

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS REITOR JOÃO DAVID FERREIRA LIMA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
LICENCIATURA EM FÍSICA

Luis Fernando de Paula Medaglia Filho

A Física Nuclear no Brasil:
Reflexões para o Ensino de Física na perspectiva do PLACTS

Florianópolis - SC

2024

Luis Fernando de Paula Medaglia Filho

A Física Nuclear no Brasil:
Reflexões para o Ensino de Física na perspectiva do PLACTS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Licenciatura em Física do Campus Reitor João David Ferreira Lima da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. André Ary Leonei

Florianópolis - SC

2024

Medaglia Filho, Luis Fernando de Paula

A Física Nuclear no Brasil : Reflexões para o Ensino de Física na perspectiva do PLACTS / Luis Fernando de Paula Medaglia Filho ; orientador, André Ary Leonel, 2024.

72 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Graduação em Física, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Física. 2. Ensino de Física. 3. Física Nuclear. 4. Física Moderna e Contemporânea. 5. PLACTS. I. Leonel, André Ary. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Física. III. Título.

Luis Fernando de Paula Medaglia Filho

A Física Nuclear no Brasil:
Reflexões para abordar a temática na perspectiva do PLACTS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de licenciado e aprovado em sua forma final pelo Curso Licenciatura em Física.

Florianópolis, 02 de agosto de 2024.

Insira neste espaço
a assinatura

Coordenação do Curso

Banca examinadora

Insira neste espaço
a assinatura

Prof. André Ary Leonel, Dr.
Orientador

Insira neste espaço
a assinatura

Profa. Roseline Beatriz Strieder , Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Insira neste espaço
a assinatura

Profa. Andressa Melo Jacques, Ma.
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2024.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a minha família, pelo apoio e suporte em diversos momentos difíceis neste longo processo. Também agradeço aos meus professores, pelo conhecimento transmitido, pelos valores promovidos e também pelo amor à universidade pública e à pesquisa científica brasileira. Em especial agradeço ao meu orientador pelo incentivo e pela paciência durante o processo. E aos amigos por todo o apoio. Institucionalmente, agradeço à A Pró-Reitoria de Permanência e Assuntos Estudantis (PRAE) da UFSC, CAPES e o CNPq pelos programas que custearam a minha formação.

RESUMO

O presente trabalho intenciona explorar elementos teóricos e práticos da *Física Nuclear*, tendo como objetivo fornecer uma base teórica com reflexões direcionadas ao professor que pretende abordar tópicos de *Física Moderna e Contemporânea* no ensino médio e que esteja comprometido com uma formação emancipatória. Nesse sentido, considera-se a questão energética e as usinas nucleares como tema central, instigando uma abordagem contextualizada que contemple uma educação emancipadora e comprometida com as demandas locais dos estudantes brasileiros. A escolha do tema se justifica dado o potencial nuclear brasileiro, as demandas energéticas do século XXI e a relevância da pesquisa nuclear no Brasil. Para dar subsídios, buscamos trabalhos sobre o tema, em especial trabalhos com enfoque CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade), sensíveis ao contexto regional e na educação emancipatória freiriana. Buscamos adotar referenciais teóricos críticos e coerentes com as demandas regionais acerca do desenvolvimento econômico e científico-técnico, para isso nos orientamos pelo Pensamento Latino-Americano em Ciência Tecnologia e Sociedade (PLACTS), balizado pelas ideias de Freire e pela tese centro-periferia. Como resultado trazemos algumas reflexões que podem contribuir com o ensino da Física Nuclear no território brasileiro.

Palavras-chave: Ensino de Física, Física Moderna e Contemporânea; Física Nuclear; CTS; PLACTS.

ABSTRACT

The present work aims to explore theoretical and practical elements of Nuclear Physics, aiming to provide theoretical basis and reflections to teachers who intend to address topics in Modern and Contemporary Physics in high school and who are committed to an emancipatory education. In this sense, we consider the energy issue and nuclear plants as a central theme, instigating a contextualized approach that contemplates an emancipatory education committed to the local demands of Brazilian students. The choice of theme is justified given the Brazilian nuclear potential, the energy demands of the 21st century and the relevance of nuclear research in Brazil. To support the proposal, some works were surveyed on the topic, former works with a STS (Science, Technology and Society) focus, sensitive to the regional context and in Freire's emancipatory education. We seek to adopt critical theoretical references that are coherent with regional demands on economic and scientific-technical development, for this we are guided by the Latin American Thought on Science, Technology and Society (PLACTS), guided by Freire's ideas and the center-periphery thesis. As a result, we bring some reflections for Nuclear Physics teaching in Brazilian territory.

Keywords: Physics Teaching, Modern and Contemporary Physics; Nuclear physics; STS; PLACTS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz elétrica brasileira	45
Figura 2 - Esquema de Ultracentrífugas em Cascata	57
Figura 3 - Reação em cadeia	60
Figura 4 - Esquema geral de uma central termonuclear	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABACC	Agência Brasileira-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares
ACT	Alfabetização Científico-Técnica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CANDU	Canada Deuterium Uranium
CEPAL	Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNPq	Conselho Nacional de Pesquisas
CPI	Comissão Parlamentar de Inquérito
CT	Ciência e Tecnologia
CT&I	Ciência, tecnologia e inovação
CTS	Ciência, tecnologia e sociedade
EN	Energia Nuclear
EM	Ensino Médio
EUA	Estados Unidos da América
IAEA	International Atomic Energy Agency
INB	Indústrias Nacionais do Brasil
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
FAS	Federation of American Scientists
FMC	Física Moderna e Contemporânea
FMI	Fundo Monetário Internacional
FN	Física Nuclear
MME	Ministério de Minas e Energia
MOX	Mixed Oxide Fuel
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
PCN+	Parâmetros Curriculares Nacionais
PCNEM	Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio
PNLD	Plano Nacional do Livro Didático
PIB	Produto Interno Bruto
PLACTS	Pensamento Latino-Americano em Ciência, Tecnologia e Sociedade

PNB	Programa Nuclear Brasileiro
PROSUB	Programa de Desenvolvimento de Submarinos da Marinha
PWR	Pressurized Water Reactor
SNEF	Simpósio Nacional de Ensino de Física
SIN	Sistema interligado nacional
TMD	Teoria Marxista da Dependência
UAS	Unidade de Armazenamento Complementar a Seco de Combustível
Irradiado	
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	16
2.	FUNDAMENTANDO NOSSAS REFLEXÕES.....	22
2.1	EDUCAÇÃO COMPROMETIDA COM A EMANCIPAÇÃO.....	23
2.1.1	<i>Paulo Freire e sua necessidade nos tempos atuais.....</i>	<i>27</i>
2.1.2	<i>Cidadania e democracia, valores para o ensino de Física.....</i>	<i>30</i>
2.2	TÓPICOS DE ENSINO DE FÍSICA.....	31
2.2.1	Ensino de FMC no EM.....	31
2.2.2	<i>Desafios no Ensino de FMC no Brasil.....</i>	<i>34</i>
2.2.3	<i>O movimento CTS e a ACT como objetivo de aprendizagem.....</i>	<i>36</i>
2.2.4	<i>Ensino de Física Nuclear e a abordagem CTS.....</i>	<i>38</i>
2.3	NECESSIDADES REGIONAIS.....	40
2.3.1	<i>Introdução ao PLACTS.....</i>	<i>41</i>
2.3.2	<i>Energia Nuclear e a política nacional de energia.....</i>	<i>43</i>
3.	CONHECENDO A TEMÁTICA.....	47
3.1	DESENVOLVIMENTO DA FÍSICA NUCLEAR NO BRASIL.....	48
3.1.1	<i>O programa nuclear brasileiro.....</i>	<i>49</i>
3.1.2	<i>A questão militar e a defesa.....</i>	<i>52</i>
3.2	A FÍSICA DA ENERGIA NUCLEAR: QUAIS ASPECTOS SÃO RELEVANTES PARA A EDUCAÇÃO CIDADÃ?.....	54
3.2.1	<i>O Urânio: Da mineração ao enriquecimento.....</i>	<i>56</i>
3.2.2	<i>Fissão nuclear e reação em cadeia.....</i>	<i>58</i>
3.2.3	<i>As usinas: Como o urânio enriquecido produz energia?.....</i>	<i>61</i>
3.2.4	<i>A segurança e o lixo nuclear.....</i>	<i>64</i>
4.	ENCAMINHAMENTOS FINAIS.....	67
	REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

Já é consenso que o currículo de Física há tempos é considerado ultrapassado, por professores, estudantes e pela sociedade civil (BRASIL, 2006). O currículo, muitas vezes, é organizado como uma lista de conteúdos livrescos distantes da realidade, das necessidades locais ou mesmo da produção científica atual. Mas a Física pode discutir as necessidades dos estudantes ou da comunidade que os cerca? Ou então, a disciplina de Física, tem conteúdos relevantes para a cidadania? Existem conteúdos na disciplina de Física que contribuem com uma formação cidadã crítica? Existe interesse por parte do estudante, da comunidade e da sociedade em temas de Física Moderna e Contemporânea (FMC)?

Todas essas questões que motivam o trabalho, já foram amplamente discutidas pela literatura (LEONEL, 2020; GOULART e LEONEL, 2022; MENEZES, 1980; OLIVEIRA, et. al. 2007; PENA, 2006 e, PEREIRA e OSTERMANN, 2009), e para nosso propósito, escolhemos alguns referenciais teóricos para dar resposta a essas questões (AULER e DELIZOICOV, 2015; AULER, 2018; DAGNINO 2014 e LEONEL, 2020). Dentro da perspectiva do movimento *Ciência Tecnologia e Sociedade (CTS)*, por exemplo, podemos compreender que a *Alfabetização Científica e Tecnológica (ACT)*, se materializa na capacidade de participação em um processo de decisão consciente e democrática acerca de questões complexas e multidisciplinares, em especial, sobre as questões que necessitam ponderações de caráter técnico-científico.

As necessidades regionais são discutidas pelo movimento crítico conhecido como *Pensamento Latino-Americano em Ciência, Tecnologia e Sociedade (PLACTS)*, que faz uma crítica a agenda científica na América Latina, e aponta para o fato de que no subcontinente, devido a particularidades históricas, culturais, demográficas, industriais e econômicas, a região tem demandas particulares em CTS. De forma que as políticas públicas para o desenvolvimento em ciência e tecnologia, bem como as agendas de pesquisa deveriam, em tese, estar comprometidos com o desenvolvimento econômico e social, com responsabilidade ambiental e com demandas populares. Compreendemos que esta agenda deve atender ao fortalecimento de laços regionais contra-hegemônicos, acordos de transferência tecnológica, acordos comerciais que desafiem a lógica do fluxo de

capitais da periferia para a centralidade do sistema, entre outras, estimulando o desenvolvimento regional. Assim, o PLACTS, em especial no Ensino de Física, concorda com o objetivo do movimento CTS (capacitar o cidadão para a tomada de decisões acerca de questões técnico-científicas), entretanto percebe que na América Latina, para se alcançar esse objetivo é necessário também compreender certas especificidades típicas do contexto regional e da periferia do sistema capitalista (AULER, D. e DELIZOICOV, D., 2015; e AULER, D., 2018).

No contexto da divisão internacional do trabalho, é evidente que uma formação técnico-científica atualizada é essencial para o desenvolvimento econômico, científico e tecnológico de uma determinada região. Por isso, é crucial uma formação atualizada na educação básica, bem como, metodologias que possam despertar o interesse do estudante da educação básica para áreas científico-técnicas. Portanto, defendemos que a inclusão de temas atuais de FMC tem o potencial para contribuir para a alfabetização científica de toda a sociedade e engajar estudantes para áreas de ciências exatas (LEONEL, 2020; GOULART e LEONEL, 2022; OLIVEIRA, et. al. 2007; PENA, 2006; e PEREIRA e OSTERMANN, 2009).

Por outro lado, ao falar em desenvolvimento, é importante refletir e discutir sobre a questão: Que tipo de projeto de desenvolvimento queremos? Essa pergunta, já supõe a existência de distintos rumos ao desenvolvimento técnico e científico, e para respondê-la remetemos novamente a questão regional, para formular uma nova pergunta: *“Os rumos, ou as políticas públicas em Ciência e Tecnologia (CT), que os países subdesenvolvidos devem tomar, serão os mesmos que foram tomados pelos países desenvolvidos?”*.

Uma política pública “importada” do estrangeiro, deve ser no mínimo *disfuncional*, aponta Dagnino (2014), pois ela permite a construção de alguma indústria nacional, promove a geração de certos bens de consumo, de algum valor agregado (geralmente baixo relativamente), porém não acompanha o desenvolvimento social que essa produção gerou nos países desenvolvidos, e via de regra, ignora demandas sociais historicamente silenciadas, e portanto reproduzem uma lógica de dominação.

Um dos conceitos fundamentais para a compreensão da situação econômica e as relações geopolíticas na América Latina, foi desenvolvido no contexto da

criação da Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL), lá se reuniu um grupo de economistas, que inovou o pensamento econômico, em especial, na forma de explicar a desigualdade nos processos de desenvolvimento econômico de diferentes regiões do globo, que é a *tese centro-periferia*. Esta tese se fundamenta na constatação de que há uma polarização nos fluxos de capitais, que reflete a distribuição espacial da riqueza e da produção social, gerando assim diversas mazelas e conseqüente *subdesenvolvimento* em países da periferia do sistema (PINHEIRO e SOUZA, 2018).

Apesar de que o desenvolvimento econômico não implica diretamente em desenvolvimento social ou tecnológico, acreditamos ser uma condição necessária, porém não suficiente. Além disso, a tese centro-periferia permite compreender as relações geopolíticas, estratégicas e diplomáticas de países que dependem do comércio com outras nações e não possuem poder de barganha, devido à qualidade e quantidade de suas importações e exportações. Esse conceito pode ser útil na distinção das políticas nacionais de diferentes países para a pesquisa em ciência e tecnologia. E pode contribuir para se introduzir demandas locais, em especial, ao apontar o papel da pesquisa científica nos países da periferia. Esse conceito tem potencial para contextualizar o tema da produção da energia nuclear no mundo e discutir suas implicações econômicas, políticas, militares e ambientais, bem como o elevado custo da pesquisa, a questão da segurança, sua capacidade de geração de energia limpa e seu papel na transição energética.

Podemos apontar que no Brasil, a Física Nuclear ocupa um espaço de especial interesse e que existem certos obstáculos para a pesquisa, de caráter técnico, socioambiental, estratégico e geopolítico (PATTI, 2013 e; BARROS e PEREIRA, 2010). Por isso é um tema rico, e do ponto de vista do enfoque CTS, possibilita discussões interessantes e multidisciplinares que podem estar presentes em sala de aula, sobretudo quando se almeja uma formação crítica e emancipatória.

As primeiras pesquisas nucleares no Brasil remontam à década de 30, concomitante às primeiras localizações de reservas de urânio brasileiras, e tem como palco a recém criada Universidade de São Paulo e dentre os atores, há nomes importantes como Gleb Wataghin, José Leite Lopes, Mário Schemberg, Marcelo Damy e outros, que formaram o primeiro grupo brasileiro de pesquisa em Física Nuclear.

O Brasil possui grandes reservas de recursos naturais e recursos minerais, que possuem elevado valor estratégico e econômico. Esses recursos minerais são explorados em conjunto com os Estados Unidos, por exemplo, desde o acordo de cooperação para a prospecção de minérios radioativos em 1940 (BARROS e PEREIRA, 2010).

Em 1951 o Congresso Nacional aprova a Lei nº 1.310, de 13 de fevereiro de 1951¹, que estabelece normas para o comércio exterior de minérios atômicos e funda o Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq)¹, o órgão foi formado para fomentar a pesquisa científica em geral, mas já tinha responsabilidades específicas em torno do tema da energia nuclear e da pesquisa nuclear no Brasil.¹ Em 1956 foi criado o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), isso tudo em um momento em que a pesquisa nuclear ainda era incipiente no mundo (BARROS e PEREIRA, 2010), por exemplo, foi o mesmo ano de inauguração do segundo reator comercial (para a produção de energia elétrica) construído no mundo localizado na Inglaterra, até então o único fora da União Soviética².

Segundo a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)³, o Brasil foi um dos fornecedores de minérios para projetos experimentais em outros países, como o projeto Manhattan e seguiu exportando terras raras, inclusive após escândalos de corrupção como a exportação ilegal de material atômico para os Estados Unidos, descoberto pela CPI de 1956⁴. Dentro dessa lógica, podemos compreender a exportação de produtos brutos como parte de uma economia extrativista, que coloca à disposição dos países centrais, os recursos e matérias-primas brutas dos países periféricos, transferindo recursos de baixo valor agregado reproduzindo uma lógica de dominação, que extrai riqueza da periferia, para a centralidade do sistema econômico.

¹ Brasil. Lei nº 1.310, de 13 de fevereiro de 1951. Diário Oficial da União, 14 de fevereiro de 1951. <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/l1310.htm>

² Disponível em: <<http://memoria.cnen.gov.br/memoria/Cronologia.asp?Unidade=Mundo>>. Acesso em: 07/04/2023.

³ Criada em 10 de outubro de 1956, a Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, autarquia federal vinculada, desde 1999, ao Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT, é o órgão responsável por regular as atividades nucleares no País

⁴ Disponível em: <<http://memoria.cnen.gov.br/memoria/Cronologia.asp?Unidade=Brasil>>. Acesso em: 18/01/2023.

A energia nuclear no Brasil ainda correspondia a apenas 3% da matriz energética brasileira em 2010⁵, hoje corresponde a menos de 1%⁶, e o Brasil expressa sua intenção de aumentar a produção líquida de energia nuclear através do Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050/MME - BRASIL, 2020), que prevê que um aumento de 5 vezes a potência gerada para os próximos 30 anos. Existem também ações concretas nesse sentido, como a retomada das obras de Angra 3 com previsão para conclusão em 2026, bem como o acordo assinado entre o Ministério de Minas e Energia e o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica para o estudo de localidades propícias para a construção de novas usinas nucleares e a retomada da mineração em busca desses minérios, como por exemplo, a construção da usina de beneficiamento em Santa Quitéria.

