da ondulatória

Fonte: Barthem, 2005.

Além dessas características, a luz *laser* é considerada expressivamente potente em comparação às fontes de luz convencionais. Possivelmente, as altas intensidades consistem no aspecto mais relevante dos *lasers*, ao considerar o processo de amplificação da luz, bem como sua concentração em uma área extremamente pequena. Diferentemente dos *lasers* contínuos, grandes intensidades são aplicadas em *lasers* pulsados, nas quais o espelho semitransparente possibilita a liberação de luz em períodos de tempo na ordem dos nanossegundos (SILVA, 2009). Considerando essas características, o *laser* pode ser visualizado em inúmeras aplicações tecnológicas, como os bisturis a *laser* em cirurgias oculares (VALADARES; MOREIRA, 1998), que foram desenvolvidos a partir de contribuições de pesquisas como as desenvolvidas por Donna Strickland.

LASER E AS PINÇAS ÓPTICAS

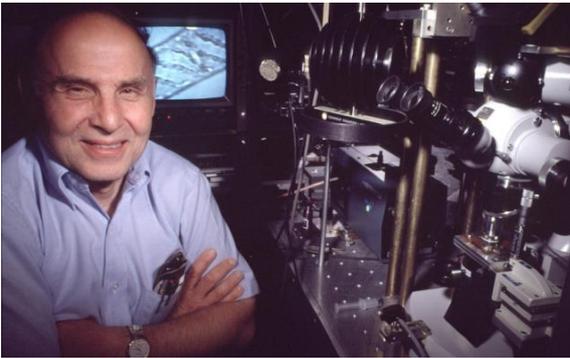


Figura 12 - Arthur Ashkin em 1988

Fonte: Diamond, 2018.

Uma aplicação extremamente relevante para a ciência dos *lasers* é a chamada pinça óptica. Entre os anos de 1970 e 1990, Arthur Ashkin (Figura 12) publicou artigos (ASHKIN, 1970; ASHKIN, 1987; ASHKIN, 1992) que possibilitaram ser considerado o pioneiro no que diz respeito ao desenvolvimento das armadilhas ópticas (LEE, 2018). A partir dessa técnica, é possível manipular objetos

minúsculos sem qualquer contato mecânico, como organelas presentes no citoplasma das células, além de vírus e bactérias, mas também mensurar propriedades mecânicas existentes em sistemas biológicos (FAPESP, 2000).

Quais são os conhecimentos que possibilitam compreender a aplicação das pinças ópticas? A partir das ideias descritas, em 1619, por Johannes Kepler acerca do comportamento das caudas dos cometas, bem como pelo desenvolvimento da teoria eletromagnética de Maxwell, formalizada em 1873 (NEVES, 2006), fora possível demonstrar a capacidade da luz em exercer força em um determinado meio material: esse fenômeno fora chamado de pressão de radiação (KUMAR, 2018). Em outras palavras, a luz transporta momento linear (NEVES, 2006) e, ao incidir sobre algum objeto, poderia aplicar uma força neste último durante a transferência de momento. Essa força dependeria da potência luminosa, bem como da velocidade de propagação no meio incidente (ROCHA, 2004; ROCHA, 2008).

Não somente isso, na incidência de um raio de luz em um pequeno objeto, haverá desvio de sua trajetória caso os índices de refração entre o meio de incidência e do objeto sejam diferentes (exceto nos casos da incidência normal a superfície). Ao analisar um feixe de luz localizado que incide sobre um pequeno objeto, será gerado um raio refletido e um raio refratado na superfície do objeto, a partir de cada raio do feixe luminoso. Os raios refletidos contribuirão para a pressão de radiação, cujo feixe de luz empurra o pequeno objeto no sentido de incidência do feixe, enquanto os raios refratados contribuirão com as chamadas forças de gradiente (ROCHA, 2004). A Figura 13 representa justamente essa consideração de que o momento linear do fóton sofre uma variação $\Delta\vec{p}$ em sua direção de propagação ao ser refratado no interior do objeto capturado. Pela conservação de momento linear, o objeto capturado também sofrerá uma variação de momento $-\Delta\vec{p}$ de mesmo módulo, mas de sentido oposto à variação de momento linear do fóton de luz incidente (BARTHEM, 2005).

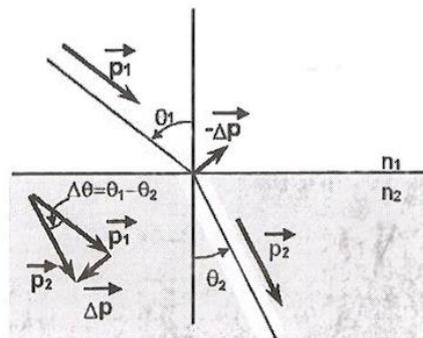


Figura 13 - Variação do momento linear do fóton

Fonte: Barthem, 2005.

Durante o estudo do movimento de microesferas a partir da pressão de radiação, Ashkin e sua equipe de pesquisadores observaram que esses pequenos objetos se alinhavam ao eixo óptico do feixe de *laser*. Em outras palavras, ao focalizar o feixe de *laser* utilizando a objetiva de um microscópio, se percebeu que as esferas ficavam presas próximas à região ao foco do feixe luminoso: efeito este causado justamente pela refração dos feixes luminosos (ROCHA, 2004; ROCHA, 2008). O esquema apresentado na Figura 14 demonstra que, independentemente da posição da pequena esfera, a pinça óptica a posicionará no foco do feixe luminoso do *laser*. No primeiro caso, uma partícula posicionada abaixo do foco é deslocada para cima; no segundo caso, uma partícula posicionada acima do foco do feixe é deslocada para baixo; o terceiro caso representa situações em que a partícula está deslocada horizontalmente. Ainda assim, o feixe de luz *laser* aplica uma força que posiciona a partícula em seu foco (BARTHEM, 2005). Nesse sentido, é o equilíbrio entre a força de gradiente e da pressão de radiação que permite o aprisionamento de objetos por meio da pinça óptica. No

entanto, essa interpretação só é válida dentro do modelo da óptica geométrica e aplicável somente em casos que pequenos objetos possuam índice de refração que sejam maiores que o índice de refração do meio que os circunda (ROCHA, 2004).

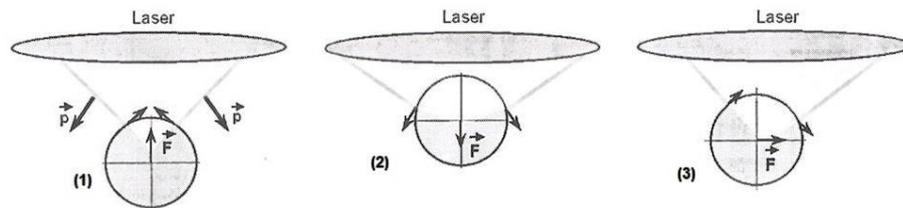


Figura 14 - Esquema de forças aplicadas pela pinça óptica

Fonte: Barthem, 2005.

Apesar das suas importantes pesquisas relacionadas à captura de partículas por meio das suas armadilhas ópticas, se passou muito tempo até que Arthur Ashkin fosse honrado com um Prêmio Nobel de Física (KUMAR, 2018). No ano de 1997, cuja premiação do Nobel de Física homenageara cientistas pelo desenvolvimento de métodos para aprisionar átomos com luz *laser*, alguns cientistas cogitaram a possibilidade que Arthur Ashkin tivesse sido negligenciado (LEE, 2018). Apesar disso, seu reconhecimento veio a ocorrer no ano de 2018, a partir das suas contribuições nos estudos biológicos. Essa láurea também fora compartilhada com Donna Strickland e Gerard Mourou, devido as suas contribuições que são igualmente importantes para a área da física dos *lasers*.

DONNA STRICKLAND E O NOBEL DE FÍSICA

Quais são as contribuições científicas de Donna Strickland para que fosse reconhecida pelo prêmio de maior prestígio na comunidade científica? Na mesma época em que Donna Strickland estudava na Universidade de Rochester em Nova Iorque, no ano de 1985, os estudiosos sobre a óptica estavam procurando desenvolver um modo de aumentar a intensidade de *lasers* de pulsos ultracurtos. Após o *laser* ser inventado nos anos 60 por Theodore Harold Maiman (1927-2007), o desenvolvimento de pulsos de luz com alta intensidade se tornaram recorrentes entre os cientistas (KUMAR, 2018; WILSON, 2018). De fato, “muitos eventos no dia a dia acontecem em escalas de tempo muito rápidas, o que motivou pesquisadores a desenvolverem *lasers* com pulsos ultrarrápidos, com aplicações em variados campos da ciência” (FÁVERO, 2007, p. 18). Em suma, o problema científico que se apresentava na época era o seguinte: na medida em que se aumentava a intensidade dos pulsos de *lasers*, havia uma distorção nas propriedades dos meios de amplificação, chamado de

COMPRESSION OF AMPLIFIED CHIRPED OPTICAL PULSES [☆]

Donna STRICKLAND and Gerard MOUROU

Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester, 250 East River Road, Rochester, NY 14623-1299, USA

Received 5 July 1985

We have demonstrated the amplification and subsequent recompression of optical chirped pulses. A system which produces 1.06 μm laser pulses with pulse widths of 2 ps and energies at the millijoule level is presented.