Se mostra relevante, para a formação cidadã, a introdução do Programa Nuclear Brasileiro (PNB), bem como apresentar aspectos da pesquisa brasileira, visando conscientizar da importância desses setores na pesquisa básica, nos tratamentos por radioisótopos e no seu potencial energético, bem como discutir os impactos sócio-ambientais, o diálogo com a sociedade civil e também a questão militar. Também podemos destacar a que cresce a relevância do tema, dada a crescente demanda energética em todo mundo, e em particular, a necessidade de industrialização na América Latina e no Brasil. Dessa forma, acreditamos que é um tema com caráter estratégico no contexto brasileiro, e que necessita uma abordagem interdisciplinar e com sensibilidade às questões sociais e ambientais da região.

Na seção 2.1, abordaremos os fundamentos pedagógicos e os pressupostos teóricos que orientam o trabalho. Na seção 2.2 discutimos o ensino de FMC, os objetivos da abordagem CTS e a sua relação com o tema da Energia Nuclear. A seção 2.3 se dedica a refletir sobre o contexto local, introduzindo o PLACTS e apresentando a situação atual da política energética brasileira. Apresentamos o PNB e um breve resumo da sua história na seção 3.1 e a seção 3.2 se dedica a expor ao professor leitor o ciclo completo do urânio e os processos envolvidos na usina e em

⁵Disponível em:

<<https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/brazil.aspx>> Acesso em: 20/03/2023.

⁶ Fonte: SIN/ONS. Disponível em:

<<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 28/06/2024.

cada etapa desde a mineração até a fabricação do elemento combustível. A seção 4.1 é dedicada a discutir as reflexões trazidas, procurando estabelecer um diálogo com a realidade no chão da sala de aula.

2 FUNDAMENTANDO NOSSAS REFLEXÕES

A pesquisa em Ensino de Física, aponta a necessidade do desenvolvimento de estratégias e metodologias diversificadas com potencial para o engajamento do estudante em questões científicas (OLIVEIRA, et. al. 2007; PENA, 2006; PEREIRA e OSTERMANN, 2009; MENEZES, 1980). A preocupação já sensibilizou o poder público, que expressa essa posição em documentos oficiais, (em especial os PCN+, BRASIL, 2006), bem como diversas investigações destacam a importância da formação cidadã e atualizada, no que diz respeito a metodologias e a inclusão no currículo de tópicos de FMC (LEONEL, 2020; GOULART e LEONEL, 2022; PENA, 2006; PEREIRA e OSTERMANN, 2009; OLIVEIRA et. al. 2007). Em resposta a esses questionamentos, cresce no Ensino de Ciências e, também na pesquisa em Ensino de Física, o movimento CTS cujos princípios podem para contribuir para essa formação, visando a Alfabetização Científica e Tecnológica (ACT), orientada para o exercício da cidadania, contemplando questões sócio-científicas típicas dos tempos atuais, objetivando a autonomia do estudante para a tomada de decisões frente aos problemas sociais colocados no século XXI (POLANCZKI e ARAÚJO, 2017; e SOLBES e VILCHES, 2005). As relações CTS oferecem possibilidades para contextualizar diversos temas científicos típicos do currículo tradicional.

O tópico da Física Nuclear, por outro lado, costuma causar interesse devido a sua atualidade, seus impactos sociais na história da humanidade e sua presença nos meios de comunicação e na cultura popular, além disso possibilita discutir a ciência brasileira e sua relevância no desenvolvimento social, bem como, incentiva a exploração de situações-problema que envolvam questões técnico-científicas, em sintonia com o exercício da cidadania.

O desenvolvimento científico e tecnológico traz uma série de benefícios e facilidades, os aparelhos e as tecnologias digitais hoje permeiam nosso ambiente e nossas relações sociais, mas por outro lado esse mesmo modelo de desenvolvimento possui suas consequências e custos. A conscientização por um desenvolvimento sustentável é um valor essencial para uma educação cidadã no século XXI e está presente nos documentos oficiais para a educação no Brasil (BRASIL/PNE, 2006; BRASIL/PCN+, 2001 e BRASIL/LDB 1996;). Entretanto, o mero “*desenvolvimento*” em abstrato como objetivo é questionável, em vez disso,

HERRERA (2015), DAGNINO (2014), AULER e DELIZOICOV (2015) e AULER (2018) nos convidam a pensar distintos caminhos para o desenvolvimento científico e tecnológico, ou seja, diferentes “agendas científicas” ou “agendas de pesquisa”, e propõem também, discutir quais as demandas em ciência e tecnologia, que foram historicamente silenciadas no processo de desenvolvimento científico e tecnológico latino-americano? Será que a importação de uma agenda de ciência e tecnologia, estranhas e alheias a nossa sociedade, não perpetua aspectos da dominação e da desigualdade? Antes de nos aprofundarmos nessas questões, é preciso expor reflexões que apontem a posição adotada neste trabalho sobre educação, emancipação e liberdade.

2.1 EDUCAÇÃO COMPROMETIDA COM A EMANCIPAÇÃO

A escola como espaço de educação formal corresponde a uma fase importante na vida de todos os cidadãos brasileiros, como iniciação para a vida social e com o desenvolvimento de habilidades, senso de responsabilidade, estabelecimento de valores e comportamentos. Também pela sua importância, o currículo e as práticas escolares são objetos de disputa por diferentes setores da sociedade civil. Fruto das contradições da sociedade, a instituição escolar reproduz uma série de valores culturais e formas de compreender o mundo e se relacionar (FREIRE, 2013; NIDELCOFF, 1975 e AULER, 2018). Em especial, impera nos espaços escolares uma *concepção tradicional* de educação, que compreende o processo de ensino-aprendizagem, de forma competitiva, meritocrática e quantitativa, como se aquele que “*aprendeu mais*”, é também quem “*melhor aprendeu*” e que isso ocorre porque este aluno “*mais se esforçou*”. Essa concepção não é apenas equivocada, como reproduz valores sociais típicos da sociedade capitalista, e portanto é em sua essência conservadora. Um projeto crítico a esses valores, e que seja capaz de propiciar outras vivências no espaço escolar é possível e necessário.

Em contraposição a essa pedagogia surge um movimento crítico na pedagogia, Maria Teresa Nidelcoff (1975), ao denunciar como a escola - na sua concepção tradicional - ratifica e reproduz a ideologia dominante, também nos mostra o caráter classista e elitista dessa visão de escola:

“La escuela los tratará igual a todos. Pero ellos NO SON IGUALES. Por eso, para unos será suficiente lo que la escuela les da; para otros no. Unos tirunfarán y otros fracasarán. Ese triunfo afianzará a aquellos a quienes la sociedad proveyó de medios para triunfar. Y el fracaso, en general, confirmará la postergación de los que la sociedad condicionó como inferiores. (...)

Pero seamos francos. *La sociedad no brinda, tampoco, una escuela igual a todos los niños.* (...) Esto posibilita a unos e impide a otros una serie de experiencias. Por ejemplo: medios audiovisuales, instrumentos musicales, idiomas, etc.”

(NIDELCOFF, 1975) pgs. 8 e 12.

O compromisso com a transformação social é um valor essencial para a formação cidadã, partindo da perspectiva de que existe uma ordem social injusta estabelecida, e que existe um discurso hegemônico que valida e naturaliza essa ordem injusta. Pela sua natureza, o discurso hegemônico é totalizante e inflexível, este permeia o espaço escolar, que muitas vezes o reforça e o conserva, quando não opta por um discurso contra-hegemônico.

Trevisano e Rodrigues (2021) discutem o processo de construção de um discurso hegemônico, e apontam como característica a necessidade de universalização do discurso, implicando em *apagamentos* no campo social. Para Gramsci (1971, apud Trevisano e Rodrigues, 2021), o discurso hegemônico ultrapassa as fronteiras do debate econômico e da ordem política na sociedade, dessa forma moldam toda uma forma de entender e ler o mundo. O papel do professor de ciências naturais ou do professor de física, poderia se pensar, que nada tem a ver com a ordem social estabelecida, que esses temas não lhe dizem respeito, devendo ater-se a “sua matéria”, dessa forma, ele opta pelo discurso hegemônico, pretensiosamente técnico e que esconde a ideologia nefasta a qual se fundamenta, por esse caminho, o professor se compromete com a manutenção do *status quo*, em detrimento da emancipação (Freire, 2013). Essa opção reduz o papel do professor, para apresentador de currículo, como se aqueles conteúdos do livro didático, nada tivessem a ver com a realidade daqueles sujeitos históricos ali presentes em sala de aula.

A educação emancipatória, segundo FREIRE (2013), é aquela capaz de desvelar as opressões existentes no mundo, e através do dialogismo e do desenvolvimento da autonomia no discente, objetiva promover a curiosidade ingênua à curiosidade crítica. Em oposição à concepção tecnocrata, a educação

emancipatória não visa apenas *passar a maior quantidade de informação*, mas também em *explicitar relações sociais e princípios éticos, que permitam ver o mundo de forma crítica*.

Opondo-se a concepção de *desenvolvimento linear*⁷, não acreditamos que a educação seja suficiente para acabar com as opressões, entretanto, o processo de conscientização crítica dos oprimidos, que cientes de sua condição, permite organizá-los em torno de ideais de justiça social e comprometimento com o desenvolvimento social em geral.

Mesmo que insuficiente, essa conscientização se faz cada vez mais necessária, frente ao ressurgimento de ideologias nefastas na sociedade, a ascensão do fascismo e neonazismo, bem como argumentos neomalthusianos⁸, discurso de ódio, disseminação de informações falsas (*fake news*), desinformação, movimentos de massas, revoluções coloridas⁹ e diversas formas de manipulação da opinião pública pelas classes opressoras. Uma nova educação ciente das dificuldades de nosso tempo, consciente dos impactos das novas tecnologias e comprometida com a emancipação dos povos se faz necessária.

As instituições incumbidas pela formação e produção científica, acadêmica e cultural, no que se inclui a escola, devem ter um compromisso com o desenvolvimento social e econômico, com a democracia e com o combate às desigualdades, conforme preconizam os documentos legais e a constituição federal (BRASIL, 1996; BRASIL, 2001; e BRASIL, 2006). Nesse sentido, um ensino de

⁷ Ver seção 2.3.1.

⁸ Thomas R. Malthus estudou modelos de crescimento populacional e da produtividade na agricultura e defendeu que o crescimento populacional compromete os meios de subsistência, gerando miséria humana e mazelas sociais. Em tempos modernos, o argumento ressurgiu em versões diversas: a miséria e as mazelas sociais, não mais seriam causadas pela escassez de alimentos, mas se expressariam na oferta de emprego, energia ou ainda de recursos naturais. O leitor interessado pode ler DELBEN (2013).

⁹ *Revolução colorida* é um termo utilizado na geopolítica para descrever movimentos populares análogos aos ocorridos nos países da esfera de influência na antiga URSS (revolução laranja na Ucrânia, revolução rosa na Geórgia e revolução das tulipas no Quirguistão). Esses movimentos se caracterizam por vincular demandas populares legítimas com o golpe de Estado contra líderes políticos antipáticos à política imperialista dos EUA ou da OTAN, além do financiamento de ONG's, instituições de caridade e órgãos de governos dos países centrais como o *NED (National Endowment for Democracy)*, *USAID*, *Open-Society Foundations*, *CIA* e outros. Em um sentido mais amplo, é utilizado para descrever tentativas de derrubada de governos ou mudança de regime, através de aliança entre a oposição local e setores internacionais poderosos que colaboram com financiamento, espionagem e serviço de inteligência, o termo é usado também para descrever os movimentos da *primavera árabe* no Oriente Médio e os movimentos *pró-impeachment* no Brasil, bem como tentativas frustradas como as tentativas de golpes na Venezuela, Bolívia e outros. O leitor interessado pode buscar SCHERER (2015) e CORRÊA e LUEDEMANN (2023).

ciências que se proponha crítico e emancipador, pode ousar apresentar a pesquisa científica brasileira ao cidadão, compará-la a pesquisa científica internacional e discutir sua importância do ponto de vista do impacto social, econômico e político. A pesquisa científica brasileira tem sido alvo de intensos ataques nos últimos tempos, e em geral é desconhecida da população, estranha a sua cultura e portanto politicamente vulnerável.

Com a finalidade de situar nossas reflexões para uma agenda de pesquisa regional buscamos compreender o cenário global e a posição estratégica do Brasil, então decidimos nos apoiar em um conceito do pensamento econômico cepalino, que descreve uma lógica de dominação ilustrada pela dicotomia centro-periferia (PINHEIRO, N.; e SOUZA, L., 2018). Os economistas da Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL) inauguram no pensamento econômico a ideia de que o capitalismo cria dois pólos econômicos em diferentes regiões do globo, na qual existe um fluxo de capital desigual entre essas regiões. Criticam portanto, uma concepção *etapista* e *linear* do crescimento econômico, e desenvolvem uma tese onde, não mais trata-se alguns países ditos “*subdesenvolvidos*” como *atrasados* com relação aos países centrais, mas por outro lado, compreendem que a lógica de acumulação capitalista gera desigualdade entre os países da centralidade, e os países da periferia do sistema capitalista. Descrevem a periferia do sistema como um lugar onde há um *desenvolvimento unilateral* (industrialização em poucos setores, geralmente de produtos primários) e a *heterogeneidade estrutural* (convivência de setores econômicos com diferentes graus de desenvolvimento sócio-técnico, ou seja, enquanto alguns setores da indústria estão produzindo com alta tecnologia, no mesmo espaço geográfico algum outro setor produz com a tecnologia antiquada ou “sem” tecnologias). Neste trabalho, nos limitamos a discutir o problema diagnosticado pelos economistas cepalinos, em especial na utilização da tese centro-periferia, mas não nos aprofundaremos nas limitações desta corrente desenvolvimentista, e nem nas soluções propostas que se mostraram infrutíferas, o leitor interessado pode buscar mais informações em Marini (2005) e Duarte (2021).

2.1.1 Paulo Freire e sua necessidade nos tempos atuais

Buscamos por uma orientação pedagógica consciente dos problemas apresentados e comprometida com a transformação social. Para Freire (2013; 2018) uma educação emancipadora, é aquela que promove um diálogo crítico e libertador, que pode libertar os oprimidos e também os opressores de sua situação. Esse processo só pode se dar com a *cointencionalidade* do educador e do educando, e é portanto um processo consciente de si e de seu compromisso de transformação. A educação crítica portanto desvela relações de opressão invisibilizadas pela ideologia dominante. Para Freire (2013) a *educação crítica* é oposta à educação dita *bancária*, na qual os conteúdos são meramente depositados na cabeça dos estudantes, onde a autoridade está centrada no professor que transmite esses conteúdos. Essa concepção quase puramente tecnicista e pretensiosamente “neutra”, na verdade mascara relações de opressão reais, e por isso reproduz a ideologia dominante.

A educação libertadora busca a libertação através da práxis, ou seja, através da união dialética entre teoria e prática (FREIRE, 2018). Portanto, tanto a concepção do currículo como as práticas pedagógicas devem estar em consonância com a emancipação e a formação do ser.

Essa educação luta para romper com a tradição bancária da educação e favorecer a formação da autonomia e criticidade. A autonomia se pode estimular apenas pela prática da liberdade, portanto o antagonismo educador-educando precisa ser superado, em nome do diálogo. A concepção bancária reproduz o antagonismo de classes e as relações de opressão, presentes na sociedade, dentro da sala de aula, dessa forma, o professor encarna o conhecimento formal, o acúmulo social, a técnica, a repressão e a vigilância social.

Educar para a emancipação envolve ouvir e permitir que o educando pratique a liberdade, não só, mas com os outros. A liberdade se pratica assumindo responsabilidades e tomando decisões conscientes. A liberdade sem limites é tão negada quanto a liberdade asfixiada.

A liberdade amadurece no confronto com outras liberdades, na defesa de seus direitos em face da autoridade dos pais, do professor, do Estado.

(FREIRE, 2018, p.103)

Envolve *dialogismo e cointencionalidade*. O dialogismo parte da premissa de que o educando tem algo a dizer, e por sua vez o educador também tem a aprender. O dialogismo permite ao educando se compreender no mundo, e se fazer ouvir, apenas através da prática que essa capacidade pode ser efetivamente valorizada. Mediante a prática dialógica, vários conhecimentos historicamente silenciados ganham espaço. Já a cointencionalidade, exige que educador e educando compartilhem a mesma intenção, ou seja, exige a conciliação de interesses. O educando, portanto, precisa ter o legítimo interesse em aprender, e isso só é possível através de certa conciliação.

Para Freire (2013), há características tipicamente humanas, e os seres humanos se diferem dos outros seres porque são *sujeitos históricos*, ou seja, possuem consciência de seu processo histórico, tem a capacidade de intervir no mundo e transformá-lo, entretanto, muitas vezes esse papel de humanidade é negado a certos indivíduos ou grupos, resultado da divisão presente na sociedade entre opressores e oprimidos:

A desumanização, que não se verifica, apenas, nos que têm sua humanidade roubada, mas também, ainda que de forma diferente, nos que a roubam, é distorção da vocação do *ser mais*. É distorção possível na história, mas não vocação histórica. Na verdade, se admitíssemos que a desumanização é vocação histórica dos homens, nada mais teríamos que fazer, a não ser adotar uma atitude cínica ou de total desespero. A luta pela humanização, pelo trabalho livre, pela desalienação, pela afirmação dos homens como pessoas, como “seres para si”, não teria significação. Esta somente é possível porque a desumanização, mesmo que um fato concreto na história, não é, porém, *destino dado*, mas resultado de uma “ordem” injusta que gera a violência dos opressores e esta, o *ser menos*. (FREIRE, 2013, p.40-41)

A educação crítica, comprometida com a transformação social pode evidenciar problemas e contradições reais. A prática pedagógica libertadora não nega a importância e os benefícios das novas tecnologias, entretanto evidencia as contradições inerentes a incorporação dessas tecnologias:

(...) a promoção da ingenuidade para a criticidade não se dá automaticamente, uma das tarefas precípuas da prática educativo-progressista é exatamente o desenvolvimento da curiosidade crítica, insatisfeita, indócil. Curiosidade com que podemos nos defender de “irracionalismos” decorrentes *do* ou produzidos por certo excesso de “racionalidade” de nosso tempo altamente tecnologizado. E não vai nesta consideração de quem, de um lado, não diviniza a tecnologia, mas de outro a

diaboliza. De quem a olha ou mesmo a espreita de forma criticamente curiosa.
(FREIRE, 2018, p.33-34)

Sobre o excesso de racionalidade de nossos tempos, podemos destacar o tom autoritário de argumentos pretensiosamente “puramente técnicos”, que são veiculados nos meios de comunicação, por políticos ou economistas, entidades e organizações, que promovem seus ideais como *a única opção racional*. Não raro temas científicos, que causam profundo impacto na vida das pessoas e que possuem complexidade elevada são pautados de forma simplória, muitas vezes por jornalistas, comunicadores, empresários, influenciadores, movimentos organizados e entre outros. Alguns tópicos, muitas vezes são banalizados pela opinião pública, e os veículos de comunicação reforçam ideias equivocadas que atrapalham políticas públicas e que necessitam da responsabilidade do coletivo. Poderíamos citar como exemplo mais recente o caso da pandemia de COVID, mas também como historicamente tem sido com o aquecimento global, a produção de alimentos transgênicos, o impacto das redes sociais na vida, em especial dos jovens, e em tempos ainda mais distante os malefícios do consumo excessivo de açúcar e do uso do cigarro.