Figura 15 - Artigo *Compression of Amplified Chirped Optical Pulses*

Fonte: Strickland e Mourou, 1985.

se necessário compreender a constituição dos *lasers* pulsados. Diferente dos comuns *lasers* contínuos, os *lasers* pulsados possuem a característica da geração de pulsos de luz intensos de curta duração (VALADARES; MOREIRA, 1998), que possuem ordem temporal de femto (10^{-12}s) a picossegundos (10^{-15}s). A emissão de um *laser* pulsado consiste no somatório dos vários modos de vibração presentes no interior da sua cavidade óptica, o que implica em uma largura considerável banda de espectro associada a esse pulso; dessa maneira, um pulso ultracurto é constituído pela soma de diferentes componentes espectrais (OLIVEIRA, 2012). Como exemplo, *lasers* pulsados podem ser produzidos por meio de amplificadores com átomos de titânio presentes em cristais de safira, que, por meio do bombeamento óptico, emitem fótons cujas frequências se estendem desde o espectro visível até o infravermelho (ORZEL, 2018).

Por conta disso, conforme se aumenta o número de modos de vibração encontrados na banda de emissão do meio amplificador, há uma diminuição na duração do pulso e um consequente aumento na chamada potência de pico do *laser*, pelo fato de sua energia se concentrar em um curto intervalo de tempo. Isso significa que, na medida em que o intervalo de tempo diminui, o pico de potência luminosa do *laser* aumenta dada uma mesma quantidade de energia. Entretanto, quando essa quantidade de energia é aumentada por meio dos amplificadores, seus componentes ópticos acabam sendo danificados devido a efeitos não lineares, que consistem em alterações nas propriedades ópticas dos materiais por conta da presença de luz (OLIVEIRA, 2012), relacionados à alta potência luminosa do *laser*.

Nos anos 80, as maiores potências luminosas obtidas sem danificar o meio amplificador estavam situadas na escala dos trilhões de watts, porém, era necessária uma quantidade de energia de mil joules, para que o feixe de *laser* pudesse ser emitido em um bilionésimo de segundo (KUMAR, 2018). A dúvida dos cientistas era a seguinte: como desenvolver uma técnica em que *lasers* sejam emitidos de maneira ultrarrápida, mas com

Efeito Kerr (OLIVEIRA, 2012), o qual implicava que intensidades muito altas poderiam danificar justamente os cristais utilizados na amplificação dos pulsos luminosos (CHO, 2018).

Antes de abordar os aspectos e as implicações da pesquisa de Strickland, considera-

máxima potência e sem danificar o meio amplificador? A pesquisa que concedeu uma solução para esse problema fora publicado (Figura 15) em 1985 por Donna Strickland e Gérard Mourou na Revista *Optics Communications*, em um artigo intitulado *Compression of Amplified Chirped Optical Pulses* (STRICKLAND; MOUROU, 1985).

A técnica chamada *chirped pulse amplification* provoca a separação temporal das frequências dos pulsos de *lasers* (OLIVEIRA, 2012). Conforme esquematizado na Figura 16, pode ser compreendida a partir das seguintes etapas: por meio de componentes ópticos como prismas ou grades de difração, os pulsos de *lasers* sofrem dispersão em seus componentes de frequência. Dito de outra forma, quando esses componentes são “[...] apropriadamente posicionados, eles separam as frequências espectrais de forma que as frequências menores percorram um caminho óptico maior” (OLIVEIRA, 2012, p. 60). De outra forma, haverá um atraso da trajetória de diferentes frequências de onda, o que provoca uma redução da sua potência (CHO, 2018) e um aumento no seu tempo de propagação (KUMAR, 2018). Após isso, as componentes espectrais são amplificadas em sua intensidade, sem sobrecarregar ou danificar o meio amplificador. Por último, um arranjo de redes de difração ou prismas recombina e comprime o pulso de *laser* em sua duração inicial, desfazendo os atrasos relativos entre os diferentes comprimentos de onda (PISANTY, 2018), caracterizando esse pulso de *laser* como mais potente comparado ao pulso original (STRICKLAND; MOUROU, 1985; MAINE *et al.*, 1988; STRICKLAND; CORKUM, 1991).

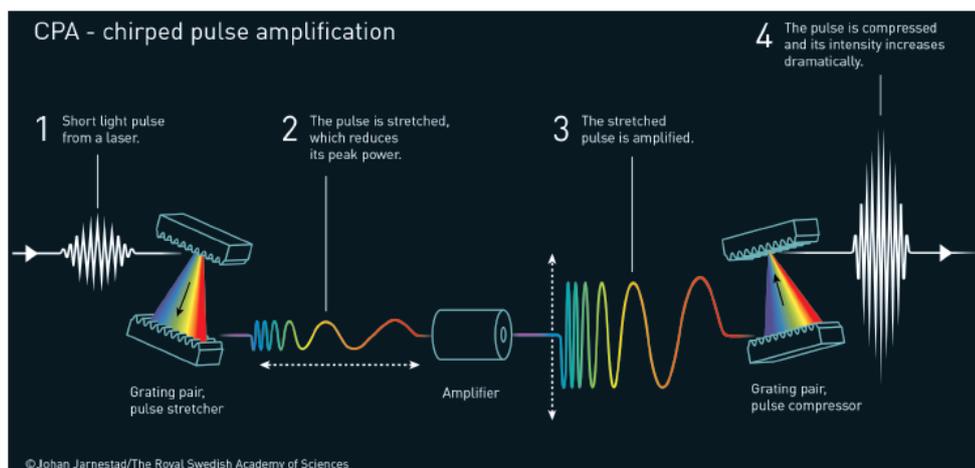


Figura 16 - Esquema da técnica *chirped pulse amplification*

Fonte: Nobel Prize, 2019.

O processo de compressão e amplificação utilizado por Strickland fora aplicado originalmente em radares de comunicação depois da Segunda Guerra Mundial (KUMAR, 2018; LEE, 2018). Em seu artigo introdutório publicado em 1985, Donna Strickland descreve que sua técnica consiste na transposição do sistema empregado nos

radares para o regime óptico. Segundo a cientista, amplificar pulsos que estejam em baixas potências permite que posteriormente energias mais altas sejam alcançadas (STRICKLAND; MOUROU, 1985), o que não seria possível por meio das técnicas clássicas de amplificação.

Para compreender esse processo, é preciso relembrar as conceituações sobre os pulsos de *lasers*. Nesse sentido, primeiramente se considera que pulsos de *lasers*, como os utilizados por Donna Strickland, não são emitidos de forma contínua (GOSWAMI, 2018). Como mencionado anteriormente, os *lasers* pulsados exigem a compreensão de outro conceito da física ondulatória: a geração de pulsos luminosos de curta duração requer uma ampla gama de frequências de onda (KUMAR, 2018). De outra maneira, “um pulso é uma superposição coerente e individual de muitas ondas senoidais, cujas amplitudes se somam construtivamente em um ponto no tempo” (FÁVERO, 2007, p. 18). É possível visualizar essa situação por meio da representação da Figura 17, que demonstra a adição de pulsos de luz com frequências ligeiramente diferentes. Em resumo, um pulso curto de luz *laser* é constituído pela soma de ondas de diferentes frequências ligeiramente diferentes. Utilizando a linguagem matemática, um pulso de *laser* pode ser descrito a partir da Série de Fourier (SHEN *et al.*, 2017), que descreve a decomposição de um sinal (ou pulso) em um somatório de funções trigonométricas. De fato, “devido à curta duração temporal, esses pulsos possuem banda espectral larga, uma vez que a largura espectral e a duração temporal são relacionados por meio de uma transformada de Fourier” (OLIVEIRA, 2012, p. 49):

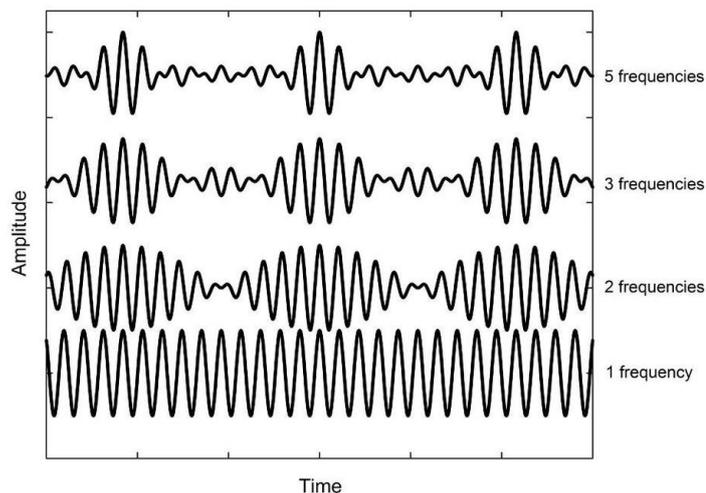


Figura 17 - Constituição das frequências de pulsos curtos

Fonte: Orzel, 2018.

Como apresentado na Figura 18, ao observar a intensidade de um pulso de luz em função do tempo, se percebe que ele existe em um curto período de tempo e que possui alta intensidade. Sabe-se que ao tentar amplificar um pulso com essas características, o meio

amplificador poderá ser danificado. Entretanto, ao analisar essa situação considerando a intensidade luminosa do pulso de *laser* curto no domínio da frequência, se percebe a existência de diferentes frequências cujas intensidades individualmente podem ser aumentadas sem danificar o meio amplificador (GALAUP, 2018). Dessa maneira, se percebe que a técnica não amplifica diretamente um único pulso curto de luz *laser*, mas submete o pulso de *laser* a um processo de dispersão para que então possa ser amplificado com segurança (WILSON, 2018). Também, ao se pensar em termos dos pulsos de *lasers* como constituídos por fótons, essas partículas introduzidas no processo de amplificação se submetem as mesmas características de frequência e fase do pulso inicial; ao serem comprimidos, esses fótons adicionados igualmente são compactados (PISANTY, 2018).

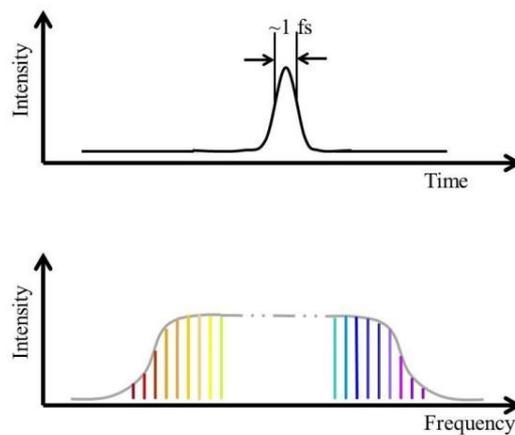


Figura 18 - Gráficos relativos aos pulsos de *laser* de curta duração

Fonte: Orzel, 2018.

Depois de passados dez anos de seu desenvolvimento, pesquisadores obtiveram *lasers* com intensidades de até 10^{20} W/cm². Hoje, a maior intensidade alcançada está na ordem de 10^{22} W/cm² (KUMAR, 2018; WILSON, 2018). Em 1987, Strickland e Mourou, com o auxílio de outros pesquisadores, já haviam conseguido gerar pulsos na faixa dos terawatts de potência (10^{12} W) a partir de um pulso de 1 joule de energia, comprimido no intervalo de 1 picossegundo (WILSON, 2018). O desenvolvimento de sistemas de *laser* ultrarrápidos propiciou o desenvolvimento de inúmeras aplicações, principalmente na medicina, pela possibilidade de desenvolvimento de estudos que utilizam o *laser* como complemento em terapias contra o câncer e na realização de procedimentos em cirurgias ou tratamentos oculares. A técnica vem sendo utilizada nas cirurgias LASIK, acrônimo para *Laser-Assisted in Situ Keratomileusis*, cujo feixe de luz *laser* pode cortar rapidamente a córnea do paciente antes que o tecido ao redor possa aquecer (FREIRE, 2018; VALICH, 2018).

LASERS NO ENSINO DE FÍSICA

Considerando os conhecimentos discutidos anteriormente, este artigo sugere uma proposta de ensino-aprendizagem baseada no aporte metodológico descrito pelas Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (MOREIRA, 2011; MOREIRA, 2012). Tal proposta visa promover uma abordagem sobre a física dos *lasers* utilizando como motivador as pesquisas desenvolvidas pelos laureados no Prêmio Nobel de Física em 2018, por meio de um enfoque especial à figura de Donna Strickland. Não somente isso, a sugestão também considera discussões sobre ciência, como o contexto de reconhecimento de diferentes cientistas na comunidade científica. Diante disso, a proposta apresentará a articulação desses conhecimentos no contexto do ensino de Física, construída com o auxílio de atividades experimentais, bem como a partir de vídeos e textos de divulgação científica que poderão nortear as possíveis discussões.

Tópico específico a ser abordado

O assunto principal a ser abordado diz respeito aos conceitos de física dos *lasers* e mais especificamente, aos aspectos da pesquisa desenvolvida por Donna Strickland com a colaboração de Gerard Mourou, laureados no Prêmio Nobel de Física em 2018. Ademais, a proposta didática também oferece alguns subsídios para discussões sobre ciência, como a problematização do contexto de reconhecimento de mulheres cientistas na comunidade científica.

Situações iniciais: experimentos sobre a luz laser

Nesse contexto, as situações iniciais possuem o objetivo de introduzir os alunos à temática *laser*, mas também possibilitar que os alunos manifestem os seus conhecimentos prévios sobre o assunto. A proposta apresenta o desenvolvimento de experimentos considerados tradicionais com *lasers* comuns, como representado na Figura 19, nos quais os alunos poderão observar seu comportamento, como fenômenos ópticos a exemplo da reflexão interna total; após isso, ambos os experimentos serão discutidos em grande grupo, com o auxílio de perguntas norteadoras. É importante ressaltar que, nesse momento, não se intenciona a elaboração de respostas definitivas e nem que estejam de acordo com o que é cientificamente aceito, pois é a partir das concepções prévias que o professor poderá prosseguir com as próximas etapas.

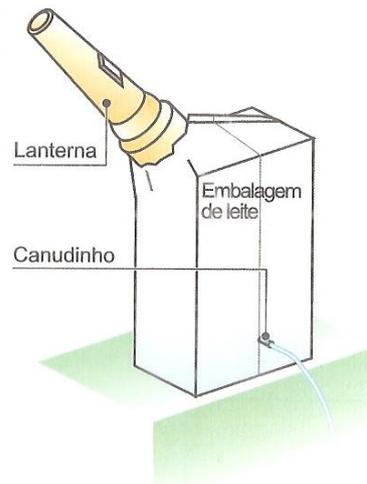


Figura 19 - Experimento relativo à reflexão interna total de um feixe de luz

Fonte: Valadares, 2012.

Situações-problemas: Donna Strickland e os lasers

As situações-problemas serão propostas por meio de recursos didáticos como textos e vídeos de divulgação científica, cujo objetivo é introduzir aos alunos alguns aspectos contextualizados acerca da temática *laser*. Primeiramente, os alunos assistirão ao vídeo *Donna Strickland quotes Cyndi Lauper in Nobel Prize speech*, relativo ao discurso de Donna Strickland durante a cerimônia do Prêmio Nobel de Física em 2018. Após isso, serão abordados alguns questionamentos que possuem o objetivo de discutir as conotações sociais envolvidas na construção científica, como o reconhecimento de mulheres cientistas. Na segunda etapa, por meio da leitura em grande grupo do texto *Cientistas criam laser similar ao da Estrela da Morte* (VAIANO, 2017), os alunos poderão discutir sobre a importância do *laser* em nossa vida cotidiana, cujos questionamentos poderão possibilitar a reflexão sobre questões acerca do *laser* que serão tratados nos momentos posteriores, não havendo a necessidade de serem respondidos em sua completude durante essa etapa.

Conhecimento abordado: definição do conceito de luz laser

Após a discussão das situações-problema, é necessária a discussão dos conteúdos que orientam a compreensão do feixe de luz *laser*. A partir de uma diferenciação progressiva, sugere-se apresentar os conhecimentos mais gerais, como alguns conceitos relativos à Óptica, Ondulatória e a Mecânica Quântica, que embasam a constituição e o funcionamento do *laser*, como: características das ondas eletromagnéticas, diferença dos *lasers* em comparação a

outras fontes de luz, caracterização da luz como constituída por fótons, além da abordagem dos componentes que constituem o *laser*. Também, a proposta preconiza a discussão sobre o processo histórico de desenvolvimento do *laser*.

Conhecimento em maior complexidade: chirped pulse amplification

Sabendo-se que a temática *laser* fora descrita de maneira ampla nos momentos anteriores, essa etapa consiste em abordar aspectos mais específicos. Assim, contando com a utilização de diferentes recursos como simuladores computacionais, experimentos e apresentação de slides, serão apresentados os elementos que possibilitarão compreender a pesquisa desenvolvida por Strickland e Mourou. Nesse sentido, será necessário abordar, por exemplo, as diferenças entre *lasers* pulsados e *lasers* contínuos. Além disso, discussões acerca da relevância e aplicações dessa pesquisa poderão ser abordados, como no que diz respeito à utilização da técnica CPA para o desenvolvimento de procedimentos cirúrgicos oculares.