Todas essas questões têm algo em comum, envolvem temas científicos, que se relacionam com o nosso estilo de vida, impactam a sociedade e a forma como nos relacionamos. Também, para cada uma dessas questões podemos elencar grupos poderosos que possuem interesses econômicos e investem em propaganda, muitas vezes com um “ar cientificista”, ou argumentos revestidos de tecnicidades a fim de provocar uma sensação de confiança, de única solução ou de solução “tecnicamente correta”.

Uma formação cidadã adequada aos problemas do século XXI, comprometida com a emancipação, deve atentar para essas questões, discutir a tecnologia de forma crítica, atentar para os interesses envolvidos nas polêmicas científicas, reconhecer autoridades científicas e fontes de informação adequadas, bem como discutir a forma como a informação circula e como os algoritmos nos filtram e fornecem informações e como promovem a desinformação.

2.1.2 Cidadania e democracia, valores para o ensino de Física

Os valores que orientam esse trabalho, bem como o desenvolvimento de princípios éticos e de uma compreensão mais profunda do mundo que nos cerca deve ser um dos objetivos fundamentais do educador em qualquer disciplina. Mas o que a componente curricular da Física tem para contribuir com a formação cidadã e comprometida com a democracia e com a justiça social?

Menezes (1980) nos lembra que nem todos os estudantes seguirão carreiras científicas ou técnicas, de forma que o Ensino de Física não deve se resumir apenas em um treino de resolução de difíceis problemas e no conhecimento de uma lista de fenômenos físicos descritos, porém sem o seu contexto social. Por outro lado, o autor argumenta que a Física traz uma série de valores científicos, e que a componente curricular da Física pode contribuir para uma formação mais ampla, e que pode dialogar com conhecimentos de história, política e economia.

Trevisano e Rodrigues (2021) argumentam que se pode produzir, no âmbito da educação científica, estratégias que humanizam a ciência, com a finalidade de propiciar uma leitura crítica do mundo, sobre temas técnico-científicos, e defendem a construção de um discurso contra-hegemônico pautado nos direitos humanos. Os autores apontam as perspectivas do uso de História e Filosofia da ciência, bem como o enfoque CTS como estratégias com grande potencial. Nesta mesma direção, Silveira e Leonel (2022) defendem que o Ensino de Física precisa superar o conteudismo, a fragmentação e a descontextualização ainda presentes em muitas práticas e enfatizam que temas relacionados a Educação em Direitos Humanos (EDH) estejam amalgamados aos conceitos/temas de Física, assumindo um compromisso com a interculturalidade, com a formação de sujeitos de direitos, com o empoderamento desses sujeitos e com o enfrentamento das violações de todo e qualquer direito humano, assumindo como premissa a transformação da realidade.

O Ensino de Física, quando pautado na formação cidadã e popular, se preocupa sobretudo, em discutir o papel da ciência na sociedade, em explicitar relações de poder na produção e no uso de CT, capacitar o discente para ponderar sobre questões técnico-científicas e fazer escolhas conscientes para atuar numa sociedade democrática permeada por CT, onde decisões sobre políticas públicas em CT e até a sua agenda de pesquisa tenha algum nível de participação popular

(AULER e DELIZOICOV, 2015; DAGNINO, 2014; LEONEL, 2020; SOLBES, 2005;SORPRESO, et. al. 2017).

Esse último objetivo é o que compreendemos como ACT, a qual objetiva a compreensão de fenômenos técnico-científicos e suas consequências para a atuação na sociedade. Para Fourez (1997 apud Leonel, 2020) a ACT: “surge como uma metáfora à alfabetização do final do século XIX. Época em que saber ler e escrever torna-se fundamental tanto para os patrões, por proporcionar mão de obra mais qualificada, quanto para os empregados, por oferecer certa emancipação. Essa expressão designa um tipo de saber, de capacidade ou de competência que, em nosso mundo técnico científico, corresponderá ao que foi a educação no século passado.”

Em um tempo onde a ciência e a tecnologia permeiam todos os aspectos da nossa vida, é fundamental para o exercício da cidadania a ACT, para que o futuro cidadão tenha a capacidade de se envolver em decisões sobre questões científico-técnicas, defender uma agenda de pesquisa em CT, compreender o impacto das *big-techs* e seus algoritmos em nossas vidas e a sua interferência no processo democrático.

2.2 TÓPICOS DE ENSINO DE FÍSICA

Depois de discutir alguns aspectos acerca dos referenciais pedagógicos adotados, e discutir valores pertinentes a esses referenciais no Ensino de Física, a seção a seguir visa introduzir conceitos e discussões a partir da literatura sobre sobre o Ensino de Física, e que tenham pertinência do ponto de vista dos referenciais adotados para esse trabalho.

2.2.1 Ensino de FMC no EM

O desenvolvimento da ciência da Física pode ser descrito em retrospectiva a partir do conceito das *revoluções científicas*, as revoluções podem ocorrer em determinadas áreas do conhecimento (subtópicos de uma determinada área), ou abalar as estruturas de toda uma ciência (KUHN, 2013). Dentre os períodos mais importantes da *História da Física*, a crise do início do século XX é sem dúvidas uma das mais relevantes, então os historiadores convencionaram dividir conceitualmente

a Física em uma “Física anterior” a esse período, ou seja, fenômenos explicáveis a partir da *Física Clássica*, capaz de explicar todos os fenômenos do dia-a-dia e (praticamente) toda a física conhecida e praticada até a segunda metade do século XIX, isto é, o *paradigma newtoniano*, o auge do *mecanicismo*, enquanto que as teorias surgidas a partir da resolução desta crise serão chamadas de *Física Moderna*, nesse momento novas ideias são introduzidas na ciência da Física, e os impactos na forma de se compreender esta ciência serão tão relevantes que justificam a divisão histórica. Nesse momento serão introduzidos conceitos como dualidade, indeterminismo e não-localidade, cresce o *instrumentalismo científico* e novas doutrinas que questionam o *paradigma mecanicista*, novas áreas de pesquisa em Física surgem como a mecânica quântica e a teoria da relatividade. Neste trabalho nos referimos a *Física Moderna e Contemporânea* (FMC) fazendo referência também, além da Física desenvolvida no século XX, também as descobertas mais recentes, os problemas atuais da ciência e seus respectivos grupos de pesquisa.

A necessidade de uma formação atualizada é fundamental para o exercício da cidadania nos tempos atuais. É comum o descontentamento com o currículo tradicional entre estudantes, professores e a sociedade civil em geral. Esse descolamento entre a importância social dos conteúdos trabalhados nas Ciências Naturais e o sentimento comum de que tais conteúdos pouco contribuem para a vida desses estudantes, é fruto dessa desatualização do ensino como indicam os PCN+ (BRASIL, 2006).

Um marco histórico nas propostas para o Ensino de FMC no EM ocorreu nas décadas de 60 e 70, no contexto da guerra fria, da disputa tecnológica e da corrida espacial. Foram promovidas campanhas nos Estados Unidos e na Europa, com o intuito de incentivar os jovens na carreira científica e promover o desenvolvimento tecnológico necessário para manter-se nessa disputa, o currículo dos cursos de ciência precisava se tornar mais atrativo no ocidente capitalista. Nesse sentido, foram desenvolvidos os *Projetos de Ensino de Física*, com a finalidade de incentivar os jovens na carreira científica, bem como para motivar os estudantes e melhorar os índices de aproveitamento na disciplina de Física. Esses projetos implementaram muitas iniciativas, como laboratórios didáticos, inserção de história da ciência, metodologias novas e também a inserção de FMC (PINHO, 2010). Esses projetos

tiveram forte influência sobre as iniciativas para o ensino de FMC no Brasil (TERRAZAN, 1999 Apud LEONEL 2020), as discussões avançaram muito desde a criação de eventos dedicados à Pesquisa em Ensino de Física e ao Ensino de Física, como por exemplo, o Simpósio Nacional de Ensino de Física - SNEF na década de 90 -, esses eventos levaram a um número crescente de publicações acadêmicas, pesquisas científicas e também iniciativas para aplicação em sala de aula, porém como sugerem as pesquisas, essas iniciativas ainda são insuficientes para uma incorporação definitiva e sólida no currículo (LEONEL, 2020; GOULART e LEONEL, 2022).

Em termos teóricos, as justificativas para o ensino de FMC no EM são inúmeras, e geralmente há boa convergência entre os autores sobre as motivações para se introduzir FMC no EM. Situação muito distinta ocorre com as metodologias propostas e os conteúdos escolhidos para se incorporar no currículo, como podemos ver na literatura. Pereira e Ostermann (2009) fazem uma revisão bibliográfica e expõem a diversidade de conteúdos e metodologias propostas até então. Terrazan (1994, apud LEONEL, 2020) separa três vertentes básicas do ensino de FMC no EM (aqui, escolhemos nos referir as concepções curriculares, fazendo referência ao país de origem dos centros de pesquisa dos autores que defendem cada abordagem):

-A “vertente espanhola” defende que os conteúdos de Física Clássica sejam tratados previamente, visando demonstrar a Física Clássica como um corpo teórico conceitual capaz de explicar a maioria dos fenômenos conhecidos com exceção de certos fenômenos descobertos na virada do século XIX. Essa vertente visa explorar os limites da Física Clássica trazendo à tona a necessidade de conceitos de FMC.

-A “vertente alemã” prefere evitar referência à Física Clássica, argumentando que ao trazer mais de uma concepção de ciência, se eleva o grau de complexidade e a quantidade dos conteúdos. Assim, essa tendência sugere evitar analogias clássicas e introduzir algumas ideias da mecânica quântica.

-A “vertente estadunidense” se traduz como uma síntese moderada entre as duas posturas, elegendo conceitos da Física Clássica como pré-requisitos uns dos outros ou como pré-requisitos para conceitos de FMC. Esta última posição, deve ser tratada com cuidado, para não transformar a Física numa “colcha de retalho”, sem unidade.

As diversas concepções acerca do ensino de FMC nascem como resposta às dificuldades e anseios de diferentes professores/pesquisadores em suas respectivas comunidades, tratando sobre suas próprias necessidades e aflições. É importante destacar que o currículo tradicional também peca em fornecer uma concepção adequada da natureza da ciência (KUHN, 2013). Acreditamos que essas reflexões permitem situar historicamente a nossa escolha pedagógica, e esperamos nos alinhar a uma concepção sobre o Ensino de FMC coerente com a formação cidadã, comprometida com um currículo que responde às necessidades dos povos e mais adequada às necessidades dos países da periferia do sistema capitalista.

Desta forma podemos refletir quais temas de FMC são mais relevantes no caso brasileiro? Podemos desenvolver um compromisso com a pesquisa científica brasileira? Existem conteúdos de FMC capazes de valorizar a pesquisa no Brasil e discutir a posição brasileira na divisão internacional do trabalho?

2.2.2 Desafios no Ensino de FMC no Brasil

Tratando do Ensino de Física, em especial, a Física Moderna e Contemporânea (FMC) geralmente é deixada de lado, ou apenas tratada como um *tópico extra* (fora do currículo, para ser abordado apenas no caso de “sobrar tempo”), ou caso haja interesse da turma ou ainda apenas como uma curiosidade, fora do conteúdo programático, ou às vezes até em nível de divulgação. Entretanto, esforços têm sido realizados no sentido da curricularização da FMC no ensino formal, apesar disso a literatura expõe diversas dificuldades (GOULART e LEONEL, 2022; OLIVEIRA, et. al. 2007; PENA, 2006; PEREIRA e OSTERMANN, 2009 e LEONEL, 2020).

Oliveira, et. al. (2007) apontam algumas dificuldades relatadas por professores na inserção de FMC no currículo formal, dentre elas se destacam: O compromisso com o vestibular, a falta de material apropriado e a falta de formação específica de professores para trabalhar esses temas. Todas essas dificuldades estão sendo estudadas em distintas frentes, com algumas pesquisas e iniciativas presentes na literatura, entretanto a FMC ainda não é presente no currículo tradicional, e nem na maioria das escolas do país.

Essas dificuldades são temas recorrentes na literatura (PENA, 2006; PEREIRA e OSTERMANN, 2009; LEONEL, 2020 e GOULART e LEONEL, 2022), e já há iniciativas para tentar superá-las. Dentre essas iniciativas, podemos apontar que o vestibular, ainda citado como obstáculo, há um bom tempo já inclui temas de FMC, como aponta Leonel (2020). Em Santa Catarina, por exemplo, a Proposta Curricular de 1998 já contempla tais conteúdos e o vestibular da UFSC desde 1999 contém o bloco “*Noções de Física Moderna*” nos conteúdos de Física, divididos em: *Limites da Mecânica Clássica, Princípios da Mecânica Relativística, Efeito fotoelétrico e Dualidade onda-partícula*. Também podemos apontar que os materiais didáticos também têm tentado se atualizar no que diz respeito a conteúdos de FMC, além de iniciativas como cursos de formação continuada e esforços para inclusão desses temas e dessas pesquisas nos cursos de Licenciatura em Física. Assim como no caso dos vestibulares, essas são propostas baseadas em documentos legais que carregam intenções, apresentam conteúdos, mas não preveem certas dificuldades, não indicam metodologias e eventualmente os objetivos de se introduzir esses conteúdos são difusos.

Entretanto, apesar de novos esforços estarem presentes na pesquisa científica, ainda há divergências acerca das metodologias, habilidades a serem desenvolvidas e quais conteúdos de FMC são mais importantes para integrar o currículo. Por exemplo, existe uma divergência sobre se precisam ser reforçados aspectos históricos ou os conteúdos em si e quanto ao grau de profundidade de cada tópico.

Goulart e Leonel (2022) fazem uma revisão bibliográfica de trabalhos publicados em Eventos de pesquisa em Ensino de Física, com a finalidade de discutir, através Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS), quais dificuldades e desafios apontam as pesquisas em ensino de FMC. Entre as dificuldades elencadas, merecem destaque as *dificuldades com operações matemáticas, carência de propostas para a utilização de experimentos, carga horária reduzida da disciplina de Física no Ensino Médio e a deficiência na formação de professores*.

Os PCNEM, por exemplo, colocam a multiplicidade de perspectivas sobre o ensino de FMC, como a necessidade de se rediscutir “qual Física ensinar”, apontando como balizador dos conteúdos a formação cidadã. E conclui apontando a complexidade da questão e a necessidade de discussão com toda a comunidade

escolar (BRASIL, 1999). Acreditamos que os conteúdos de FMC selecionados, bem como as metodologias escolhidas, dependem da forma como escolhemos responder essa e outras questões: Qual Física queremos ensinar? Por que é importante ensinar Física? Quais conteúdos são mais relevantes para uma educação emancipatória e para uma formação cidadã? Através do ensino de FMC podemos proporcionar uma concepção de ciência mais adequada?

Como destacamos, a maioria dos nossos estudantes não seguirão carreira científica, portanto assumimos que os conteúdos do currículo devem ser selecionados de acordo com a sua relevância para a formação cidadã (MENEZES, 1980; AULER, 2018). Sobre a concepção de ciência, devemos apontar que o currículo tradicional também falha em apresentar a natureza da ciência e que a mera incorporação de conteúdos de FMC não é suficiente para alcançar esses objetivos. Entretanto, apesar disso advogamos fortemente pela inclusão de FMC no currículo do EM, em virtude das razões acima citadas, dos documentos legais apresentados, e porque acreditamos que, apesar de insuficiente, é um passo importante na direção de uma concepção mais adequada de ciência e do pensamento científico.

2.2.3 O movimento CTS e a ACT como objetivo de aprendizagem

A cultura científica, é tanto instrumento privilegiado de participação nas decisões públicas, como também uma concepção de mundo e uma forma de pensar, não apenas teoria, como também episteme. A cultura científica é considerada hoje como patrimônio cultural da humanidade, e seu acesso é considerado um direito humano universal (MARTINS, 2020).

No âmbito do Ensino de Ciências, almejamos a ACT, esperamos que o discente seja capaz de formular argumentos científicos, de compreender a complexidade de problemas tecno-sociais e efetivamente participar da discussão e do processo decisório de forma democrática e consciente.

Alinhado a esses objetivos, na literatura especializada sobre o Ensino de Ciências, surge no final da década de 70 e início dos anos 80, o movimento CTS, comprometido com a formação cidadã, com a democracia e com a conscientização de impactos sócio-ambientais das novas tecnologias. A perspectiva CTS entende que o cidadão do século XXI precisa ser capaz de compreender e tomar decisões

acerca de questões técnico-científicas de forma a contribuir com a democratização do conhecimento científico (POLANCZKI e ARAÚJO, 2017; e SOLBES et. al. e VILCHES, 2005;).

Após a revisão crítica do Currículo de Ciências no ocidente, datada do contexto da guerra fria, surgem várias linhas de pensamento no Ensino de Ciências. Dentro do contexto histórico, com o perigo iminente da guerra nuclear, o desenvolvimento das armas biológicas, os desastres químicos e ambientais, vai surgindo a ideia de que a ciência precisa ser “humanizada”, ou seja, a ideia de que a ciência, e portanto o ensino de ciências deve estar de acordo com uma filosofia ética e uma consciência socioambiental (SORPRESO, 2017; MARTINS, 2020). O movimento CTS é um movimento crítico do ensino tradicional de ciências, e esse movimento que surge nesse contexto, ganha proporções dentro da pesquisa em *Ensino de Ciências*.

No ensino de ciências, o movimento CTS se apresenta de diversas formas e em diversos contextos, e alguns autores (MARTINS, 2000; apud. STRIEDER e KAWAMURA, 2017, SANTOS, 2001; apud STRIEDER e KAWAMURA, 2017 e AULER, 2011; STRIEDER e KAWAMURA, 2017) apontam a polissemia deste termo. Para Strieder e Kawamura (2017), isso não se deve a distintas concepções sobre CTS, mas às diversidades dos espaços pedagógicos e temas propostos. As autoras criaram uma tabela com diferentes parâmetros e propósitos possíveis para orientar a produção de intervenções com enfoque CTS.

A formação de um cidadão crítico com capacidade de refletir sobre a sociedade que o cerca, com autonomia para tomar decisões ganhou espaço nas discussões sobre o ensino de ciências (DELIZOICOV e ANGOTTI, 1990; apud. STRIEDER e KAWAMURA, 2017). Nesse contexto surgem questionamentos sobre a seleção e organização dos conteúdos escolares.

Em síntese, como destaca Silva (2010), essas teorias surgiram para repensar o papel do currículo, que se dizia neutro na teoria tradicional. A partir dessas ideias, o currículo passou a ser entendido como um espaço de poder, um meio pelo qual é reproduzida e mantida uma ideologia dominante, podendo também ser um espaço de construção, de libertação e de autonomia. É nesse contexto, que o desenvolvimento de posicionamentos questionadores (assim como o desenvolvimento de compromissos sociais) se aproxima, principalmente, dos pressupostos das teorias críticas do currículo. (STRIEDER e KAWAMURA, 2017, p. 45)

Para Strieder e Kawamura, diferentes propósitos educacionais se adequam a perspectiva CTS, dentre eles se destacam o *desenvolvimento de questionamentos* e o *desenvolvimento de compromissos sociais*, segundo as autoras, sobre o desenvolvimento de questionamentos:

No que se refere aos parâmetros da educação CTS, o desenvolvimento de questionamentos implica, por exemplo, discutir benefícios e malefícios dos produtos da ciência; analisar a condução das investigações científicas; questionar as relações entre as investigações científicas e seus produtos; analisar as relações aparato - sociedade; discutir especificidades e transformações acarretadas pelo conhecimento tecnológico; questionar os propósitos que têm guiado as produções de novas tecnologias. Associado a isso, pode ter como intenção a busca pela participação da sociedade, seja do ponto de vista das tomadas de decisão individuais (discutindo riscos e benefícios) e/ou coletivas (discutindo impactos ou transformações sociais) ou a partir de mecanismos de pressão, identificando contradições presentes, principalmente, no momento de produção da CT. (STRIEDER e KAWAMURA, 2017, p. 45-46)

Mais tarde sobre o desenvolvimento de compromissos sociais:

Essa perspectiva apresenta elementos comuns aos pressupostos freireanos, no sentido em que visa abordar a realidade de forma a identificar caminhos para sua transformação. Busca uma relação diferente entre o conhecimento e a sociedade e, coerente com isso, questiona o currículo atual e a função social da escola. (STRIEDER e KAWAMURA, 2017, p. 46)

O enfoque CTS portanto é uma linha de pensamento sobre o ensino de ciências, que tem potencial para despertar o interesse dos estudantes, trazer significado aos conteúdos tradicionais do currículo, bem como orientar uma reelaboração do currículo, atualizada e baseada em princípios éticos para a atuação em uma sociedade democrática pautada em ciência e tecnologia. Permite despertar curiosidade e participação social em discussões científico-técnicas. (SORPRESO, et. al. 2017; SOLBES, et. al. 2005; STRIEDER e KAWAMURA, 2017)

2.2.4 Ensino de Física Nuclear e a abordagem CTS

No ensino de Física Nuclear, também houve mudanças, temas sociais, políticos e econômicos nem sempre foram trabalhados, apesar disso já existe

grande variedade de propostas com a perspectiva CTS e (CAMPOS, 2018 e DARROZ, et. al., 2017), que tem potencial engajamento. Existe a curiosidade pelos acidentes nucleares, somadas à crescente demanda energética no mundo e a necessidade de industrialização na América Latina e no Brasil. Há diversas implicações sócio-ambientais da extração, enriquecimento e produção de energia a partir do minério de urânio de interesse à perspectiva CTS, bem como interesses nacionais e internacionais na pesquisa nuclear, que ainda dificilmente são contemplados no ensino formal.

Dentro da pesquisa CTS, no ensino de Física Nuclear, frequentemente se apresentam implicações ambientais decorrentes do lixo radioativo e se discutem os benefícios e malefícios das usinas nucleares. É comum o uso de abordagens interdisciplinares e as relações CTS são recorrentes na pesquisa em ensino (CAMPOS, 2018).

Carvalho e Allen (2013, apud CAMPOS, 2018) analisam livros do Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD) de 1993 a 2011, e concluem que poucos livros trazem o assunto da Física Nuclear. Criticam a abordagem apresentada, que descrevem como superficial, baseada em fórmulas e sem discussões de cunho social e tecnológico. Darroz et. al. (2017) fazem análises dos livros didáticos do PNLD de 2015, e mostram que o impacto dessas pesquisas ainda é tímido, e que se destacam a inclusão de temas que promovem a *interdisciplinaridade*. Os autores selecionam as categorias de análise, e concluem que ainda que, em geral, os livros apresentam linguagem clara e acessível, restam lacunas em explicitar a natureza da produção científica, discutir os impactos sociais e ambientais, bem como apresentar a pesquisa científica no Brasil e discutir o potencial energético brasileiro (DARROZ, et. al. 2017).

No ensino de Física Nuclear, se mostra relevante o tema da geração de Energia Nuclear, seus fundamentos, seus impactos e a apresentação do PNB. É importante discutir a crescente demanda energética, bem como os impactos de outras formas de geração de energia, entendemos que cada tipo de usina tem seus custos e riscos, mas nos limitaremos aqui a discutir a Energia Nuclear.

2.3 NECESSIDADES REGIONAIS

Esta seção tem por objetivo discutir as especificidades regionais dos países da América Latina, mais especificamente do Brasil. Podemos destacar, no plano econômico similaridades em alguns países latino americanos devido suas histórias econômicas de desenvolvimento, a posição no comércio internacional de bens primários e matérias-primas (*commodities*) com a submissão aos mercados de produtos de maior valor agregado dos países do norte¹⁰, a necessidade de industrialização tardia, necessidade de alocar capacidade produtiva ociosa, histórico de dependência das políticas exigidas pelo Fundo Monetário Internacional (FMI), alta desigualdade social e na abundância de recursos naturais¹¹. No plano subjetivo, podemos apontar as pesquisas críticas em educação, que se diferenciam pela construção de um compromisso com a transformação social.

De forma oposta, podemos pensar nas particularidades do caso brasileiro, um país de dimensão continental, com a maior costa da América Latina, as maiores fronteiras, a floresta amazônica, os maiores mercados e abundância de recursos naturais. Naturalmente esse privilégio geográfico nos exige *responsabilidade ambiental* que é um dos valores que queremos despertar. Também buscamos atentar para os encaminhamentos estratégicos para a construção de um *compromisso com o desenvolvimento social*.

O Brasil tem um potencial energético muito superior à sua demanda, e pretende deixar de ser um importador, para ser exportador de energia. A matriz energética brasileira é bastante variada e constitui um exemplo no mundo. Apesar disso, o Brasil tem compromisso com a descarbonização e com a produção de energias limpas.

¹⁰ Prebisch (1962) apresenta a sua *teoria da deterioração dos termos de troca*, onde discute que a expansão inflacionária do capital produz uma subida dos preços dos produtos industrializados, muito maior que nos bens primários, e que o acúmulo de capital, o aumento da produtividade do trabalho e o avanço técnico contribuem para ampliar essa diferença. A falta de mecanismos institucionais anticíclicos na América Latina, acarreta vulnerabilidade pois implicam na maior amplitude dos ciclos econômicos. Dessa forma, contribuindo para o fluxo de capital para os países da centralidade.

¹¹ O leitor interessado em se introduzir na história econômica comum da América Latina, pode buscar em (GALEANO, 2005).

2.3.1 Introdução ao PLACTS

O Pensamento Latino-Americano em Ciência, Tecnologia e Sociedade (PLACTS) é um movimento crítico na sociologia da produção científica, que discute, em especial, a importação de modelos de desenvolvimento e políticas públicas para a ciência e inovação, trazidos dos países da centralidade do capitalismo, ignorando as demandas das populações locais, o que geraria uma *anomalia* nos países da periferia do capitalismo (DAGNINO, 2013). Isso porque o desenvolvimento científico gerado por essa política, não encontra as mesmas condições aqui, e também porque a importação dessa política anômala tem origem na concepção de *desenvolvimento linear*, onde o progresso científico aqui, deveria gerar o mesmo progresso econômico que houve na centralidade, e que o progresso econômico deveria produzir o mesmo desenvolvimento social. Para Dagnino (2013; 2010 Apud, Auler e Delizoicov, 2015), a falta de participação social e a insensibilidade às demandas locais, criam na América Latina uma *agenda de pesquisa disfuncional*, ou seja, as políticas públicas em ciência e tecnologia são indiferentes às demandas locais e aponta a inacessibilidade da sua produção pelas comunidades onde vivem esses cientistas.

Tendo em vista essa crítica, Auler e Delizoicov (2015) propõem que o ensino de Física crítico e comprometido com a emancipação, não pode meramente apresentar a ciência hegemônica e seus valores, sob o risco de reproduzir e endossar tais valores, tão pouco pode expor uma visão anti-científica. Ao invés disso, uma proposta coerente com essa crítica e com um enfoque para a educação cidadã, deveria expor e refletir sobre questões sociotécnicas, ao mesmo tempo que incentiva uma cultura de participação, atenta para as políticas públicas em CT, sensível às demandas do espaço social latino-americano.

A agenda hegemônica da pesquisa científica, se consolida através de muitos mecanismos, através da influência das forças produtivas na pesquisa científica, por exemplo, mas também a partir do que Varsavsky (apud AULER, 2018) chama de *“Internacional aristocrática”* compostas pelos cientistas de todo o mundo. Auler (2018) aponta que o interesse das classes dominantes tem forte influência na agenda científica, como exemplo ilustrativo, na história recente traz:

Após a segunda-guerra mundial, o carro-chefe da pesquisa, particularmente com aporte de recursos, passou a ser a física nuclear (Guerra Fria, bombas atômicas). (...) Com o esfriamento da Guerra Fria, outros valores/interesses passam a pautar a pesquisa acadêmica: o processo de automação/robotização/miniatrização na sociedade industrial e o 'complexo industrial-militar'. A física nuclear perde encanto não porque os pesquisadores repentinamente deixaram de se interessar por esse campo, mas porque os recursos financeiros foram direcionados para o campo da física do estado sólido. Mais recentemente, as transnacionais, ligadas ao setor de medicamentos e ao agronegócio, visualizaram na biotecnologia um manancial de lucros. Agora, as universidades são irrigadas com recursos (parece que, desde o golpe de 2016 as universidades estão secando) que definem demandas ligadas à biotecnologia. Se, na década de 40/50, do século passado, a maioria dos físicos trabalhava com física nuclear, hoje, não apenas a maioria dos biólogos, mas também pesquisadores de outros campos, estão direta ou indiretamente a serviço dos interesses dessas transnacionais. (AULER, 2018, p. 99-100)

Para Auler (2018) há uma relação de complementaridade e uma base comum entre os pensamentos de Freire e a ideia do PLACTS. Complementares, porque Freire traz inovações no campo educacional sem se aprofundar em questões relativas à Ciência e Tecnologia, que são estudadas pelos pesquisadores do PLACTS, que não se debruçaram sobre o desafio de levar esses valores ao chão de sala. E possuem uma base comum, na medida em que ambos criticam a separação entre concepção e execução. Freire critica o fato de que uns concebem o currículo enquanto outros executam, por exemplo, e o PLACTS critica a concepção da agenda de pesquisa trazidas da centralidade do capitalismo, para que seja executada na periferia. Auler e Delizoicov (2015) destacam proximidades entre o movimento PLACTS e a pedagogia crítica de Paulo Freire, em especial, discutem a prática da investigação temática, e defendem que se estabeleçam práticas contra-hegemônicas que articulam escolas, comunidade e universidade, em sintonia com os valores propagados pelo PLACTS. A investigação temática, desenvolvida para espaços de educação não formal, em especial para a Educação de Jovens e Adultos, é uma proposta para inserir a participação da comunidade na construção de um currículo capaz de refletir sobre os problemas trazidos pela própria comunidade. Essa proposta foi posteriormente adaptada para espaços de educação formal por Delizoicov (1983, 1991 e 2008, apud AULER e DELIZOICOV, 2015).

Pensando no desenvolvimento em sala de aula na escola pública regular, Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2007 e 2002, apud. ABREU, et. al. 2017) e Delizocov e Angotti (1994, apud. LEONEL, 2015) propõe a metodologia dos *Três*

Momentos Pedagógicos (3MP), que consiste em organizar o planejamento em três etapas distintas: A **Problematização inicial**, onde se apresentam questões e se desafia os estudantes para expor o que pensam. Aqui o papel do professor é muito mais de trazer questionamentos, e fazer com que o discente perceba a necessidade de adquirir novos conhecimentos. É interessante que os questionamentos tenham um potencial problematizador. A **Organização do conhecimento** é a etapa na qual o professor introduz os conceitos necessários para tratar as questões que surgiram na etapa anterior. Nesta etapa o estudante se defronta com conhecimentos e visões novas, sobre os temas problematizados anteriormente. E finalmente a **Aplicação do conhecimento**, onde o estudante deve articular os conhecimentos adquiridos para responder às questões da primeira etapa e outras que possam se relacionar com o tema. A exploração de novas situações, bem como a verificação da aprendizagem ocorrem nesta etapa, onde o estudante pode apreciar seu conhecimento adquirido, e compreender as limitações de seu estudo em um tema mais amplo. Vemos, portanto, na obra de Freire, o potencial para explicitar demandas silenciadas, pois a pedagogia do oprimido é a pedagogia das mulheres e homens empenhando-se na luta por sua libertação (FREIRE, 2013).

Nesse sentido, vemos uma série de potencialidades para o ensino de ciências nesta aproximação do pensamento freiriano com o movimento crítico do PLACTS. Desta forma podemos reorientar o currículo de Física a temas mais relevantes para o Brasil, bem como discutir a política científica e energética brasileira à luz das nossas necessidades.

2.3.2 Energia Nuclear e a política nacional de energia

O Brasil expressa intenções de longo prazo em um documento publicado chamado Plano Nacional de Energia 2050 (BRASIL, 2020), com a finalidade de tornar público seus objetivos energéticos e formular uma estratégia consensual com diversos setores da sociedade. O documento traz um conjunto de estudos para dar suporte a sua estratégia, se compromete com a transição energética, destaca os prejuízos da pandemia e se norteia em quatro objetivos: *segurança energética, retorno adequado de investimentos, disponibilidade de acesso à população e critérios socioambientais*.

O documento retoma a memória de escassez energética, lembrando a crise hídrica da década de 1950, os dois choques do petróleo da década de 1970, e o racionamento de energia de 2001, e indica a importância do proálcool e a exploração de petróleo em águas profundas, como políticas públicas na direção da autossuficiência. Apesar disso, o documento apresenta uma *concepção neoliberal*, onde a função do Estado se limita a promover a competitividade no setor, evitar “regulamentações complexas de difícil interpretação” e promover a atração do setor privado. A fim de estimar a demanda energética, o documento aponta diminuição na taxa de crescimento da população, porém destaca mudanças de hábitos por fatores de natureza tecnológica, econômica e social, como por exemplo a tecnologia dos veículos elétricos, os novos hábitos da sociedade da conectividade e das redes sociais, o impacto da elevação do PIB per capita e da incorporação de milhares de brasileiros nas classes mais elevadas de consumo.

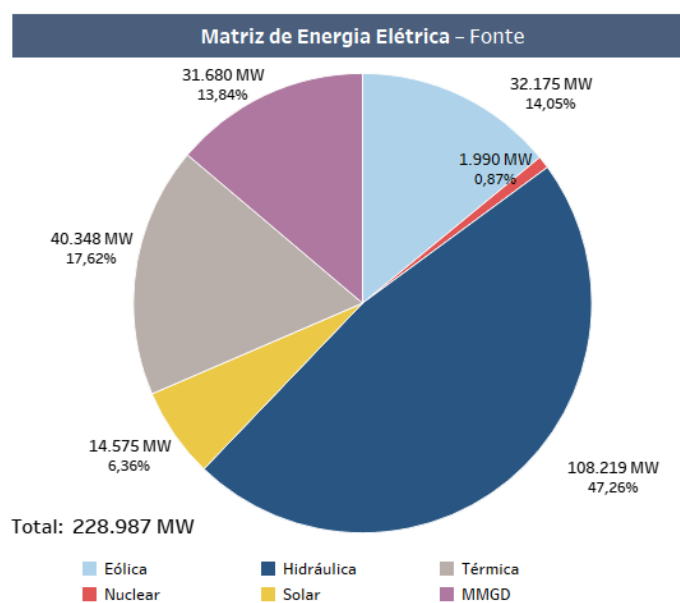
O documento ainda apresenta a perspectiva de que o Brasil deixará de ser demandante líquido de energia, para ofertante líquido em um futuro próximo. Também se compromete com a *transição energética*, reconhece que é um desafio de dimensões múltiplas, onde as políticas em CT&I (Ciência, Tecnologia e Inovação) e em educação devem se articular com esta intenção. A transição energética é definida como uma mudança gradual na matriz energética do país, na qual há a substituição das fontes de energia, por fontes de energia renováveis ou de baixa emissão de carbono e gases de efeito estufa (Brasil, 2020).