Revisão integrativa dos conteúdos

Nesse momento, se considerará a retomada dos questionamentos elaborados em todas as aulas anteriores, relacionados aos experimentos e aos materiais de divulgação científica. Ademais, de maneira a desenvolver uma integração dos conhecimentos abordados durante as aulas será elaborada uma discussão sobre a importância das pesquisas de Donna Strickland para a área da física dos *lasers*, inserindo a uma abordagem de aspectos sobre ciência, relativa à desconstrução dos estereótipos de cientista presentes no imaginário social e refletido em premiações como Prêmio Nobel.

Avaliação da aprendizagem dos alunos

A avaliação da aprendizagem deve ser realizada não somente com a intenção de ser um instrumento verificador, mas deve acontecer ao longo de todo o processo de aprendizagem, como em atividades desenvolvidas colaborativamente, fazendo parte de uma avaliação formativa, analisada em conjunto com uma avaliação somativa. Moreira (2011) aponta a relevância dessas avaliações, que devem propor situações que promovam a mobilização dos conhecimentos abordados em diferentes contextos. Nesse caso, a avaliação individual será composta por perguntas discursivas, relativas aos conceitos físicos relacionados a fenômenos que envolvam o *laser*, principalmente em relação à técnica

desenvolvida por Strickland e Mourou, bem como por discussões acerca dos elementos históricos e sociais presentes no desenvolvimento científico.

Avaliação da unidade de ensino

A análise da unidade de ensino após a sua aplicação é igualmente importante, pois, de acordo com Moreira (2011), a proposta apenas terá êxito se o desempenho dos alunos demonstrar indícios de aprendizagem significativa. Em função disso, sugere-se a aplicação de um questionário, cujas perguntas buscam considerar a opinião dos alunos sobre os momentos em sala de aula, mas também promovam uma reflexão individual acerca de sua aprendizagem.

PROPOSTA DE UEPS: DONNA STRICKLAND E A FÍSICA DOS *LASERS*

Objetivo: ensinar os princípios da Física que explicam o funcionamento dos *lasers*, considerando sua importância no desenvolvimento das pesquisas da cientista Donna Strickland, laureada com o Prêmio Nobel de Física em 2018.

Situação inicial: objetivando introduzir os alunos à temática *laser*, mas também possibilitar que manifestem os seus conhecimentos prévios sobre o assunto, serão realizados os experimentos *Entortando raios de luz*⁴ e *Luz que faz curva*⁵. Apesar de serem experimentos simples, eles propiciam muitas discussões sobre fenômenos de reflexão e refração da luz, além de introduzirem os discentes no entendimento das fibras ópticas. Para essa atividade, os alunos poderão ser divididos em grupos, de no máximo quatro pessoas, devendo investigar os experimentos a partir de perguntas norteadoras em um roteiro de experiências. Alguns dos questionamentos podem ser os seguintes: (i) Como você explicaria o conceito de luz? (ii) De que maneira a luz se comporta? A luz sempre se propaga em linha reta? A partir desses questionamentos, ambos os experimentos serão discutidos em grande grupo, de maneira a reconhecer quais as concepções iniciais que os alunos possuem sobre o comportamento da luz *laser*. É importante ressaltar que, nesse momento, não se intenciona a elaboração de respostas definitivas e nem que estejam de acordo com o que é cientificamente aceito, pois é a partir das concepções prévias que o professor poderá prosseguir com as próximas etapas. Também, de maneira a compor a discussão da aula seguinte, pode ser solicitado aos alunos que pesquem sobre as aplicações cotidianas do *laser*.

⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=gqkSfAfy30>

⁵ <https://www.youtube.com/watch?v=F69tWoZa4ic>

Situações-problema: objetivando introduzir os alunos a outras questões contextualizadas acerca da temática *laser* será apresentado o vídeo *Donna Strickland quotes Cyndi Lauper in Nobel Prize speech*⁶, relativo ao discurso de Donna Strickland durante a cerimônia do Prêmio Nobel de Física, em 2018. Após esse momento, os seguintes questionamentos podem ser apresentados para os alunos: (i) Você já conhecia a cientista Donna Strickland? Se não, quais cientistas laureados pelo Nobel você poderia citar? (ii) O que você acha que é necessário para que cientistas sejam reconhecidos? (iii) Você conseguiu identificar quais as mulheres que foram laureadas no Nobel de Física, além de Donna Strickland? (iv) Você acha que existe diferenças entre homens e mulheres na construção de suas carreiras científicas? Você acha importante que a ciência seja construída tanto por homens quanto por mulheres? (v) Qual é a percepção de Donna Strickland em relação à ciência e sobre a construção dos conhecimentos científicos? Para ela, a Física é difícil? (vi) Donna Strickland, Gerard Mourou e Arthur Ashkin foram laureados por contribuições em qual área da Física? Essas perguntas possuem como objetivo principal discutir as conotações sociais envolvidas na construção científica, como o reconhecimento de mulheres cientistas. No momento seguinte, se solicitará que os alunos compartilhem em grupo os resultados das suas pesquisas acerca das possibilidades de aplicação do *laser*, de maneira a responder aos questionamentos: (vii) Pensando em nossa vida cotidiana, você poderia citar alguma aplicação tecnológica relacionada aos *lasers*? Qual dos exemplos de aplicações cotidianas sobre o *laser* que os colegas compartilharam que você achou mais interessante? Para contribuir ainda mais com essa discussão, será distribuído um pequeno texto com o título *Cientistas criam laser similar ao da Estrela da Morte*⁷ (VAIANO, 2017). Os alunos deverão realizar uma leitura individual e as seguintes perguntas serão apresentadas aos alunos: (viii) Você reconhece a referência da Estrela da Morte? O que ela significa? (ix) Quais aplicações dos *lasers* que são descritos pelos cientistas? E quais são as dificuldades que os cientistas encontraram ao trabalhar com *lasers* de alta potência? Essas perguntas pretendem proporcionar um momento de reflexão sobre questões acerca do *laser* que serão tratadas nos momentos posteriores, não havendo a necessidade de serem respondidos em sua completude durante essa etapa.

Definição do conceito de luz *laser*: após a discussão das situações-problema, é necessária a discussão dos conteúdos que norteiam a compreensão do feixe de luz *laser*, que poderá ser desenvolvida mediante apresentações de *slides* e com a utilização conjunta de *lasers*. Para

⁶ <https://www.youtube.com/watch?v=pan9HeLdK4E&t>

⁷ <https://super.abril.com.br/ciencia/cientistas-criam-laser-similar-ao-da-estrela-da-morte>

tanto, inicialmente, os seguintes questionamentos podem ser apresentados: (i) Como você acredita que é produzido o feixe de *laser*? Você acha que existem diferenças entre a luz branca e a luz *laser*? A partir de uma diferenciação progressiva, sugere-se apresentar os conhecimentos mais gerais, como alguns conceitos relativos à Óptica, Ondulatória e Mecânica Quântica, que ajudam a compreender a constituição do *laser*, como (a) definição e características das ondas eletromagnéticas e seu espectro eletromagnético; (b) diferença entre as ondas eletromagnéticas de luz *laser* e da luz branca, como o espectro contínuo e o espectro discreto; (c) aspectos da teoria quântica como dualidade onda-partícula e a caracterização da luz como constituída por fótons. Após esses tópicos, considerando a discussão de aspectos relacionados à História da Ciência, poderá ser discutido o contexto de desenvolvimento dos *lasers*, como (d) desenvolvimento histórico do conceito de emissão estimulada por Albert Einstein; (e) criação dos *masers* e do primeiro *laser* por Theodore Maiman; (f) constituição do *laser* em seus componentes, como o meio amplificador e a cavidade óptica. Esses aspectos deverão ser devidamente retomados ao se discutir as características do *laser*, como monocromaticidade e coerência, de maneira a demonstrar o comportamento do *laser* como onda, mas também como partícula. Além disso, se demonstra relevante comentar sobre as contribuições do cientista brasileiro Sérgio Porto para a área da física dos *lasers*.

Laser e o Prêmio Nobel de Física: sabendo-se que a temática *laser* fora descrita de maneira ampla nos momentos anteriores, essa etapa consiste em abordar, em específico, os aspectos da pesquisa desenvolvida por Donna Strickland, por meio de experimentos e simulações associados à utilização de apresentações de *slides*. Primeiramente, será necessário descrever (a) diferenças entre os *lasers* contínuos - mais comuns no cotidiano - e os *lasers* pulsados, aqueles utilizados por Strickland em sua pesquisa. De maneira a ilustrar a constituição dos *lasers* pulsados, pode se apresentar a simulação *Criando Ondas*⁸, que possibilita apresentar, de maneira conceitual, os pulsos de *lasers* como a soma de ondas de diferentes frequências. Após essa discussão, será iniciada uma abordagem conceitual sobre a técnica desenvolvida por Donna Strickland e Gerard Mourou, por meio do seguinte questionamento: (i) Os cientistas desenvolveram sua técnica de compressão e amplificação dos pulsos de *lasers* com o objetivo de solucionar qual problema de pesquisa? Nessa discussão, cabe apresentar as (b) características dos *lasers* pulsados, como sua potência de pico e sua duração temporal, bem como as problemáticas reconhecidas pelos cientistas para a produção de *lasers* de alta

⁸ https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/fourier

potência. Além do uso de apresentação de *slides* com esquemas para mediação dos conceitos com os alunos, a exemplificação do processo desenvolvido pelos cientistas pode ser desenvolvida por meio de um experimento de (c) dispersão da luz⁹, fenômeno que se apresenta na técnica desenvolvida por Strickland e Mourou. Além disso, para estabelecer uma analogia com o aparato experimental desenvolvido pelos cientistas, podem-se apresentar prismas que correspondam aos instrumentos ópticos que amplificam e comprimem a luz, ao passo que um feixe de luz branca pode representar os pulsos de luz *laser*. Após essa discussão, se questionará (ii) Quais as aplicações das pesquisas desenvolvidas por esses laureados? Nesse momento, serão apresentadas implicações dessa técnica, como no tratamento de câncer e em cirurgias oculares a *laser*.

Avaliação Somativa: nessa etapa será proposta uma avaliação individual com perguntas discursivas, que, por exemplo, possam solicitar a descrição do funcionamento dos *lasers* e dos conhecimentos desenvolvidos pelos cientistas, possibilitando igualmente suscitar uma reflexão sobre as conotações históricas e sociais existentes no desenvolvimento científico. Esses questionamentos serão construídos a partir de textos que apresentem a temática *laser* em outros contextos, como por exemplo: (i) Quais as razões que levaram os cientistas a construir *lasers* pulsados de alta potência? Quais as diferenças desse *laser* para os *lasers* comuns, que utilizamos no cotidiano? (ii) Considerando as discussões realizadas durante as aulas, quais são os possíveis impactos da utilização dos *lasers* em nosso cotidiano?

Revisão Integrativa: de maneira a desenvolver uma integração dos conhecimentos, será desenvolvida uma discussão sobre a importância das pesquisas de Donna Strickland e de Gerard Mourou para a área da física dos *lasers*, bem como um debate referente à desconstrução dos estereótipos de cientista que estão presentes no imaginário social e refletidos em premiações como o Prêmio Nobel. Essa etapa contará com o auxílio de uma apresentação de *slides*, para que seja possível buscar o entendimento por possíveis respostas para as situações-problemas elaboradas durante a unidade de ensino.

Avaliação da Aprendizagem: a avaliação da aprendizagem deve ser realizada não somente com a intenção de ser um instrumento verificador, mas realizada ao longo de todo o processo de aprendizagem, como em atividades desenvolvidas colaborativamente, fazendo parte de

⁹ <https://www.youtube.com/watch?v=-e9crnQEA78>

uma avaliação formativa, analisada em conjunto com avaliação somativa. Dessa forma, essa etapa será baseada na participação dos alunos durante os momentos de questionamentos, bem como durante as atividades propostas, como a avaliação somativa que corresponderá a 50% da avaliação geral do aluno.

Avaliação da UEPS: considerando que a proposta apenas terá êxito se o desempenho dos alunos demonstrar indícios de aprendizagem significativa, a unidade de ensino potencialmente significativa poderá ser avaliada por meio de questionários, cujas perguntas promovam a opinião dos alunos e as alunas sobre os momentos das aulas, além de promover uma reflexão individual sobre sua aprendizagem. Alguns exemplos de perguntas do questionário podem ser: (i) Qual sua opinião sobre a temática das aulas? Você considera importante aprender sobre uma tecnologia como os *lasers*? (ii) Como você avalia a sua participação nas aulas? No que você precisa melhorar?

Total de aulas: 16 aulas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho objetivou apresentar as contribuições de cientistas da atualidade como motivador para ensino de Física dos *lasers*, por meio dos exemplos de Donna Strickland e seu orientador Gerard Mourou. De maneira semelhante ao apresentado por Lima (2015) e Cordeiro (2017), se procurou abordar o exemplo de uma mulher cientista em meio de um contexto de ensino de ciências, ao se perceber que o desenvolvimento científico é, muitas vezes, entendido como sendo predominantemente protagonizado por homens. Embora o aspecto supracitado não seja o foco deste trabalho, considera-se importante apresentar alguns aspectos de discussões sobre as mulheres na ciência de forma a contribuir com as discussões na aula de Física. Assim, elencar os percalços que as mulheres como vivenciaram durante a ascensão acadêmica possibilita que os discentes percebam a ciência como um processo muito mais complexo do que o simples entendimento de princípios que regem a natureza.

Também, entende-se como necessária a elaboração de propostas e/ou o relato de experiências acerca da discussão de conteúdos da atualidade no contexto de ensino de Física, objetivando-se estar em consonância com os princípios expostos nos documentos oficiais, além com as pesquisas que discorrem sobre a importância da abordagem de conhecimentos de FMC. Nesse sentido, este trabalho objetivou apresentar a correlação de diversos conceitos da

Óptica, Ondulatória e Mecânica Quântica que possibilitam compreender os aspectos da pesquisa desenvolvida por Strickland e Mourou. Assim, a abordagem da temática *laser*, em específico, por ser um assunto que naturalmente desperta a curiosidade dos discentes por estar vinculada em histórias de ficção científica, mas também em aplicações reais e relevantes como na Medicina, promove que os alunos e as alunas reconheçam aspectos epistemológicos sobre a ciência, além de compreenderem as intrincadas relações entre ciência e tecnologia.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, F. B. *Laser: princípios básicos e uma proposta de atividade experimental para o ensino de Física*. 2016. 44 f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Física) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2016.

ANDRADE, R. O. **O físico que olhava as luzes**. 2019. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/2019/06/07/o-fisico-que-olhava-as-luzes/>>. Acesso em: 30 nov. 2019.

ASHKIN, A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure. **Physical Review Letters**, v. 24, n. 4, 1970.

_____. Forces of a single-beam gradient *laser* trap on a dielectric sphere in the ray optics regime. **Biophys**. v. 61, n. 2, p. 569-582, 1992.

ASHKIN, A.; DZIEDZIC, J. M. Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria. **Science**, v. 235, n. 4795, p. 1517-1520, 1987.

BAGNATO, V. S. Os fundamentos da luz *laser*. **Física na Escola**, v. 2, n. 2, p. 4-9, 2001.
BARTHEM, R. **Temas atuais de física**. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

BRASIL. **Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+)**. Ciências da Natureza e Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC, 2006.

CAVALCANTE, M. A.; JARDIM, V.; BARROS, J. A. d. A. Inserção de Física Moderna no Ensino Médio: Difração de um Feixe *Laser*. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 16, n. 2, p. 154-169, 1999.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R.C.; GUIMARÃES, D. Construção de equipamentos didáticos para o estudo da polarização intrínseca do LASER. In: **Simpósio Nacional de Ensino de Física**, 16., 2005, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

CBC NEWS. **Canadian physicist Donna Strickland collects Nobel Prize**. Disponível em: <<https://www.cbc.ca/news/canada/kitchener-waterloo/donna-strickland-nobel-prize-physics-1.4939928>>. Acesso em: 30 nov. 2019.

CHASSOT, A. A ciência é masculina? É, sim senhora!... **Revista Contexto e Educação**, v. 19, n. 71, p. 9-28, 2004.

_____. **A ciência é masculina? É, sim senhora!** 9. ed. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2019.

CHO, A. Trio earns physics Nobel for turning *lasers* into tools. **Science**, v. 362, n. 6410, 2018.

CORDEIRO, M. R. Mulheres na Física: um pouco de história. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 3, p. 669-672, 2017.

DIAMOND, M. L. **Nobel Prize: Rumson's Arthur Ashkin oldest to win physics prize for Bell Labs laser work**. 2018. Disponível em: <https://www.app.com/story/money/business/innovators/2018/10/02/nobel-prize-rumson-man-wins-physics-prize-bell-labs-laser-work/1498877002/> . Acesso em: 30 nov. 2019.

DIONISIO, P. H. Será a luz de um *laser* necessariamente polarizada, completamente coerente e rigorosamente monocromática. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.10, n. 1, p. 53-58, 1993.

EINSTEIN, A. The Quantum Theory of Radiation. **Physikalische Zeitschrift**, v. 18, n. 121, 1917.

FAPESP. Luz no interior da célula viva. **Revista Pesquisa Fapesp**, v. 58, 2000.

FÁVERO, F. C. Geração de pulsos de picossegundos em *laser* de fibra óptica e aplicação na determinação do índice de refração não-linear da água. 2007. **Dissertação** (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

FREIRE, A. P. IPEN estuda a utilização de *lasers* de alta intensidade como complemento a terapias de combate ao câncer. **Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**, v. 15, n. 99, 2018.

GALAUP, J. P. Nobel Prize in Physics 2018 Awarded “For Groundbreaking Inventions in the Field of *Laser* Physics”. **Revista Cubana de Física**, v. 35, n. 121, 2018.

GIL-PÉREZ, D. *et al.*. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.

GOSWAMI, D. Nobel Prize in Physics – 2018. **Resonance**, v. 23, n. 12, 2018.