O Brasil se compromete com a integração energética Sul-americana, onde descreve os avanços e elenca facilidades e desafios nessa área. No caso dos países que fazem fronteira com a região norte e centro-oeste do país, o maior desafio se dá nos possíveis impactos ambientais da criação de corredores de distribuição na região amazônica, já na região sul, destaca a existência de troncos de transmissão interconectando Brasil, Uruguai, Argentina e Paraguai. Discute a diversidade de acordos e arranjos comerciais distintos, desde a importação por ofertas semanais de energia elétrica, até arranjos binacionais de longo prazo (Itaipu e Gasbol), e aponta a falta de uma base de dados integrada.

A matriz elétrica brasileira é diversificada e em 2024, segundo a ANEEL, 84,25% são provenientes de fontes renováveis, enquanto 15,75% são de fontes não

renováveis¹². No ano de 2023, 49,5% da energia elétrica produzida é oriunda de hidrelétricas, que é uma fonte de energia renovável e de baixa emissão, porém exige que grandes áreas sejam alagadas, o que dificulta sua expansão e muitas vezes as regiões propícias coincidem com áreas de conservação e territórios indígenas ou quilombolas (para uma análise dos conflitos étnico-raciais em torno da dicotomia tradição x modernidade, com uma análise do caso da construção da usina de Belo Monte na bacia do Xingu ler Brito e Alho (2022)). Essa fonte de energia também está sujeita a variações de precipitação e a mudanças climáticas, sendo portanto, um *recurso renovável não-controlável*. Em seguida, temos as termelétricas produzidas a partir de gás natural, carvão e biomassa, logo após a energia eólica, então as MMGD (Micro e Minigeração e Distribuição) e a energia solar.

Figura 01 - Matriz elétrica brasileira.



Fonte: SIN/ONS. Disponível em:

<<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 28/06/2024.

Podemos ver na figura 01, que hoje menos de 1% da matriz elétrica brasileira é representada pela energia nuclear, enquanto na matriz elétrica mundial é cerca de 10% (BRASIL-MME/PNE 2050). O Brasil tem a intenção de ampliar sua produção de energia nuclear, mas não necessariamente a fatia da matriz energética.

¹² Disponível em:

<<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/matriz-eletrica-brasileira-alcanca-200-gw>>
Acesso em: 24/06/2024.

O documento destaca importantes avanços tecnológicos na área ao longo dos anos, adoção de critérios de segurança mais rígidos e a criação de organismos internacionais e acordos regulatórios.

Apesar de estar comumente associada a energia elétrica, a tecnologia por trás das usinas nucleares possui uma ampla gama de aplicações: *medicina nuclear, radioisótopos, irradiação de alimentos, controle de pragas, monitoramento de erosão de solos, marcadores industriais, fornecimento de vapor residual (calor de processo), dessalinização, geração de hidrogênio, defesa (submarino com propulsão nuclear), promove a capacitação de profissionais e desenvolvimento de tecnologias.*

O Brasil possui enormes reservas de urânio, ainda que grande parte do território não tenha sido prospectado. O país domina toda a tecnologia do *ciclo completo do urânio*, objetivo primário do PNB, desde a mineração até a produção do elemento combustível, embora por questões de escala, ainda há etapas do combustível nuclear feitas no exterior (recombinação e parte do enriquecimento). Temos duas usinas de produção de energia operantes (Angra I e Angra II), e uma em construção (Angra III), com previsão de início da operação comercial para janeiro de 2026. Em termos de projetos de engenharia nuclear, se destacam o *Reator Multipropósito Brasileiro* e o *Submarino de Propulsão Nuclear*. Além disso, o PNE 2050 (Brasil, 2020) expressa a necessidade de informar e conscientizar a sociedade civil sobre a importância do PNB e da Energia Nuclear, dadas as percepções negativas devido aos desastres do passado e as tensões armamentistas da guerra fria.

3 CONHECENDO A TEMÁTICA

Embora seja claro, que o desenvolvimento econômico e social, não é consequência do desenvolvimento científico e técnico, é condição necessária, porém não suficiente, para o desenvolvimento econômico e para a possibilidade de desenvolvimento social.

O modelo de desenvolvimento apresentado pelos países centrais como a *“fórmula do sucesso econômico”*, pressupõe um padrão de consumo elevado e uma produção de bens e serviços orientada unicamente pelas demandas de mercado. Esse modelo, como constatou Harvey (2013, apud. Auler 2018, p. 62-63), encontra seus limites apenas em duas condições, na disponibilidade de matéria-prima e na demanda e oferta característica de qualquer mercadoria.

Auler (2018) aponta que a primeira situação limítrofe citada depende não apenas de fatores econômicos, mas também da finitude desses recursos na natureza, e questiona se o sistema econômico capitalista já não está perto de alcançar esses limites. O autor destaca como a falta de recursos, para a expansão do padrão de consumo típico do capitalismo, prevê escassez, porém não mudança, e aponta o crescimento de retóricas fascistas, bem como a normalização do extermínio e genocídio de certos grupos minoritários, como uma resposta a questão: *“Não há natureza para todos”*. O autor retoma o argumento marxista de que a especialização técnica em si não geraria necessariamente o desemprego, enquanto na realidade reduz a demanda de trabalho humano, e que o sistema capitalista então, ao buscar a máxima eficiência na extração de mais-valia, exclui essas pessoas do mercado de trabalho, lhes arrancando a possibilidade de trabalho e vida digna.

Ao defender a pesquisa em Energia Nuclear, Tennenbaum (2007), critica os argumentos neo-malthusianos sobre a questão energética (a ideia de que não há - ou que não poderia haver - energia elétrica para todos), apontando que há a possibilidade de produzir mais energia, a baixo custo, e descreve tentativas de certos grupos poderosos em atacar a Energia Nuclear na opinião pública com a finalidade de coibir tais pesquisas.

A produção energética é tema estratégico e sensível para qualquer nação, e envolve uma série de questões sócio-técnicas complexas. A utilização de fontes de

energia não-renovável prevê sua própria extinção como fonte de energia, apesar disso, o uso de fontes de energia de baixa emissão de gases como a energia nuclear pode contribuir para a transição energética. Do ponto de vista econômico, países centrais ou por não suprirem suas demandas ou para preservar suas reservas para o futuro, importam matéria bruta de países da periferia. Dentro desse contexto, podemos compreender a política hostil dos Estados Unidos com países que se recusam a privatizar e dolarizar suas reservas de petróleo, por exemplo. Resguardadas suas peculiaridades, podemos fazer uma análise similar dos interesses no caso dos minérios. A finitude destes recursos é a motivação da política imperialista, que promove golpes de Estado quando possível, ou até invasões e guerras para garantir a extração de recursos da periferia, para usufruto na centralidade.

3.1 O DESENVOLVIMENTO DA FÍSICA NUCLEAR NO BRASIL

No Brasil a Física Nuclear teve um papel muito importante para a pesquisa científica como um todo, enquanto o tema era incipiente no mundo, foi a segunda linha de pesquisa aberta no primeiro programa de pós-graduação em Física no Brasil, no Instituto de Física da USP. Também foi importante no incentivo para a criação do CNPq. Sob coordenação do Vice-Almirante da Marinha, Álvaro Alberto, à instituição eram atribuídas responsabilidades específicas para a pesquisa em Física Nuclear.¹³

O Vice-Almirante durante toda sua vida foi entusiasta da energia nuclear, presidiu a Academia Brasileira de Ciências, e posteriormente se tornou representante do Brasil na Comissão de Energia Atômica da ONU (1946), na ONU votou junto aos soviéticos contra o *Plano Baruch*, que pretendia criar um *organismo “internacional”*¹⁴ para fiscalizar toda a produção de materiais atômicos no mundo. Os opositores do plano denunciavam a intenção de colocar todas as reservas minerais

¹³ O almirante é um grande idealizador do PNB, pelo qual é reconhecido, mas também integra sua biografia um episódio lamentável, aos 20 anos recém promovido a segundo tenente, participou da repressão na Revolta da Chibata. Fonte: <<https://www18.fgv.br/cpdoc/acervo/dicionarios/verbete-biografico/alvaro-alberto-da-mota-e-silva>>. Acesso em: 27/06/2024.

¹⁴ O termo “internacional” aqui se refere a mais de uma nação, mas não a todas! A URSS e outros países se opunham, segundo eles a ONU não teria isenção para fiscalização, pois seria um instrumento imperialista.

do planeta sob o controle dos EUA, Canadá e Grã-Bretanha. Álvaro Alberto defendeu a nacionalização de todas as minas brasileiras, bem como a política que ficou conhecida como *Princípio das Compensações Específicas*: Qualquer transação de *minerais estratégicos*¹⁵ deve ser dimensionada não apenas com dinheiro, mas com *transferência tecnológica*. Em busca de parcerias para o desenvolvimento de um programa nuclear, o Almirante foi à Europa e fez contato com diversos cientistas, inclusive com Otto Hahn, um dos descobridores da Fissão Nuclear. Dessas viagens resultaram diversas iniciativas de cooperação, como a construção da mina de extração de urânio em Poços de Caldas (MG) e a aquisição de uma usina de fabricação do chamado “*yellowcake*” (também chamado “composto de urânio”, é uma etapa anterior ao enriquecimento, ainda possui 99% do isótopo 238, cuja meia vida é infinitamente maior), com o auxílio da França que comprava o minério do Brasil e da Alemanha, com a encomenda secreta, por 80 mil dólares, de três centrífugas de enriquecimento de urânio. As centrífugas foram descobertas pela inteligência dos EUA e apreendidas em território alemão pelo Military Board of Security dos EUA, que consideravam que o Brasil “*pertencia a zona de influência norte-americana*”.

Como veremos o PNB, possui uma longa história de altos e baixos, marcada pelo interesse estrangeiro na região, na exploração de recursos e em tentativas ousadas de cientistas e engenheiros brasileiros que desafiaram uma ordem global estabelecida. Hoje o nome do Vice-Almirante batiza o submarino de propulsão nuclear brasileiro SN-10, toda a construção do submarino ocorre em território nacional, e o Brasil conseguiu alcançar tal expertise a partir do acordo com a França no Programa de Desenvolvimento de Submarinos da Marinha (PROSUB), que prevê a *transferência tecnológica*. O processo de construção e formação de pessoal foi marcado por uma série de dificuldades e entraves políticos, que como veremos, é característica na história do PNB.

3.1.1 O Programa Nuclear Brasileiro (PNB)

As primeiras pesquisas em Física Nuclear no Brasil começaram na década de 1930, quando ainda era uma ciência muito incipiente no mundo. Diversos esforços foram feitos, desde o primeiro grupo de pesquisa na USP onde estiveram

¹⁵ Termo cunhado pelo próprio Álvaro Alberto.

figuras importantes como o professor responsável Gleb Wataghin, e muitos físicos brasileiros importantes como César Lattes, Oscar Sala, Marcelo Damy, José Leite Lopes e Mário Schenberg e outros¹⁶. Entretanto, a construção de uma política para a criação de um PNB, foi dada apenas na década de 1950, com a fundação do CNPq e determinações específicas para a pesquisa da energia nuclear, em especial a busca pelo domínio do ciclo completo do urânio (BARROS e PEREIRA, 2010 e PATTI, 2013).

Já na década de 1940, o Brasil fecha acordos legais e secretos para a prospecção e o fornecimento de minérios radioativos para os EUA¹⁰, sendo inclusive um fornecedor de minérios atômicos para o Projeto Manhattan, anos antes de Getúlio Vargas aprovar as diretrizes ao Programa Atômico Brasileiro (atual PNB) em 1953 (PATTI, 2013). Essa prontidão em atender as demandas de recursos de um país central, aliado às dificuldades burocráticas e técnicas para a implementação de um programa tecnológico nacional, marcam o Brasil dessa época na esfera da periferia do sistema capitalista.

O PNB foi marcado em seu início por uma busca quase incondicional por financiamento externo. Alcañiz (2010, apud. BARROS e PEREIRA, 2010) aponta que as crises e o receio de desinvestimento são características comuns para agências estatais na América Latina, em especial setores relacionados à pesquisa em Ciência e Tecnologia (CT). Apesar disso, já na década 50 o Brasil impôs às suas exportações o *princípio das compensações específicas*, na qual condiciona exportação de minérios estratégicos a transferência tecnológica útil ao setor nuclear. Com forte oposição dos EUA, o Brasil negociou com a Alemanha a importação de uma ultracentrífuga de enriquecimento de urânio, a construção de uma usina para a produção de hexafluoreto de urânio, e com a França a construção de uma usina para produção de dióxido de urânio. Com exceção das centrífugas, que foram entregues em 1957, as outras iniciativas foram interrompidas pelo governo Café Filho (1954-1956), cujo intuito era cooperar com os EUA (PATTI, 2013).

Também houve modesta expansão com o apoio de Kubitschek, incluindo atribuições no *plano de metas*. Entretanto, as atividades nucleares ficaram restritas à pesquisa. Em acordo assinado com os EUA em 1955, como parte do programa

¹⁶ Disponível em: <<http://memoria.cnen.gov.br/memoria/Cronologia.asp?Unidade=Brasil>>. Acesso em: 17/03/2024.

“átomos para a paz”, o Brasil obteve o seu primeiro reator de pesquisa, e conseguiu desenvolver um próprio em 1962. Após o golpe militar, o país adota uma nova política nuclear em 1967, no governo Costa e Silva, onde se desenvolve um plano detalhado para o pleno desenvolvimento da energia nuclear e se adota uma postura de firme oposição aos tratados de não-proliferação de armas nucleares, mesmo com ressalvas o Brasil adere à zona livre de armas nucleares na América Latina. Ao mesmo tempo que buscava adquirir, no exterior, centrais nucleares para a criação de um parque industrial atômico nacional, tentava adquirir as tecnologias necessárias para o ciclo de produção do combustível nuclear. A CNEN e Furnas negociam com uma empresa norte-americana a compra de uma central nucleoe elétrica em 71, que seria instalada em Angra, bem como o fornecimento de combustível nuclear (PATTI, 2013 e BARROS e PEREIRA, 2010).

Na década de 70, durante o governo militar, influenciada pela crise do petróleo de 73, a Eletronuclear lança o *Plano 90*, que visava suprir as crescentes demandas energéticas e incluía a produção de 12 centrais nucleares até 1990. Geisel planejou a aquisição de *tecnologia dual* (para fins pacíficos e militares), tanto do enriquecimento de urânio, como o reprocessamento (útil para produzir plutônio). Dada a indisponibilidade dos EUA, o Brasil busca outras cooperações e fecha um acordo com a República Federal da Alemanha, que se compromete a transferir oito reatores de água leve (PWR - Pressurized Water Reactor) e a transferência tecnológica do *Ciclo Completo do Combustível Nuclear*. Houve vários fatores que não permitiram que o acordo se concluísse, apesar disso um desses reatores chegou da Alemanha (PATTI, 2013 e BARROS e PEREIRA, 2010). Entre os fatores que impediram a conclusão do acordo, podemos citar: *as críticas domésticas, o aumento da pressão dos Estados Unidos e a crise econômica no Brasil*, levaram a reavaliação do programa nuclear civil. Dado este impasse, a Nuclebrás deu sequência a um *programa nuclear paralelo*, secreto e sem a cooperação internacional.

Com o fim do governo militar, o programa paralelo se torna público, e o presidente José Sarney anuncia à comunidade internacional que o Brasil desenvolveu sozinho a capacidade de enriquecer urânio. Então Collor faz uma cerimônia de encerramento do programa nuclear paralelo e retoma os acordos de não proliferação de armas nucleares e cooperações científicas internacionais

(PATTI, 2013). Analistas alegavam uma espécie de “corrida armamentista” entre Brasil e Argentina, devido a seus programas nucleares secretos, essas alegações acabam em 1991 com a criação da ABACC (Agência Brasileira-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares).

Razões econômicas fizeram da década de 1990, a década perdida do PNB, fechou-se a planta de conversão de hexafluoreto de urânio, suspendeu-se a construção de Angra II e Angra III, bem como houve um redimensionamento do programa nuclear da Marinha, que tinha desenvolvido uma tecnologia de separação isotópica por centrifugação, o que levou à suspensão do projeto do submarino de propulsão nuclear.

Em 1998 foi aprovado no Congresso Nacional a retomada das obras da construção de Angra II, e nos anos 2000 a INB (Indústrias Nucleares do Brasil) construiu em Iperó - São Paulo, uma planta de enriquecimento de urânio, com o projeto da Marinha do Brasil, que retoma o projeto do submarino de propulsão nuclear. O Brasil aprovou em 2007 um plano ambicioso de longo prazo PNE 2030, que marca a retomada do PNB (PATTI, 2013).

3.1.2 A questão militar e a defesa

A tecnologia nuclear é comumente associada à corrida armamentista da guerra fria e a construção de armamento nuclear. É importante observar que muitas tecnologias possuem caráter dual (pode ser usado tanto para fins pacíficos como militares), é o caso do ciclo do combustível nuclear. Por esse motivo, organismos internacionais inspecionam regularmente as instalações nucleares e de produção de combustível de todos os países associados a IAEA (International Atomic Energy Agency), apesar disso alguns países não associados possuem instalações de enriquecimento de urânio e produção de combustível nuclear, e também há países associados que possuem instalações irregulares (sem registro na IAEA e portanto não inspecionadas), incluindo membros do conselho de segurança como EUA e Rússia.

Atualmente as armas nucleares são o maior elemento dissuasório disponível, sabidamente nove países possuem armas nucleares hoje, são eles: Rússia (5.580), Estados Unidos (5.044), França (290), China (500), Reino Unido

(225), Israel (90), Paquistão (170), Índia (172) e a República Popular Democrática da Coreia (50). O número somado de ogivas implantadas (para pronto uso) e em estoque de cada país segundo a FAS¹⁷ (Federation of American Scientists), destes, Israel e Rússia são os únicos em conflitos abertos hoje.

No âmbito internacional, o Brasil se destaca pela diplomacia humanista, posicionamento crítico em relação aos conflitos mundiais e política pacifista, entretanto seu papel estratégico na geopolítica global, bem como suas riquezas naturais e seu vasto território, que inclui a amazônia e a maior costa do continente, justificam uma política de defesa mais ativa.

O Brasil já teve pesquisas com finalidades militares, mas hoje assina os tratados de não-proliferação de armas nucleares, e se limita a fins pacíficos da Energia Nuclear. No que concerne à defesa, tem um projeto do submarino de propulsão nuclear SN-10 Álvaro Alberto. O projeto surge no contexto da parceria PROSUB, firmado em 2008 com a França, que cooperou na capacitação de engenheiros da marinha para a construção de grandes submarinos, é importante apontar, que não há no PROSUB transferência de tecnologia nuclear, de forma que tanto o reator como a sua miniaturização para propulsão de submarinos são de *tecnologia nacional*. Enquanto um submarino movido a combustão interna (Diesel) tem autonomia limitada a quantidade de combustível e oxigênio disponível, o que implica que o submarino precisa subir a superfície constantemente, entregando sua posição, já o submarino de propulsão nuclear não consome oxigênio, e a troca de combustível nuclear é prevista para 15 anos de operação, fazendo com que as subidas à superfície estejam limitadas apenas pelos estoques de suprimentos da tripulação, podendo ficar até 3 meses embaixo da água. Além disso, o submarino diesel-elétrico pode viajar a até 6 nós (cerca de 11 km/h) enquanto o submarino nuclear pode chegar a 25 nós (cerca de 45 km/h). Segundo a Marinha do Brasil¹⁸ a previsão para a finalização do projeto é até 2033, o que fará do Brasil a 7ª nação a possuir essa tecnologia.

¹⁷ Disponível em: <<https://fas.org/initiative/status-world-nuclear-forces/>>, Acesso em: 03/07/2024

¹⁸ Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/programas-estrategicos/prosub>>. Acesso em: 03/07/2024.

3.2 A FÍSICA DA ENERGIA NUCLEAR: QUAIS ASPECTOS SÃO RELEVANTES PARA A EDUCAÇÃO CIDADÃ?

A Energia Nuclear é uma forma de produção de energia que não emite gases de efeito estufa durante a operação das usinas, e mesmo levando em conta as *emissões da cadeia produtiva associada à energia nuclear* (emissões decorrentes dos processos associados como: extração de minérios, fabricação de pastilhas de urânio para o combustível nuclear e o transporte destes até os reatores), ainda é considerada uma fonte de baixa emissão de gases em comparação a outras formas de geração de energia. O dióxido de carbono emitido por unidade de energia produzida é comparável a energia eólica e cerca de um terço das emissões associadas à energia solar¹⁹. Apesar disso, existem também impactos ambientais associados à mineração, por exemplo, necessidade de destruir completamente o local das jazidas, emissão de poluentes e material particulado no ar no processo, além de afetar principalmente as populações que vivem próximas às jazidas. Existe a necessidade de se armazenar e destinar os subprodutos das reações nucleares, o *lixo radioativo*, o que suscita outras questões acerca da *segurança nuclear*. Podemos ressaltar que existe uma cadeia de pesquisa associada, que forma pesquisadores e técnicos em território nacional, essa *expertise técnica* tem um papel importante na divisão internacional do trabalho e na produção científica, e por isso é um ponto estratégico para o país. Frente a crescente demanda energética e da necessidade de industrialização, a construção de Usinas Nucleares e as aspirações de ampliação da produção de energia nuclear é uma questão sócio-técnica complexa, e que tem um grande potencial para motivar o Ensino de Física.

A pergunta central desta seção, “*quais aspectos técnicos são relevantes para a educação cidadã?*” Explicita, não apenas valores e princípios que regem nosso trabalho como educadores, mas também, uma crítica ao que tradicionalmente se discute em sala de aula sobre o tema da Energia Nuclear. Reconhecendo, como mostra a literatura (PENA 2006; PEREIRA e OSTERMANN 2009; OLIVEIRA et. al. 2007), que o currículo de FMC no EM é deficitário, e que a Energia Nuclear, mesmo

¹⁹ Disponível em:

<<https://world-nuclear.org/nuclear-essentials/how-can-nuclear-combat-climate-change.aspx>>. Acesso em: 05/04/2024.

sendo um tópico bastante abordado quando comparado a outros tópicos de FMC, ainda não é uma constante no currículo básico em nível médio nos cursos de Física.

Podemos destacar inicialmente que o tópico da Física Nuclear, em especial a Energia Nuclear, quando é abordada, geralmente é tratada de um ponto de vista meramente heurístico e livresco, descrevendo processos atômicos, citando avanços científicos, equações nucleares e os processos na usina. Não raro, existem propostas didáticas relacionadas a temas sociais, principalmente tópicos relacionados a *Segurança Nuclear*, *Energia Limpa* ou ao *Lixo Radioativo*, seu tratamento e riscos (CAMPOS, 2018). Entretanto, o tratamento ainda é escasso ou insuficiente nos materiais didáticos (DARROZ, et. al., 2017), que sabemos que é o principal recurso para grande parte dos professores no Brasil, alguns até formados em outras áreas.

O tema da Física Nuclear é especialmente caro ao Brasil tanto pela sua história, como pelo seu potencial. No Brasil, existe uma cadeia produtiva capaz de minerar, beneficiar e enriquecer urânio, bem como produzir pastilhas e fabricar o combustível nuclear, e até extrair energia nas usinas. Na cadeia do *Ciclo Completo do Urânio*, apenas a etapa de conversão (hexafluoreto de urânio UF₆, para dióxido de urânio UO₂) não é toda feita no Brasil, ou seja, falta pouco para completarmos o *Ciclo Completo* em território nacional e tornar o Brasil autossuficiente. Além disso, somos o país com a oitava maior reserva de urânio, entretanto somos atualmente o décimo quarto produtor mundial de urânio^{20 21}, e ocupamos a vigésima quarta posição na produção de energia nuclear em 2021²².

Como já foi mencionado, o Brasil ocupa a função de exportador de minério bruto, desde o início da prospecção de minério de urânio no país, tendo inclusive fornecido material para o projeto Manhattan durante a segunda guerra (BARROS e PEREIRA, 2010).

²⁰ Disponível em:

<<https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/uranium-production-figures.aspx>>. Acesso: 29/01/2024

²¹ Disponível em:

<<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>> Acesso: 29/01/2024

²² Disponível em:

<<https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/nuclear-generation-by-country.aspx>>. Acesso: 29/01/2024

Pesquisas futuras, bem como a *expertise* técnica podem eventualmente reduzir os custos de produção de energia elétrica, gerando inovação técnica em um setor estratégico, possibilitando a produção de excedente, que poderia ser comercializada na forma de energia elétrica ou ainda fomentar uma nova reindustrialização do país, com alta oferta de energia elétrica barata para setores estratégicos da indústria, visando um projeto de desenvolvimento com abundância energética e com baixa emissão de carbono, preparando a transição energética.

Então, nesse sentido, sugerimos quatro tópicos para iniciar o diálogo: o primeiro versa exatamente sobre a mineração, enriquecimento de urânio e a fabricação de combustível nuclear, o segundo se refere a estrutura atômica e a física das reações em cadeia, o terceiro tópico versa sobre as usinas nucleares e seu funcionamento básico, tema mais recorrente no ensino da Física Nuclear, e finalmente um quarto tópico, que versa sobre as medidas de segurança e o tratamento do lixo radioativo.

3.2.1 O Urânio: Da mineração ao enriquecimento

O urânio está presente nas moléculas que formam diversos minerais que compõem as rochas que ocorrem em diversas regiões do país (ocorre na *Pechblenda*, *Carnotita* e muitos outros). Este elemento aparece na natureza, com uma variedade de isótopos, o isótopo mais abundante é o U-238 (convenciona-se especificar o número de massa após o símbolo atômico), que é mais difícil fissionar este nuclídeo. O isótopo mais utilizado é o U-235 que é físsil, este nuclídeo possui ocorrência de 0,72%, e é o principal combustível dos reatores.

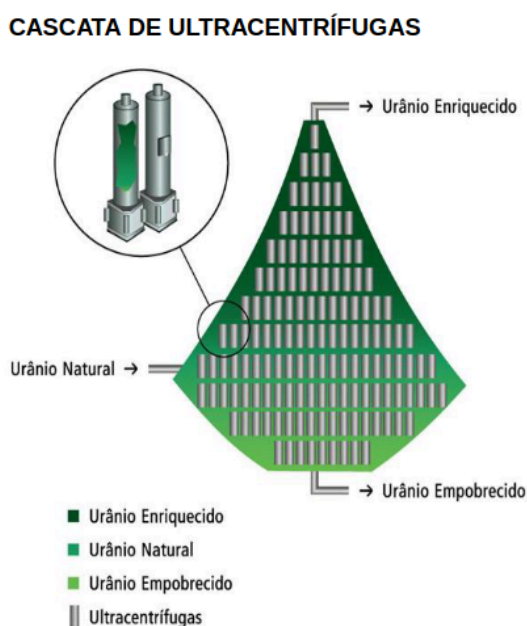
As rochas extraídas do seu ambiente serão trituradas, em dois processos de britagem, para que diminuam seu tamanho e aumente a superfície de contato, então essa rocha britada será levada para a *lixiviação*, processo de extração do urânio com ácido sulfúrico, o resultado desse processo é o *licor de urânio*, o líquido será processado, para separar apenas o urânio dos outros componentes, a próxima etapa é o *concentrado de urânio*, o famoso *'yellowcake'*.

No Brasil, o *enriquecimento de urânio* é feito através de ultracentrifugação em cascata (é o método mais eficiente atualmente, mas não é o único e nem o mais moderno), neste procedimento o concentrado de urânio é enviado para uma etapa

de *conversão*, nessa etapa o concentrado é dissolvido e purificado, para então ser convertido para o estado gasoso. Na forma gasosa como hexafluoreto de urânio (UF_6) ele será enriquecido, esta etapa exige alta tecnologia e centrífugas de última geração. Na etapa de *enriquecimento*, o isótopo U-235 passará de uma concentração comum (0,7%) para uma concentração de uso civil (cerca de até 5%).

O *enriquecimento de urânio* ocorre na forma de *cascatas* (veja a figura 02), onde o gás é passado de uma centrífuga a outra, aumentando sucessivamente a concentração do isótopo U-235 a cada estágio da cascata. A tecnologia brasileira de enriquecimento é referência no mundo e já atraiu interesses de outras nações e organismos internacionais.

Figura 02 - Esquema de Ultracentrífugas em Cascata.



Fonte: INB. Disponível em:

<<https://www.naval.com.br/blog/wp-content/uploads/2021/12/4-Enriquecimento-CA-EN-Alvaro-INB.pdf>>. Acesso: 21/12/2023

O material após reconvertido para o estado sólido será usado para construir as pastilhas de combustível. As pastilhas são alojadas em varetas de aço que compõem o combustível nuclear no interior do reator. O pó de UO_2 , já enriquecido, é transformado em pastilhas que serão submetidas aos processos para resistir às altas temperaturas no interior do reator. Cada pastilha de UO_2 tem uma forma

cilíndrica de 2 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro. Uma única pastilha de UO₂, enriquecida a 3,5% apenas, produz tanta energia quanto 3 barris de petróleo, ou uma tonelada de carvão, ou 500 m³ de gás natural (PERUZZO, 2012).

No Brasil o monopólio da exploração de minerais pesados é das Indústrias Nucleares do Brasil (INB), empresa pública vinculada ao Ministério de Minas e Energias, o que inclui a produção de material nuclear e sua comercialização no mercado internacional, conforme determinação constitucional. Essa política está justificada no contexto brasileiro, onde empresas privadas de mineração atuando com ganância e negligência causaram uma série de acidentes gravíssimos, além do caráter estratégico e dos interesses econômicos em torno desses minerais.

A energia nuclear, considerada uma energia limpa, e de fato, um reator nuclear não emite gases de efeito estufa, entretanto, a produção de energia através de um reator, está associada a uma cadeia produtiva, que depende da mineração, uma atividade que causa a degradação no ambiente e está associada a emissões de gases. Apesar disso, é importante apontar que a quantidade de energia produzida é muito maior em comparação com outras formas de produzir energia. Todas as fontes de geração de energia elétrica têm impactos ambientais, isso torna a questão nuclear e a construção de usinas, ou de minas de extração de minerais pesados, uma questão complexa de caráter sócio-técnico e de grande impacto para as populações que vivem perto destas regiões. As principais reservas brasileiras são²³: *Mina de Itataia (Ceará), Depósitos de Pitinga (Amazonas), Parque Estadual do Rio Cristalino (no sul do Pará), Espinharas (Paraíba), Caetité (Bahia), Amorinópolis (Goiás), Campos Belos (Goiás), Rio Preto (Tocantins), Quadrilátero Férreo (Minas Gerais), a mina desativada de Caldas (sul de Minas Gerais) e Figueira (região entre os municípios de Figueira e Caruíva no nordeste do Paraná).*

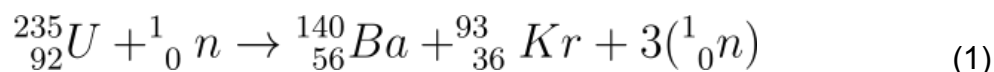
3.2.2 Fissão nuclear e reação em cadeia

Experimentos com irradiação estavam em alta na primeira metade do século passado, o grupo de Fermi havia publicado alguns resultados do bombardeio de nêutrons em átomos pesados, e interpretavam seus resultados como a descoberta

²³ Fonte: INB, disponível em: <https://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ur%C3%A2nio/Recursos>. Acesso em: 30/06/2024.

de novos elementos transurânicos, devido às propriedades periódicas estes teriam comportamento químico semelhante a elementos mais leves do mesmo grupo. Ida Noddack, já apontava a possibilidade de *Fissão Nuclear* nos experimentos de Fermi, e que os elementos encontrados por Fermi, seriam na verdade elementos conhecidos, mais leves do mesmo grupo dos supostos elementos novos. É importante ressaltar que naquele tempo era considerada impossível a fissão nuclear, e Ida Noddack estava contestando o trabalho de Fermi, que já era um renomado experimental, apenas com argumentos físicos, mas sem evidências experimentais. Essa foi a primeira proposta séria de fissão nuclear (PERUZZO, 2012 e TENNENBAUM, 2007).

O grupo de Otto Hahn e Lise Meitner, pesquisavam também irradiação de nêutrons em átomos pesados, em Berlim, Lise era judia, austríaca e mulher, e em 1938 a Alemanha nazista invadiu e ocupou a Áustria, de forma que Lise decidiu fugir para a Suécia. Otto Hahn continuou os estudos que os dois haviam iniciado, e comunicava seus resultados a Lise por cartas. Em ocasião de uma visita de seu sobrinho Otto Frisch, que trabalhava com Bohr em Copenhague, Lise conta sobre os experimentos do grupo de Hahn, no qual verificou-se a formação de Bário ao irradiar Urânio com nêutrons. Então Lise e Frisch se debruçam sobre o processo de fissão e calculam a energia liberada no processo usando a famosa relação de Einstein $E=mc^2$:

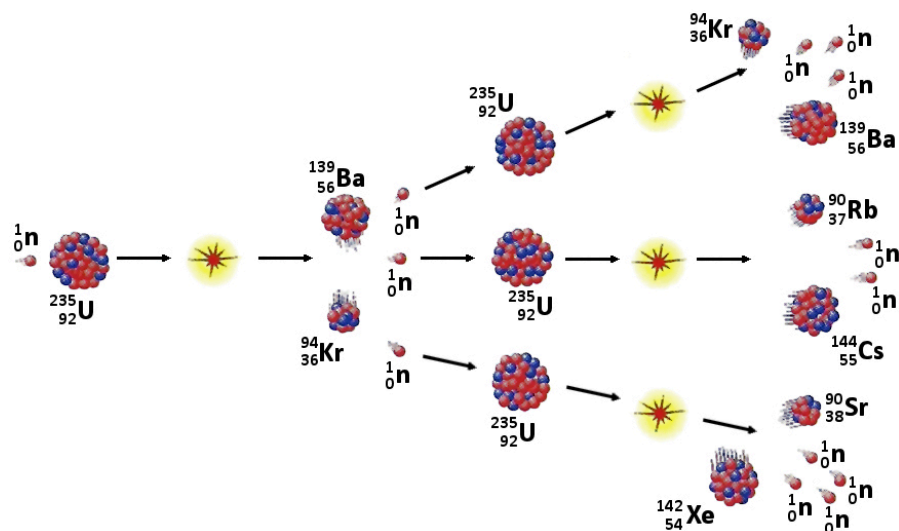


Calcularam então, que a fissão de cada átomo de urânio poderia liberar até 200 Mev, uma quantidade de energia, milhões de vezes mais alta que a produzida por reações químicas. Existem muitos outros subprodutos com equações diferentes, com diferentes probabilidades e energias liberadas, mas essa equação e essa energia dá uma boa ideia e é representativa do processo. Perceba que *um nêutron* desencadeia um processo onde se liberam *mais 3 nêutrons*, permitindo assim que esses nêutrons atinjam outros núcleos próximos. Em uma amostra de urânio comum, não enriquecida, o livre caminho médio de um nêutron antes de decair é muito pequeno em relação à distância a outro exemplar do nuclídeo 235, mas em uma amostra de urânio enriquecido é suficiente para gerar uma *reação em cadeia*.

Os nêutrons funcionam como projéteis no interior do material e não sofrem muita interação no interior do meio, podendo acertar um núcleo com energia suficiente para fissioná-lo. Os subprodutos da reação decaem em cascata em elementos mais leves, até chegarem a elementos mais estáveis. Dentre os subprodutos da fissão do urânio, podem incluir o Bário, Criptônio, Telúrio, Zircônio, Plutônio, Tório e outros. A primeira reação em cadeia foi obtida em 1942, em Chicago, pela equipe de Enrico Fermi através de uma pilha nuclear com 40 toneladas de U natural, 393 toneladas de grafite como moderador e 92 toneladas de grafite como refletor e nêutrons, para manter os nêutrons energéticos dentro do reator, além de todo um sistema de barras de controle e dispositivos de segurança (PERUZZO, 2012). Na figura 03 podemos ver um esquema que representa uma reação em cadeia de fissão de urânio, e alguns subprodutos.

É importante notar, que dentre as muitas equações nucleares possíveis, a massa dos reagentes é sempre menor que a massa dos produtos, e essa diferença de massa é liberada na forma de energia térmica, através da equação $E=mc^2$. Se pudermos aproveitar essa energia térmica, e construirmos uma usina termelétrica convencional, caracterizamos os princípios básicos de uma usina term nuclear.