GROSS, A. J.; HERRMANN, T. R. W. History of *lasers*. **World J Urol**, v. 25, n. 3, 2007.

HAKIME, R. O. Transposição didática da interação do *laser* com sistemas biológicos no ensino médio: uma proposta de guia didático para professores. 2015. **Dissertação** (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

HOROWICZ, R. J. **Luz, cores... ação**. São Paulo: Moderna, 1999.

KAMINSKY, S. K. Aparelhos de *laser* e equipamentos correlatos. **Revista Brasileira de Medicina**, v. 66, p. 20-32, 2009.

KOREN, M. **One Wikipedia Page Is a Metaphor for the Nobel Prize's Record With Women**. 2018. Disponível em: <<https://www.theatlantic.com/science/archive/2018/10/nobel-prize-physics-donna-strickland-gerard-mourou-arthur-ashkin/571909>>. Acesso em: 24 abr. 2019.

KUMAR, G. R. The 2018 Nobel Prize in Physics: A gripping and extremely exciting tale of light. **Current Science**, v. 115, n.10, 2018.

LEE, B. Optical Scientists Receive the 2018 Nobel Prize in Physics. **Physics Focus**, v. 28, n. 6, 2018.

LIMA, I. P. C. Lise Meitner e a fissão nuclear: uma visão não eurocêntrica da ciência. **Revista Gênero**, v. 16, n. 1, p. 51-65, 2015.

MAIMAN, T. H. *et al.*. Stimulated Optical Emission in Fluorescent Solids. **Physical Review**, v. 123, n. 4, 1961.

MAINE, P. *et al.*. Generation of Ultrahigh Peak Power Pulses by Chirped Pulse Amplification. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, v. 24, n. 2, 1988.

MOREIRA, M. A. O que é afinal aprendizagem significativa. **Revista Currículo**, v. 25, 2012.

_____. Unidades de Ensino Potencialmente Significativas – UEPS. **Aprendizagem Significativa em Revista**, v. 1, n. 2, p. 43-63, 2011.

NASCIMENTO, T. G.; ALVETTI, M. A. S. Temas científicos contemporâneos no ensino de biologia e física. **Ciências & Ensino**, v. 1, n. 1, p. 29-39, 2006.

NEVES, A. A. R. Força óptica em pinças ópticas: estudo teórico e experimental. 2006. 191 f. **Tese** (Doutorado em Física) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

NOBEL PRIZE. **Groundbreaking Inventions in Laser Physics**. 2018. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/uploads/2018/10/advanced-physicsprize2018.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2019.

OLIVEIRA, A. R. Geração de segundo harmônico sintonizável por modulação de pulsos de *laser* ultracurtos. 2012. 110 f. **Dissertação** (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

ORZEL, C. Nobel Prize In Physics 2018: **How To Make Ultra-Intense Ultra-Short Laser Pulses**. 2018. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/chadorzel/2018/10/02/nobel-prize-in-physics-2018-how-to-make-ultra-intense-ultra-short-laser-pulses>>. Acesso em: 24 abr. 2019.

OSTERMANN, F. Tópicos de física contemporânea em escolas de nível médio e na formação de professores de Física. 1999. 162f. **Tese** (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 5, n. 1, p. 23-48, 2000.

PISANTY, E. **What is Chirped Pulse Amplification, and why is it important enough to warrant a Nobel Prize**. 2018. Disponível em: <https://physics.stackexchange.com/questions/432137/what-is-chirped-pulse-amplification-and-why-is-it-important-enough-to-warrant-a>. Acesso em: 22 nov. 2019.

REZENDE JUNIOR, M. F.; SOUZA CRUZ, F. F. Física Moderna e Contemporânea na formação de licenciandos em física: necessidades, conflitos e perspectivas. **Ciência & Educação**, v. 15, n. 2, p. 305-321, 2009.

ROCHA, M. S. Pinças ópticas: experimento e teoria. 2004. 99 f. **Dissertação** (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

_____. Pinças ópticas: experimento, teoria e aplicação no estudo da interação DNA-fármacos. 2008. 226 f. **Tese** (Doutorado em Física) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

RODRIGUES, D. S. A Física do *Laser*. 2007. 36 f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Física) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

SANTANA, W. A. L.; FREIRE JÚNIOR, O. Contribuição do físico brasileiro Sergio Porto para as aplicações do *laser* e sua introdução no Brasil. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, n. 3, 2010.

SCHAWLOW, A. L.; TOWNES, C. H. Infrared and Optical Masers. **Physical Review**, v. 112, n. 6, 1958.

SCHIEBINGER, L. Mais mulheres na ciência: questões de conhecimento. **História, Ciências, Saúde**, v. 15, supl., p. 269-281, 2008.

SHEN, Y. *et al.*. Gain-phase modulation in chirped-pulse amplification. **Physical Review A**, v. 96 n. 043851, 2017.

SCHITTLER, D. *Laser* de rubi: uma abordagem em unidades de ensino potencialmente significativas (UEPS). 2015. 181 f. **Tese** (Doutorado em Ensino de Física) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SILVA NETO, C. P.; FREIRE JUNIOR, O. Um Presente de Apolo: *lasers*, história e aplicações. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 1, 2017.

SILVA, C. **Radiação Laser**. 2009. Disponível em: <http://w3.ualg.pt/~cmsilva/ensino.htm>. Acesso em: 24 abr. 2019.

STRICKLAND, D.; CORKUM, P. Short pulse self-focusing. **SPIE**, v. 1413, 1991.

STRICKLAND, D.; MOUROU, G. Compression of amplified chirped optical pulses. **Optics Communications**, v. 56, n. 3, 1985.

TEIXEIRA, R. R. P; COSTA, P. Z. Impressões de estudantes universitários sobre a presença das mulheres na ciência. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, v.10, n. 2, p. 1-18, 2008.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da Física Moderna e Contemporânea no ensino de Física na escola de 2º grau. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 9, n. 3, p. 209-214, 1992.

VAIANO, B. **Cientistas criam laser similar ao da Estrela da Morte**. 2017. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/ciencia/cientistas-criam-laser-similar-ao-da-estrela-da-morte>>. Acesso em: 24 abr. 2019.

VALADARES, E. C.; MOREIRA, A. M. Ensinando Física Moderna no Ensino Médio: Efeito Fotoelétrico, *Laser* e Emissão de Corpo Negro. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.15, n. 3, p. 359-372, 1998.

VALADARES, E. C. **Física mais que divertida: inventos eletrizantes baseados em materiais reciclados e de baixo custo**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012.

VALICH, L. **Chirped-pulse amplification: 5 applications for a Nobel Prize-winning invention**. 2018. Disponível em: <<https://www.rochester.edu/newscenter/what-is-chirped-pulse-amplification-nobel-prize-341072/>>. Acesso em: 22 nov. 2019.

WILSON, M. Half of Nobel Prize in Physics honors the inventors of chirped pulse amplification. **Physics Today**, v. 71, n. 12, 2018.

ZAGUETTO, A. P.; VENANCIO, T. Os percalços do Nobel: deslizos e polêmicas do grande prêmio. **ComCiência**, n. 164, 2014.

5.3 Impressões dos Artigos e das Propostas Didáticas

Pelo fato das propostas não serem até o momento implementadas se considerou relevante elaborar uma análise livre dos materiais redigidos. Apesar das dificuldades quanto à redação conceitual dos conhecimentos desenvolvidos pelas cientistas, por se tratarem de conhecimentos de vanguarda, acredita-se que os materiais foram redigidos adequadamente conforme os pressupostos da epistemologia de Feyerabend, além das propostas didáticas conseguirem articular, de maneira geral, os elementos educacionais e metodológicos. Em específico, acredita-se que os resultados apresentados nos artigos demonstraram a possibilidade de desenvolvimento de propostas que exemplifiquem a abordagem de conhecimentos de Física Moderna e Contemporânea, ao possibilitarem uma formação discente que promova a capacidade de compreensão de sua realidade, “a satisfação da curiosidade natural inerente ao ser humano, que o impulsiona na busca do conhecimento” (TERRAZZAN, 1992, p. 213).

Nesse sentido, procurou-se desenvolver propostas didáticas cujas estratégias resultassem em um material de aprendizagem potencialmente significativo, possibilitando que os discentes pudessem se posicionar de maneira reflexiva sobre a ciência. Além disso, ao se evidenciar os conhecimentos da física necessários para o entendimento dos conhecimentos desenvolvidos pelas cientistas, acredita-se que os artigos não recaíram no equívoco de marginalizar a ciência, aspecto que fora observado por Moreira (2004):

Há pesquisas em “educação em ciências” nas quais o conteúdo científico é irrelevante. A educação em ciências é um campo interdisciplinar de estudos. Como tal, as pesquisas nesse campo implicam, necessariamente, contribuições de diversas áreas de conhecimento, mas daí a deixar fora a própria ciência parece-me uma descaracterização da área, uma fragilidade séria (p. 9).