Figura 03 - Reação em cadeia.



A imagem representa uma reação em cadeia da fissão do urânio-235, perceba que há mais subprodutos que os indicados na equação. Fonte:

<https://wikiciencias.casadasciencias.org/wiki/index.php/Ficheiro:Rea%C3%A7%C3%A3o_em_cadeia_ur%C3%A2nio.jpg>. Acesso em: 31/06/2024.

3.2.3 As Usinas: Como o Urânio Enriquecido produz energia?

Dada uma amostra suficientemente grande de combustível nuclear, para que uma reação em cadeia se torne sustentável, ela precisa produzir mais nêutrons do que se perde. Nêutrons têm um tempo de vida muito curto antes de decair, e muitos podem se perder do meio (escapar) ou atingir núcleos sem provocar fissão, para manter um reator em atividade, é necessário manter a reação em cadeia controlada. Um conceito muito importante é a *criticalidade*, se a reação em cadeia, produz a mesma quantidade de nêutrons que se perdem do meio, se diz que se alcançou o regime crítico, que é o objetivo no interior dos reatores comerciais, assim produzem energia a uma potência constante. Ao contrário, o regime pode ser *subcrítico*, de forma que a reação em cadeia não se mantém, ou *supercrítico*, produzindo energia a potências cada vez mais altas, no caso de um reator, este regime exige cuidado para se evitar o superaquecimento e o derretimento do núcleo. Para isso a definimos o *coeficiente de criticalidade* ou *número crítico* k , de tal forma que o número $n(x)$ de nêutrons livres em cada etapa x da reação é dado por:

$$n(x) = k^x, x = 1, 2, 3... \quad (2)$$

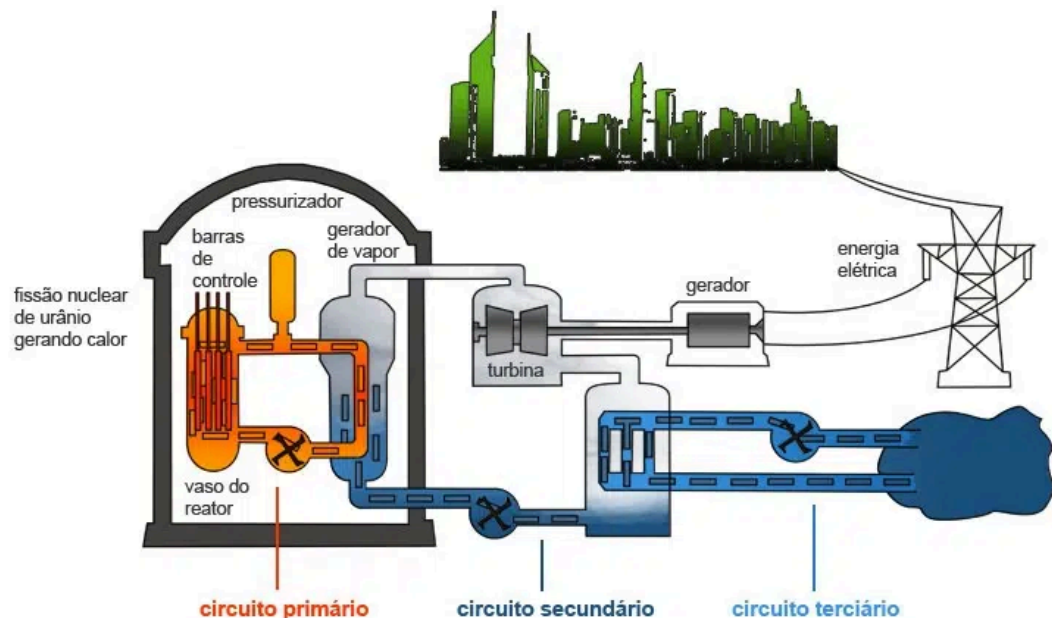
Para controlar a reação, e manter o reator no regime crítico ($k=1$), se utilizam *elementos moderadores de nêutrons*, estes moderadores servem para reduzir a energia desses nêutrons, de modo a controlar o escape de nêutrons e a taxa de reação. Os nêutrons provenientes de fissões de urânio, são nêutrons rápidos, com energia da ordem de 1 Mev, enquanto que para fissionar o U-235, os nêutrons térmicos são mais eficientes. Apesar de que reduzir a energia desses nêutrons seja fundamental para aumentar a eficiência da reação, o excesso de elemento moderador no meio pode frear a reação, por absorção desses nêutrons. Um exemplo comum de elemento de moderador é a água, há reatores de água leve e de água pesada. Também há o uso de grafite, entretanto, são mais comumente usados como barras de contenção ou hastes de controle, a fim de frear a reação, para hastes de controle também é comum o uso de Boro ou Cádmiio.

Os reatores utilizados em Angra 1 e 2 são do tipo PWR (Pressurized Water Reactor), e utilizam água como moderador e fluido refrigerador, ao mesmo tempo. O reator se encontra dentro do *vaso de contenção*, com paredes de 70 cm de concreto

armado. No interior do reator ficam as *barras de combustível*, com pastilhas de urânio enriquecido (cerca de 3,5%) submersas em água pressurizada (150 atm) para alcançar altas temperaturas sem evaporar, essa água do circuito primário, entra em contato com o elemento combustível e é radioativa. As *barras de controle*, se ajustam para controlar a taxa de reação e em caso de queda de energia elas caem por ação da gravidade no interior do reator, freando o reator e desligando a usina. A água pressurizada do circuito primário, entra no reator a 290°C, onde é aquecida até 350°C, e é levada por dutos até um pressurizador, onde ela sai a uma pressão e temperaturas mais baixas, essa água do circuito primário resfriada, então troca calor com a água do circuito secundário, esfriando ainda mais. Não há contato entre as águas, e a água do circuito primário não sai dele, de nenhuma forma! A água do circuito secundário, evapora no *gerador de vapor* com o calor recebido do circuito primário, e gira as turbinas que alimentam o *gerador*.

A figura 04 mostra o esquema geral de uma central termonuclear, o esquema mostra os componentes citados acima, e destaca os três circuitos isolados de água na central.

Figura 04 - Esquema geral de uma central termonuclear.



Fonte: <<https://engenharia360.com/como-funcionam-os-reatores-nucleares/>>. Acesso em: 31/06/2024.

O vapor de água no interior do circuito secundário, será condensado perdendo o calor necessário para a mudança para fase líquida novamente, para um circuito terciário. Nenhum dos circuitos, troca material entre si e o circuito terciário é o único em contato com o ambiente. No esquema apresentado na figura 04, a água é retirada e devolvida para o mesmo reservatório natural (lago ou o mar), o que pode levar a um aumento de temperatura nesse ambiente, com impactos para a vida marinha. No caso de Angra, a água é retirada do mar, e antes de ser devolvida ela é levada para piscinas de resfriamento, a fim de reduzir essa variação de temperatura. A água no interior dos circuitos primário e secundário nunca saem de seus circuitos. (PERUZZO, 2012)

No interior do reator, a cada 3 anos o elemento combustível se torna exaurido e exige uma manutenção periódica, segundo a INB²⁴ anualmente cerca de $\frac{1}{3}$ do elemento combustível é substituído por um novo. O elemento combustível exaurido, agora é lixo nuclear, radioativo e precisa de um tratamento cuidadoso.

As usinas de tipo PWR , que descrevemos aqui, são as mais utilizadas no mundo, mas existem muitos outros tipos de usinas. Apenas para citar alguns exemplos, o reator de água fervente (BWR), permite a fervura da água no circuito primário, esse sistema é baseado no PWR e também utiliza urânio enriquecido a cerca de 3,2%, 3,5%, porém é mais eficiente que seu antecessor. Apesar que o controle das hastes de contenção dependem de energia elétrica, e não desligam o reator imediatamente em caso de falhas, exigindo sistemas mais complexos de segurança. O CANDU (Canada Deuterium Uranium) é um sistema que utiliza água pesada como moderador e água fria como refrigerador, existem poucas unidades no mundo e possuem a vantagem que pode ter o elemento combustível trocado sem parar o seu funcionamento, em geral reatores de água pesada são mais eficientes que os de água leve, e podem funcionar com urânio convencional, inclusive urânio empobrecido, com concentrações de tório e plutônio. Há também os antigos reatores com canais de potência (RBMK), um dos projetos soviéticos, famoso pelo acidente de Chernobyl. Os reatores com este projeto passaram por adaptações de segurança depois do acidente, e existem alguns em funcionamento até hoje. Apesar de

²⁴ Disponível em:

<<https://www.inb.gov.br/Contato/Perguntas-Frequentes/Pergunta/Conteudo/qual-o-tempo-de-utilizacao-de-um-elemento-combustivel?Origem=1068>> Acesso em: 30/06/2024.

precisarem de pouco urânio enriquecido e ter um custo baixo de manutenção, as instalações são pouco seguras a acidentes e desastres naturais, e produzem grande quantidade de plutônio, subproduto que pode ser processado e reutilizado em usinas de plutônio ou na produção de armas nucleares. Além dos citados, existem uma variedade de reatores de nêutrons rápidos (Fast Reactors), esses reatores são resfriados com metais líquidos e podem queimar uma variedade maior de combustíveis, os reatores LMFBR, que são exemplos desse tipo de reator, consomem o U-235 e Pu-239, ao mesmo tempo que convertem Th-232 em U-233 e U-238 em Pu-239. Esses reatores, além de dar uso ao plutônio, subproduto de outros reatores, também transformam isótopos não-físseis em isótopos físseis.

3.2.4 A segurança e o lixo nuclear

Rejeito radioativo, segundo as normas da CNEN é todo e qualquer material resultante de atividades humanas, e que contenha radionuclídeos em quantidades superiores às estabelecidas pela norma (CNEN-NE-6.02), que podem ser classificados de acordo com *o estado físico a temperatura ambiente, a potência de radiação emitida, concentração, tempo de meia-vida e outros critérios*. Os rejeitos radioativos podem ser hospitalares, industriais ou mesmo provenientes de usinas termonucleares, sendo esses rejeitos formados por materiais contaminados (luvas, máscaras, roupas de proteção e equipamentos que tiveram contato com material radioativo) ou subprodutos das reações nucleares. Como esses rejeitos podem apresentar radiação, seu transporte, destino e alocação devem ser cuidadosamente planejados e no Brasil são de responsabilidade exclusiva da CNEN²⁵.

Um reator típico de 1.000 MW de potência produz entre 20t e 30t por ano de lixo nuclear, sendo este principalmente combustível queimado. A atividade radioativa por tonelada deste material é de 180.000.000 Ci, apenas para comparação, as bombas de Hiroshima e Nagasaki liberaram cada uma 1.000.000 Ci, enquanto o acidente de Chernobyl liberou 50.000.000 Ci no ambiente (PERUZZO,2012). A exposição à radiação é extremamente perigosa e prejudicial a saúde e ao meio ambiente, por se tratarem de alguns átomos irradiando, essa contaminação pode se

²⁵ Disponível em:

<<https://www.gov.br/cnen/pt-br/assunto/pesquisa-desenvolvimento-e-ensino-na-area-nuclear/armazenamento-de-rejeitos-radioativos>>. Acesso: 01/07/2024.

disseminar pelo ar, e dependendo da exposição de um humano pode causar tontura, vômitos, feridas na pele e pode levar a morte, bem como problemas de longo prazo como a formação de câncer.

Dentre os rejeitos produzidos por uma usina nuclear, há aqueles de baixa e média potência irradiada, que são estocados em locais blindados, para esperar que essa radiação se reduza naturalmente, através do decaimento radioativo, para que quando atinja níveis seguros, possa ser descartado. Já os rejeitos de alta radioatividade, formados principalmente por combustível nuclear exaurido, compostos de U-238 (94,3%), U-235 (0,81%), U-236 (0,51%), Pu-239 (0,52%), Pu-240 (0,21%), Pu-243 (0,10%), Pu-242 (0,05%) e de outros produtos da fissão (3,5%), estes precisam ser isolados e sepultados em grandes recipientes com paredes grossas de concreto ou chumbo, para não haver risco de vazamentos para o ambiente externo.

Alguns subprodutos da fissão nuclear tem meia-vida extremamente longos, como o Pu-239 (24.000 anos), I-129 (16.000 anos), Cs-135 (2.300 anos), Zr-93 (1.500 anos), Se-79 (1.100 anos), Tc-99 (210 anos), Cs-137 (30,1 anos) e Sr-90 (29,1 anos). Cerca de dez anos após o material armazenado, a atividade radioativa é dominada pelos isótopos Cs-137 e Sr-90, ambos solúveis em água, o que agrava o risco de contaminação (PERUZZO, 2012). O índice de perigo é determinado, comparando todos os produtos radioativos presentes no lixo radioativo, com o mesmo volume de minério de urânio. No início da estocagem, o lixo é cerca de 1.000 vezes mais perigoso que o minério de urânio, com o decorrer do tempo esse índice diminui, e pode chegar a 1% de seu valor inicial em até 100 anos. Na prática, se busca estocar esse material de forma definitiva, entretanto, alguns defendem que deve haver a possibilidade de recuperação deste material no futuro, em caso de se tornar viável sua reutilização.

Hoje existem uma série de possibilidades de reutilização de combustível nuclear. A reutilização de combustível nuclear geralmente ocorre em reatores especiais, iniciou-se na década de 1960 com reatores de nêutrons rápidos (Fast Reactors) e com a utilização de MOX (Mixed Oxide Fuel) como combustível, que é uma mistura de óxidos de urânio empobrecido e plutônio extraídos do combustível exaurido após poucos anos de armazenamento. Há diversas técnicas de reutilização e que são capazes de reduzir enormemente a quantidade e o volume de rejeitos de

alto nível de radiação. Os diferentes países dominam distintas técnicas (VAZ DE MELO, et. al. 2016). Os países que possuem reatores capazes de queimar misturas e preparados com MOX são França (22 reatores), Alemanha (10 reatores), Japão (5), Suíça (3), Bélgica (2), Holanda (1) e Estados Unidos (1)²⁶. Se pode extrair do combustível reprocessado cerca de 25% a 30% de energia extraída do elemento combustível original²⁷. Atualmente esse processo ainda é muito caro, e por isso não é adotado pela maioria dos países que preferem estocar, postergando essa questão.

Alguns países estocam esse combustível exaurido em cavernas ou em estoques subterrâneos, os EUA, por exemplo, têm um projeto com uma série de túneis subterrâneos com capacidade para abrigar até 70.000 toneladas de combustível exaurido. Até o começo deste ano, todo o combustível nuclear exaurido era estocado por *via úmida*, em piscinas em Angra do Reis, próximas ao reator. As piscinas cobrem o material e isolam a radiação do ambiente externo, e é importante que o material fique lá tempo o suficiente para que a radiação diminua até valores seguros para o transporte.

Este ano, deu-se início à primeira fase de transporte de combustível de Angra 2 para a Unidade de Armazenamento Complementar a Seco de Combustível Irrradiado (UAS), onde são blindadas em grandes tonéis de aço, preenchidos com concreto. O combustível de Angra 1, está previsto para ser transportado em 2025 e 2026²⁸.

²⁶ Disponível em:

<<https://www.orano.group/china/en/our-stories/mox-recycling-nuclear-energy>>. Acesso em: 02/07/2024.

²⁷ Disponível em:

<<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/processing-of-used-nuclear-fuel>>. Acesso em: 02/07/2024.

²⁸ Disponível em:

<<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2024-06/espera-de-angra-3-energia-nuclear-no-brasil-quer-se-mostrar-segura>>. Acesso em: 02/07/2024.

4. ENCAMINHAMENTOS FINAIS

O Ensino de Física envolve diversas questões interdisciplinares, e uma abordagem comprometida com o PLACTS tem o desafio de contemplar questões complexas de diversas áreas do conhecimento. Acreditamos ser importante apresentar a pesquisa científica brasileira e introduzir como princípio a valorização da ciência brasileira. No contexto da FN, o tema da geração de energia é especialmente caro ao Brasil, e acreditamos que o funcionamento de usinas deve ser um tema central.

O Ensino de FN desperta uma série de discussões que usualmente são do interesse dos jovens. Geralmente eles já apresentam alguma concepção sobre o assunto, isso porque é um tópico amplamente difundido nas mídias de comunicação, na cultura popular e no imaginário coletivo. Muitas vezes o tópico é abordado no cinema, em seriados, produções culturais diversas e noticiários, com um tom alarmista e com um *enfoque nas tragédias dos acidentes nucleares, riscos de armas nucleares, os custos e riscos do armazenamento e de lixo nuclear e nos impactos negativos da radiação para a saúde e o ambiente*. Raramente se discute na opinião pública *a pesquisa científica brasileira, seus feitos, sua projeção, seus planos, o potencial do Brasil em recursos e sua expertise técnica*. E como discutimos antes, o Ensino de Física no Brasil segue tendência similar.

Este trabalho tem um enfoque maior sobre o currículo que sobre metodologia, entretanto a estratégia dos 3MP (DELIZOICOV, et. al. 2007, LEONEL, 2015 e ABREU, et. al. 2017) pode se mostrar interessante, pois surgirão naturalmente diversas questões com as quais o estudante teve contato ao longo da sua trajetória, que ao mesmo tempo em que contribuem com a problematização inicial, instigam a construção de novos conhecimentos, potencializando a participação mais ativa dos estudantes ao longo do processo de ensino-aprendizagem e o engajamento público com questões de CT.

Acredito que para alcançar a ACT e capacitar o cidadão para refletir sobre questões relativas à Energia Nuclear, é fundamental compreender a questão das usinas nucleares na sua totalidade, evitando-se a dicotomia “é bom ou é ruim” expressando a complexidade da questão, bem como discutir o seu papel na transição energética e na redução da emissão de gases do efeito estufa.

É importante destacar que todas as questões trazidas na seção 3 exigem um conhecimento de Física, mas também de Química, Biologia, Geografia História, Economia e outros, pensando que propomos reflexões relativas ao Ensino de Física, acreditamos ser útil indicar possíveis conhecimentos prévios e sugerir possibilidades de temas, que podem ser mais explorados.