Também, os resultados dos artigos demonstram a validade da utilização de exemplos de mulheres cientistas como motivador que possibilita uma aproximação da ciência com a realidade dos alunos. Entretanto, embora as propostas apresentem um enfoque ao estudo de determinadas cientistas, é perceptível que as discussões históricas apresentadas nos artigos procuram não simplificar o processo científico como resultado do esforço de cientistas isolados; mas, diferentemente disso, considera as cientistas imersas em um determinado contexto sócio histórico, além das possíveis influências vivenciadas por elas no desenvolvimento das suas pesquisas, como especialmente a cooperação com outros cientistas. De fato, “desconstruir esta imagem mítica de ciência, mostrando sua pluralidade e

humanidade, pode criar laços dos estudantes com o empreendimento científico” (DAMASIO; PEDUZZI, 2015, p. 8).

Além de possibilitar compreender a ciência como uma construção multifacetária, a epistemologia de Paul Feyerabend se mostrou relevante durante a construção da narrativa histórica presente nos artigos, de maneira a se construir uma descrição histórica que considerasse os problemas de pesquisa vivenciados pelas cientistas, além de elencar os devidos contextos históricos vivenciados por elas. Embora a apresentação histórica certamente não se encerre nos pontos expostos, acredita-se que, em certo aspecto, os artigos puderam retratar a construção dos conhecimentos sob diferentes maneiras, ao considerar que

A História da Ciência não consiste apenas de fatos e de conclusões retiradas dos fatos. Contêm, a par disso, ideias, interpretações de fatos, problemas criados por interpretações conflitantes, erros, e assim por diante. [...] Se assim é, a História da Ciência será tão complexa, caótica, permeada de enganos e diversificada quanto o sejam as ideias que encerra; e essas ideias, por sua vez, serão tão caóticas permeadas de enganos e diversificadas quanto as mentes dos que as inventaram (FEYERABEND, 1977, p. 20).

Ainda falando sobre a abordagem de aspectos históricos, é importante ressaltar a atenção necessária quanto à discussão de aspectos sobre a história de mulheres cientistas, no que diz respeito à redação de biografias de mulheres. O argumento de que somente poucas se desenvolvem no mundo científico, às vezes disseminado de maneira implícita por muitos discursos da educação científica (ARTHURY, 2010), perpetua ainda mais uma percepção de uma ciência para pessoas especialmente dotadas. Assim “é essencial, no entanto, que não se caia na armadilha de, tratando tais mulheres como geniais, pintá-las como exceções que confirmam a regra: a de que apenas mulheres muito especiais podem empreender a atividade científica” (CORDEIRO; PEDUZZI, 2014, p. 558-559).

Além disso, intencionando não somente se contemplar as pesquisas dessas personagens, considera-se importante se apresentar elementos relativos a essas cientistas como “os percalços existentes na sua trajetória, a conquista do espaço acadêmico, os prêmios que por ventura tenha conquistado” (LIMA, 2015, p. 54). Utilizando os exemplos das cientistas, desde o fato de Strickland não ser reconhecida em uma página da Wikipédia até o dia da sua láurea e de vivenciar obstáculos na sua ascensão científica e, por Goeppert-Mayer trabalhar anos em uma posição voluntária e vivenciar as dificuldades em conciliar a maternidade com a vida científica, constituem situações que visam fazer com os alunos possam construir a consciência da necessidade de mudança dessa realidade. Assim, os resultados deste trabalho procuraram mencionar alguns dos embargos vivenciados pelas cientistas até a conquista das suas láureas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das evidências que apontam a ausência de pesquisas em educação em ciências que promovam uma abordagem sobre exemplos de mulheres cientistas (LIMA, 2015; CORDEIRO, 2016), este trabalho objetivou responder ao seguinte questionamento: “*É possível desenvolver ações no contexto de ensino de ciências que possibilitem os meninos, mas especialmente as meninas, construírem uma visão científica com mais pluralidade para que possam se reconhecer como possíveis atuantes no meio científico?*”. De maneira a responder a essa pergunta, se sugeriu desenvolver textos instrucionais e propostas didáticas que utilizem exemplos de mulheres cientistas como motivador para o ensino de Física, possibilitando discutir uma concepção científica baseada na representatividade e na pluralidade de pessoas.

Este trabalho pôde atender aos anseios do supracitado questionamento, considerando que, como resultado, se apresentou materiais que possivelmente poderão contribuir com o desenvolvimento de uma visão científica como um empreendimento constituído com base na representatividade por meio da ação docente. Em ambos os artigos, procurou-se elaborar uma articulação dos conhecimentos específicos das cientistas com os conhecimentos mais gerais do campo da Física: no artigo sobre Donna Strickland, se propôs abordar seus conhecimentos vinculados com aspectos da física dos *lasers*; enquanto o artigo sobre Maria Goeppert-Mayer objetivou articular seus conceitos com aspectos da física nuclear. Embora o destaque dos artigos se constituísse em evidenciar a física desenvolvida por essas cientistas, essas propostas igualmente abrem precedentes que respondem diretamente ao problema de pesquisa, em relação à discussão de aspectos sobre ciência, no que diz respeito ao reconhecimento de homens e mulheres no desenvolvimento científico (CARVALHO; CASAGRANDE, 2011).

Cabe ressaltar que o desenvolvimento dos artigos científicos com as propostas didáticas só seria possível à luz de aportes teórico-educacionais, metodológicos e epistemológicos que fossem articulados. Nesse sentido, acredita-se que a utilização dos aportes da Teoria da Aprendizagem Significativa Crítica (TASC), Filosofia da Ciência de Paul Feyerabend e das Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS), que se apresentam como complementares (DAMASIO; PEDUZZI, 2015), possibilitaram a redação da descrição histórica dos conceitos físicos conforme pressupostos da moderna Filosofia da Ciência, que considera, essencialmente, a ciência como um construto coletivo e multifacetário; além do fato da TASC e das UEPS possibilitarem, em termos pedagógicos, o

desenvolvimento de propostas didáticas cujas atividades consideram o conhecimento dos aprendizes sobre física dos *lasers* e física nuclear.

Da mesma forma, a revisão bibliográfica reitera o ineditismo das propostas desenvolvidas, ao considerar a ausência de trabalhos em educação em ciências que abordem especificamente as contribuições das cientistas Maria Goeppert-Mayer e Donna Strickland no contexto da educação científica, embora já exista um consenso nas pesquisas em educação em ciências quanto à necessidade de discussão sobre o protagonismo das mulheres na ciência. Em relação às temáticas específicas da Física, embora sejam relacionadas a questões tecnológicas e cotidianas, percebe-se que poucos trabalhos foram apresentados nos periódicos científicos analisados em um período de dez anos; o que reitera a necessidade de produção de propostas didáticas, mas também de relatos de experiências sobre a abordagem destas temáticas na educação científica.

Apesar de possíveis objeções e questionamentos quanto à possibilidade da abordagem sobre os conhecimentos desenvolvidos pelas cientistas no contexto de ensino de Física, sua articulação com conhecimentos já consolidados em propostas didáticas podem servir como materiais instrucionais que possam ajudar na ação docente. Além disso, acredita-se que, embora as propostas possam ser extensas, elas podem abrir margem para adaptação perante realidades escolares diferentes. Menciona-se isso por experiência própria, já que a autora abordou a temática física dos *lasers* durante um dos estágios curriculares realizado em uma escola da rede estadual da cidade de Sombrio (SC) e, durante o planejamento das regências, se necessitou efetuar modificações em alguns momentos presentes na UEPS, além de se inserir, por exemplo, conceitos clássicos de reflexão e refração da luz. Sobre as experiências da implementação da proposta, se considera relevante destacar o reconhecimento dos alunos frente às discussões acerca da presença das mulheres na ciência; em uma das aulas nas quais foram desenvolvidas essas discussões, uma das alunas comentou a necessidade de se inserir, durante as explicações conceituais, os personagens que construíram os conhecimentos, sejam homens ou mulheres.

Dada à relativa complexidade dos conhecimentos desenvolvidos pelas cientistas, se vislumbra a possibilidade de se desenvolver ações para que esses conhecimentos sejam mais acessíveis aos professores de ciências e de física; essa é inclusive uma das razões pelas quais se objetivou desenvolver o trabalho no formato de artigos científicos, pois, caso sejam publicados em periódicos científicos de ensino de Física, podem ajudar professores e professoras no desenvolvimento de práticas educativas mais contextualizadas. Todavia, perspectivas futuras também se inserem quanto à implementação dessas propostas no contexto

formal de ensino ou mesmo em ações de formação continuada de professores da educação básica e científica. Cabe ressaltar que durante a produção desse trabalho, fora possível desenvolver um momento de formação de professores da rede estadual da região de Araranguá, sobre a temática física dos *lasers*.