Devido a complexidade dos temas e diversidade de discussões transversais, é sugerido o nível de 3º ano do Ensino Médio. Seria interessante que esse ano letivo fosse dividido em duas unidades, uma de Eletromagnetismo e outra de Física Moderna, com tempo previsto muito próximo ou iguais para os conteúdos de cada unidade, em especial sugerimos que alguns tópicos tenham sido previamente trabalhados.

Sugerimos a inserção desse conteúdo no 3º ano, principalmente, pelo conhecimento prévio dos conteúdos de Física tradicionalmente trabalhados no 1º e 2º anos, como fundamentos de mecânica, termodinâmica, óptica e ondas, enquanto o planejamento do 3º ano precisa ter um enfoque maior em tópicos de Física Moderna. Apesar disso, é interessante que a FMC esteja presente ao longo da trajetória escolar do estudante, para que esteja familiarizado com alguns fenômenos, a fim de uma compreensão mais completa e atual da Física.

Em especial, espera-se que o estudante tenha tido contato prévio com *modelos atômicos*, conteúdo onde se pode apresentar “*experimentos históricos*”²⁹ para a introdução desses modelos, como por exemplo: O *experimento de Thomson* da descoberta do elétron, *experimento de Rutherford* com bombardeio de partículas Alfa, e a descoberta do Núcleo, a discussão sobre a existência de partículas elementares e a hipótese do próton, bem como o problema da estabilidade do átomo de Rutherford precisa ser abordada. Esse experimento é uma ótima oportunidade para se introduzir o conceito de *seção de choque*, bem como discutir a hipótese do nêutron e o experimento de Chadwick. A questão da estabilidade do núcleo pode ser discutida ao introduzir a Física Nuclear, mas é interessante a introdução deste problema antes de se discutir a hipótese do nêutron. Já a estabilidade do átomo,

²⁹ Não se trata aqui de defender a *concepção* de “experimentos cruciais”, e sim de fazer referência aos experimentos tradicionalmente associados à “descoberta” de determinadas partículas. Experimentos são dependentes de teoria e cada uma dessas revoluções científicas tiveram seus contextos, embates ideológicos e diversos fatores que afetaram o desenvolvimento e consolidação de tais teorias.

será prontamente solucionada com a introdução do modelo de Bohr, com seus níveis de energia.

Em termos de conteúdos específicos da Física, acreditamos que os tópicos sugeridos permitem a introdução do núcleo atômico, bem como colocam em discussão os próprios modelos, permitindo abordar a complexidade do fazer científico e enriquecendo a discussão com experimentos históricos e a discussão de modelos. SOUZA et. al. (2016) apontam cuidados necessários com as analogias utilizadas e concepções alternativas que podem surgir a partir de um mau uso dessas analogias.

Também é importante compreender os tipos de radiação eletromagnética, a descoberta dos Raios-X e a distinção entre radiação ionizante e não ionizante, além de efeitos biológicos da radioatividade, entre outros. Apesar de que esses tópicos também podem ser apresentados junto com os conteúdos de FN.

O conceito de energia de ligação é fundamental para a compreensão dos fenômenos que serão descritos nas usinas. É sugerido que seja apresentado o seu conceito no contexto da química molecular, para que, no começo de uma proposta de sequência didática seja feita uma analogia entre a estabilidade do núcleo e das moléculas, para explicar a energia de ligação dos nucleons.

Ao longo de uma sequência poderiam se constatar aproximações com diferentes áreas, o que pode sugerir uma abordagem interdisciplinar em colaboração com outros professores. Primeiramente destacar que os processos do urânio, bem como os impactos trazem muitos conceitos discutidos na disciplina de Química, em especial os conceitos de *isótopos, nuclídeos, número atômico, número de massa e número de nêutrons* serão constantemente utilizados. Na Biologia, pode-se discutir *os efeitos biológicos da exposição à radiação, a questão do lixo nuclear e estudos de caso como os de Chernobyl e Goiânia*. Com a geografia, podemos trazer questões ligadas à *mineração, como a distribuição do urânio e os tipos de minérios em que se encontra*. A história também pode trazer reflexões, o professor pode optar por *apresentar a história FN, o contexto da descoberta da fissão durante a segunda guerra, ou a história da pesquisa em FN no Brasil, e a história do PNB*. Podemos ainda pensar em aproximar-nos de discussões filosóficas sobre *o fim da humanidade, questões sociais e políticas como a instalação de usinas nucleares em diferentes regiões e contextos, discutir a distribuição energética ou a produção de*

armas nucleares, e até discutir a inspeção e fiscalização por parte de organismos internacionais das instalações nucleares de outros países.

Independente da metodologia escolhidos, podemos imaginar uma sequência possível de conteúdos que podem ser trabalhados, como por exemplo: *Emissão de partículas Alfa, Beta e Gama, Reações nucleares e decaimentos radioativos, Relação massa-energia, Isótopos e tabela de núclídeos, Defeito de massa, Fissão e fusão nuclear, Funcionamento básico de uma usina nuclear, Tipos de usina nuclear, Histórico do programa nuclear brasileiro, O PNB e suas instalações, a cadeia produtiva do combustível nuclear, Lixo nuclear, Efeitos biológicos da radiação, A questão militar, Aceleradores de partículas, A questão energética, desenvolvimento social e econômico, Interesses internacionais na pesquisa nuclear e os acordos internacionais.*

Apesar de que esses conteúdos não precisam ter uma sequência rígida, se sugere esta ordem porque alguns conteúdos podem ser mais aprofundados, caso seja fornecida uma boa base dos conteúdos tradicionais de Física Nuclear. A história e as instalações do PNB são conteúdos que estão associados a cadeia produtiva do combustível nuclear, de forma que são quase indissociáveis (para se conhecer as instalações é importante conhecer a cadeia produtiva, e para se conhecer a história, é interessante recorrer às instalações), e após a compreensão do funcionamento da usina, se torna mais relevante discutir a cadeia produtiva do combustível nuclear. O funcionamento das usinas, usualmente é precedido do estudo das reações, e sugerimos também que seja discutido previamente o conceito de criticalidade e defeito de massa, bem como os fenômenos de fissão e fusão. Já o conteúdo relativo aos efeitos biológicos da radiação, não depende tanto de outros conceitos, mas foi adicionado próximo ao final porque dialoga com o conteúdo do lixo nuclear, que remete de novo as instalações do PNB, em especial as unidades de armazenamento. Os interesses estratégicos e geopolíticos em torno da pesquisa nuclear, bem como a questão da transição energética e da necessidade de excedente energético para o desenvolvimento social e econômico, são temas que podem ser contemplados ao longo de toda a sequência, não necessitando de um momento dedicado exclusivamente a eles, mas, preferencialmente, que estejam articulados com os conceitos específicos da Física e com as questões tecnológicas, garantindo uma abordagem dialógica, dentro da perspectiva do PLACTS.

De todas as formas, mesmo que a sequência sugerida não se adeque ao planejamento do professor, esperamos que as discussões aqui trazidas possam colaborar para motivar a discussão da Física Nuclear, enriquecer o debate na sala de aula e trazer elementos para o professor refletir sua prática docente e os conteúdos selecionados. Neste sentido, reforçamos a importância do professor assumir sua autonomia e autoria no planejamento e desenvolvimento das suas aulas, fazendo as adaptações e alterações necessárias.

Ainda existem muitos desafios para o Ensino de FMC no Brasil, mas acreditamos que algumas dessas reflexões possam contribuir para contextualizar o conteúdo e humanizar o Ensino de FN. Estudos futuros poderiam incluir aspectos ligados à física médica ou ainda ampliar as discussões relativas ao tratamento do lixo nuclear, a questão da defesa e abordar com maior profundidade *a geopolítica da pesquisa nuclear*, além de experimentar e analisar a abordagem das questões discutidas ao longo deste trabalho em sala de aula.

Essa aproximação entre o PLACTS, a economia desenvolvimentista e a geopolítica ainda pode suscitar outras contribuições para o Ensino de Física. Na perspectiva da formação cidadã atualizada, temas como: *a introdução do Programa Espacial Brasileiro e a geopolítica do espaço, a Petrobrás e a geopolítica do petróleo, os carros elétricos e a geopolítica do lítio, a Amazônia e a geopolítica do território, as redes sociais e a geopolítica da informação* são exemplos de potencialidades. Em estudos futuros uma análise econômica mais profunda pode ser útil, nesses casos seria interessante considerar também a teoria marxista da dependência (TMD)³⁰ e a crítica a CEPAL.

³⁰ A TMD parte de pressupostos similares aos da CEPAL, contudo critica a solução desenvolvimentista, que previa um pacto social para a industrialização do país. Para a TMD, a dependência é uma condição característica do capitalismo, e a burguesia nacional rejeitaria políticas industriais que desafiem a posição no mercado internacional, impossibilitando o pacto cepalino. O leitor interessado pode buscar (DUARTE, 2021).

REFERÊNCIAS

AULER, D. - **Cuidado! Um Cavalo Viciado Tende a Voltar para o Mesmo Lugar** - Editora Appris - Curitiba - 2018.

AULER, D. e DELIZOICOV, D. - Investigação de temas CTS no contexto do pensamento latino-americano. **Linhas Críticas**, [S. l.], v. 21, n. 45, p. 275–296, 2015. DOI: 10.26512/lc.v21i45.4525. Disponível em: <https://periodici/cos.unb.br/index.php/linhascriticas/article/view/4525>. Acesso em: 15 jul. 2022.

BARROS, P. e PEREIRA, A. - O Programa Nuclear Brasileiro. - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) - **Boletim de Economia e Política Internacional** - n.3, julho de 2010.

BRASIL. Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional, **LDB**. 9394/1996. BRASIL. Lei n. 9.424, de 24 de dezembro de 1996.

BRASIL. Lei nº 1.310, de 13 de fevereiro de 1951. Diário Oficial da União, 14 de fevereiro de 1951. <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/l1310.htm>

BRASIL, Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+). Ciências Humanas e suas tecnologias. Brasília: MEC, 2006. Nacionais (PCN+).

BRASIL. Plano Nacional de Educação (PNE). Lei Federal n.º 10.172, de 9/01/2001. Brasília: MEC, 2001.

BRASIL. Plano Nacional de Energia 2050 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2020

BRITO, A. e ALHO, K. - Educação para as Relações Étnico-Raciais: Um Ensaio Sobre Alteridades Subalternizadas nas Ciências Físicas - **Ensaio • Pesquisa em Educação e Ciências** | Volume 24 | Belo Horizonte | 2022.

CAMPOS, Patrick. - **Tópicos de Ensino de Física Nuclear para o Ensino Médio**. - Orientadora: Sônia Maria Corrêa de Souza Cruz. 2018, 47p, TCC (graduação). UFSC, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Departamento de Física, Florianópolis, 2018.

CORRÊA, D. e LUEDEMANN, M. - Revolução Colorida e Golpe de Estado no Brasil - **Geosul – Dossiê de Geopolítica**, Florianópolis, v. 38, n. 86, p. 242-260, mai. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2023.e89963>

DAGNINO, R. - A Anomalia da Política de Ciência e Tecnologia - **REVISTA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS SOCIAIS** - Vol. 29 N° 86 - São Paulo - SP - 2014.

DARROZ, L.; ROSA, C.; SILVA, J. - Análise da Abordagem de Física Nuclear nos Livros Didáticos de Física - **Revista de Educação, Ciências e Matemática** - v.7 n.3 set/dez 2017.

DELBEN, D. - Reforma Neomalthusiana e Movimento Ambientalista: População e Meio Ambiente - **REVISTA GEONORTE**, Edição Especial 3, V.7, N.1, p.575-589, 2013. (ISSN –2237-1419)

DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. e PERNAMBUCO, M. - **Ensino de Ciências: fundamentos e métodos**. 2 ed. São Paulo. Ed. Cortez. 2007.

DUARTE, P. - Teoria marxista da dependência: a contribuição teórica de Ruy Mauro Marini - **Nova Economia**, Faculdade de Ciências Econômicas, UFMG, v.31 n.1 p.131-156 2021

FREIRE, P. - **Pedagogia da autonomia: Saberes necessários à prática educativa**. 57ª. ed. São Paulo: Paz e Terra, 2018.

FREIRE, P. - **Pedagogia do oprimido**. 54º ed. Paz e Terra, Rio de Janeiro, 2013.

GALEANO, E. - **Las venas abiertas de América Latina**. 23a ed. 2º reimp. - Catálogos, Buenos Aires, Argentina. 2005.

GOULART, G. e LEONEL, A. - Revisão da Literatura sobre o Ensino de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio sob a Ótica da TAS: Problemas emergentes a partir de eventos brasileiros de Ensino de Física. - **Revista Dynamis**. FURB, Blumenau, v.28, N.1, 2022.

HERRERA, A. - **Ciencia y política en América Latina**. 1º ed. Buenos Aires: Biblioteca Nacional, 2015.

KUHN, T. - **A Estrutura das revoluções científicas**. 2. ed. São Paulo: Perspectiva, 2013.

LEONEL, André Ary. **Formação Continuada de Professores de Física em Exercício na Rede Pública Estadual de Santa Catarina: Lançando um Novo Olhar Sobre a Prática**. 2015, 411p. Tese (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica). Centro de Ciências Físicas e Matemáticas. Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

LEONEL, A. - **Nanociência e nanotecnologia em ação: Uma proposta de Ilha Interdisciplinar de racionalidade com tópicos de Física Moderna e Contemporânea**. - 1º ed. - Editora Appris - Curitiba, 2020.

MARINI, R. - Dialética da Dependência - **Revista Latinoamericana de Ciências Sociales, Flacso**, Santiago de Chile, nº 5, junho 1973. Versão digitalizada conforme publicado em "Ruy Mauro Marini: Vida e Obra", Orgs. Roberta Traspadini e João Pedro Stedile, Editora Expressão Popular, 2005. Disponível em:

<<https://www.marxists.org/portugues/marini/1973/mes/dialetica.htm>> Acesso em: 12/08/2024.

MARTINS, I. - Revisitando orientações CTS|CTSA na Educação e no Ensino das Ciências. - **Revista APEDuC**. - Investigação em Educação em Ciências, Matemática e Tecnologia. - Portugal - 2020.

MENEZES, L. C -. Novo (?) Método (?) para Ensinar (?) Física (?). - **Revista de Ensino de Física**, vol. 2 n. 2, maio de 1980.

NIDELCOFF, M. - **¿Maestro pueblo o maestro gendarme?** - 2° ed. - Biblioteca popular de Rosário - Rosário - Argentina - 1975.

OLIVEIRA, F.; VIANNA, D.; GERBASSI, R. - Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores - **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 3, p. 447-454, 2007.

PATTI, C. - O programa nuclear brasileiro entre passado e futuro. - **Boletim Meridiano 47 vol. 14, n. 140**, nov.-dez. 2013 [p. 49 a 55]

PENA, F. - Carta ao editor: Por que, nós professores de Física do Ensino Médio, devemos inserir tópicos e idéias de física moderna e contemporânea na sala de aula? - **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 1 – 2 - 2006.

PEREIRA, A. e OSTERMANN, F. - Sobre o Ensino de Física Moderna e Contemporânea: Uma Revisão da Produção Acadêmica Recente - **Investigações em Ensino de Ciências – V14(3)**, pp. 393-420 - Porto Alegre - RS - 2009.

PINHEIRO, N.; e SOUZA, L. - **A Construção da Tese Centro-Periferia no Pensamento Cepalino**. - In: **7ª Conferência Internacional de História Econômica e IX Encontro de Pós Graduação em História Econômica** - 2018 - Ribeirão Preto, São Paulo. Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo.

PINHO, A. J. - **Instrumentação para o Ensino de Física A** – Florianópolis : UFSC/EAD/CED/CFM, 2010.

POLANCZKI, C. e ARAUJO, M. - **O Enfoque CTSA no contexto educacional: Ampliando a participação através da abordagem temática**. In: **XXII Jornada de Pesquisa**. 2017. Salão do Conhecimento.

PREBISCH, R. - O Desenvolvimento Econômico da América Latina e Alguns de seus Problemas Principais - In: **CEPAL, Boletín económico de América Latina**, vol. VII, nº 1, Santiago do Chile, 1962. Publicação da Organização das Nações Unidas, nº de venda: 62.II.G.I.

SCHERER, Caroline. - **Revoluções Coloridas na Sérvia, Geórgia, Azerbaijão e Bielorrússia (2000-2006): Promoção à Democracia ou Mudança de Regime?** - Orientador: Carlos Schmidt Arturi. 2015, p.70. TCC (graduação). UFRGS, Faculdade de Ciências Econômicas, curso de relações internacionais.

SILVEIRA, F. e LEONEL, A. - Reflexões sobre o ensino de física e a educação em direitos humanos a partir dos eventos que contemplam a área de pesquisa em ensino de física. - **ALEXANDRIA - Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**. - Florianópolis - v. 15 n. 1, p. 333 - 355 junho 2022.

SOLBES, J. e VILCHES, A. - **Preparación para la toma de decisiones y relaciones CTSA**. In: **VII CONGRESO DE ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS**. 2005. Número Extra. Valencia.

SORPRESO, T.; SILVA, R.; LIMA, M.; LONDERO, L. - Abordagem CTS da Energia Nuclear na Educação de Jovens e Adultos. 2017. **X Congreso Internacional sobre Investigación em Didáctica de las Ciencias**. Sevilla.

STRIEDER, R. e KAWAMURA, M. - Educação CTS: Parâmetros e Propósitos Brasileiros - **ALEXANDRIA - Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**. - Florianópolis - v.10, n. 1, p. 27-56, maio 2017.

TENNENBAUM, J. - **Energia Nuclear: Uma tecnologia feminina**. - 2° ed. Capax Dei, Rio de Janeiro, 2007.

TREVISANO, Rodrigo; RODRIGUES, Laís. - Contra-hegemonia e direitos humanos: Um caminho possível na construção de uma educação emancipatória. - In: **Conteúdos Cordiais: Física Humanizada para uma Escola sem Mordça**. - 1° ed. São Paulo: Livraria da Física, 2021. p. (61) - (78).

VAZ DE MELO, C.; VELASQUEZ, C. e PEREIRA, C. - **Nuclear Fuel Reprocessing Options** - In: **Terceira Semana de Engenharia Nuclear e Ciências das Radiações - SENCIR 2016** - Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais. 2016. Belo Horizonte.