Dessa forma, entende-se que o objetivo principal do trabalho fora atendido: construir materiais instrucionais e propostas didáticas que possam ajudar professores e professoras a inserir elementos de física dos *lasers* e da física nuclear em suas aulas, além de propiciar discussões *sobre* ciências relativas à presença de mulheres no desenvolvimento científico, de maneira a desconstruir a concepção elitista e machista de ciência que ainda se demonstra presente no contexto de educação científica. Também, espera-se que propostas similares possam ser desenvolvidas e relatos de experiências sejam redigidos, evidenciando personagens e/ou grupos de cientistas, em especial mulheres, que promoveram contribuições importantes à ciência, de maneira a contrapor o desconhecimento dos discentes sobre cientistas.

REFERÊNCIAS

ADABO, G.; QUITÉRIO, J. Cientistas e escritoras no Nobel: perfil de um tabu. **ComCiência**, n. 164, p. 1-5, 2014.

AGRELLO, D. A.; GARG, R. Mulheres na física: poder e preconceito nos países em desenvolvimento. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 1, 2009.

ALVES, V.; ALVES, E. Móviles atômicos: uma percepção atômica através dos filtros dos sonhos. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 12, n. 6, p. 109-120, 2017.

ANDRADE, D. X.; GENOVESE, C. L. C. R.; GENOVESE, L. G. R. A controvérsia entre o blu-ray e o HD-DVD em aulas de física na perspectiva da Social Construction of Technology (SCOT). **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 12, n. 2, p. 1-23, 2017.

ARTHURY, L. H. M. **A cosmologia moderna à luz dos elementos da epistemologia de Lakatos**. 133 f. Dissertação (Mestrado em Educação Científica e Tecnológica) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

BOFF, C. A.; BASTOS, R. O.; MELQUIADES, F. L. Práticas experimentais no ensino de física nuclear utilizando material de baixo custo. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 1, p. 236-247, 2017.

BRUGLIATO, E. T.; ALMEIDA, M. J. P. M. Leitura e mediação em aulas de Física do Ensino Médio: um estudo sobre o Experimento de Rutherford. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 12, n. 5, p. 223-241, 2017.

BRUNELLI, S. C. H.; DAMASIO, F.; RAÍCIK, A. C. A física premiada: Márcia Barbosa, a água e a sala de aula. **Física na Escola**, v. 15, n. 2, p. 40-46, 2017.

CARVALHO, M. G.; CASAGRANDE, L. S. Mulheres e ciência: desafios e conquistas. **Revista Interthesis**, v. 8, n. 2, p. 20-35, 2011.

CHARYTON, C. *et al.* Gender and science: women Nobel laureates. **Journal of Creative Behavior**, v. 45, n. 3, p. 203-214, 2011.

CHASSOT, A. **A ciência é masculina? É, sim senhora!** 9. ed. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2019.

CORDEIRO, M. D. Ciência e valores na história da fissão nuclear. 2016. 230 f. **Tese** (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

_____. Mulheres na Física: um pouco de história. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 3, p. 669-672, 2017.

CUNHA, M. B. *et al.* As mulheres na ciência: o interesse das estudantes brasileiras pela carreira científica. **Educación Química**, v. 25, n. 4, p. 407-417, 2014.

DAMASIO, F. História da Ciência na educação científica: uma abordagem epistemológica de Paul Feyerabend procurando promover a aprendizagem significativa crítica. 2017, 400 f. **Tese** (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

DAMASIO, F.; PEDUZZI, L. O. Q. A coerência e complementaridade entre a epistemologia de Paul Feyerabend e a Teoria da Aprendizagem Significativa Crítica no ensino de História da Ciência. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 20, n. 3, 2015.

_____. A formação continuada de professores para um ensino subversivo visando uma aprendizagem significativa crítica por meio da história e Filosofia da Ciência sob o viés relativista: um estudo de caso. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 12, n. 5, p. 47-67, 2017.

FEYERABEND, P. **Contra o método**. Rio de Janeiro: Livraria Francisco Alves Editora, 1977.

FIÚZA, A. L. C. *et al.* Difusão de tecnologia e sexismo nas Ciências Agrárias. **Ciência Rural**, v. 39, n. 9, p. 2614-2620, 2009.

GARRETT, L. **The trouble with girls: obstacles to women's success in medicine and research**. 2018. Disponível em: <<https://www.bmj.com/content/363/bmj.k5232>>. Acesso em: 09 jun. 2019.

GIL-PÉREZ, D. *et al.* Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.

HAYASKI, M. C. P. I. *et al.* Indicadores da participação feminina em Ciência e Tecnologia. **Transformação**, v. 19, n. 2, p. 169-187, 2007.

HEERDT, B.; BATISTA, I. d. L. Questões de gênero e da natureza da ciência na formação docente. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 21, n. 2, p. 30-51, 2016.

JORGE, L. Na formação de professores e cientistas, uma HQ sobre aspectos da NDC e imagens: encantar-se com os entre-(en)laces. 2018. 335 p. **Dissertação** (Mestrado em Educação Científica e Tecnológica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

LIMA, I. P. C. Lise Meitner e a fissão nuclear: uma visão não eurocêntrica da ciência. **Revista Gênero**, v. 16, n. 1, p. 51-65, 2015.

LUCENA, M. P. C. Principais obstáculos à inserção da História da Ciência e da Filosofia da Ciência no ensino de Física no contexto da educação básica. 2019. 94 f. **Dissertação** (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

MATTHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995.

MENEZES, D. P. *et al.* A Física da UFSC em números: evasão e gênero. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 35, n. 1, p. 324-336, 2018.

MIZRAHI, S. S. Mulheres na Física: Lise Meitner. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 4, p. 491-493, 2006.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa subversiva. **Série-Estudos**, n. 21, p. 15-32, 2006.

_____. Pesquisa básica em educação em ciências: uma visão pessoal. **Revista Chilena de Educación Científica**, v. 3, n. 1, p. 10-17, 2004.

_____. **Teorias de aprendizagem**. São Paulo: EDU, 1999.

_____. Unidades de Ensino Potencialmente Significativas – UEPS. **Aprendizagem Significativa em Revista**, v. 1, n. 2, p. 43-63, 2011.

MOREIRA, M. A.; MASINI, E. F. S. **Aprendizagem significativa**: a teoria de David Ausubel. São Paulo: Centauro, 2001.

MOREIRA, M. A.; MASSONI, N. T.; OSTERMANN, F. “História e epistemologia da física” na licenciatura em física: uma disciplina que busca mudar concepções dos alunos sobre a natureza da ciência. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, p. 127-134, 2007.

NOBEL PRIZE. **The Nobel Prize in Physics**. 2019. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics>>. Acesso em: 12 nov. 2019.

PARENTE, F. A. G.; SANTOS, A. C. F.; TORT, A. C. O átomo de Bohr no ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 1, 2014.

PIOVESAN, V. H. B.; SANTOS, L. R. **Reflexões acerca do ensino das ciências à luz de Feyerabend**. Salão do Conhecimento, 2017. Disponível em: <<https://publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/7750>>. Acesso em: 09 jul. 2019.

REGNER, A. C. K. P. Feyerabend e o pluralismo metodológico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 13, n. 3, p. 231-247, 1996.

RIBEIRO, M. T. D.; GONÇALVES, T. V. O. O ensino de modelos atômicos na educação básica: os saberes da docência em questão. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 13, n. 4, p. 144-159, 2018.

SCHAPPO, M. G. Um modelo concreto para o estudo da estabilidade nuclear no Ensino Médio. **Física na Escola**, v. 11, n. 2, p. 22-26, 2010.

SCHIEBINGER, L. Mais mulheres na ciência: questões de conhecimento. **História, Ciências e Saúde**, v. 15, supl., p. 269-281, 2008.

SILVA NETO, C. P.; FREIRE JUNIOR, O. Um Presente de Apolo: lasers, história e aplicações. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 1, 2017.

SILVA, F. F.; RIBEIRO, P. R. C. Trajetórias de mulheres na ciência: “ser cientista” e “ser mulher” **Ciências & Educação**, v. 20, n. 2, p. 449-466, 2014.

SILVA, G. S. *et al.* Oficina temática: uma proposta metodológica para o ensino do modelo atômico de Bohr. **Ciências & Educação**, v. 20, n. 2, p. 481-495, 2014.

TEIXEIRA, E. S. Argumentação e abordagem conceitual no ensino de Física. 2010. 148f. **Tese** (Doutorado em Ensino, Filosofia e História das Ciências) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

TEIXEIRA, R. R. P.; COSTA, P. Z. Impressões de estudantes universitários sobre a presença das mulheres na ciência. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, v.10, n. 2, p. 1-18, 2008.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da Física Moderna e Contemporânea no ensino de Física na escola de 2º grau. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 9, n. 3, p. 209-214, 1992.

TOLEDO, R. S. *et al.* Haciendo hologramas em la escuela y em la casa. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, n. 3, 2010.

VICENTINI, A. *et al.* Instrumentação para o ensino de Física moderna e sua inserção em escolas de ensino médio – relato de experiência. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 6, n. 3, p. 38-44, 2011.

ZAGUETTO, A. P.; VENANCIO, T. **Os percalços do Nobel**: deslizes e polêmicas do grande prêmio. **ComCiência**, n. 164, 2014.