

Campus Volta Redonda

Mestrado Nacional Profissional
em Ensino de Física

Adriano de Sousa Sá

*Quebra espontânea de
simetria e mecanismo
de Higgs: uma
abordagem a partir
dos osciladores
harmônico simples e
anarmônico*

Volta Redonda

2022



ADRIANO SÁ

Quebra espontânea de simetria e mecanismo de Higgs: uma abordagem a partir dos osciladores harmônico simples e anarmônico

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Franklin Balthazar
Coorientador: Prof. Dr. José Abdalla Helayël-Neto

Volta Redonda - RJ

2020

ADRIANO SÁ

Quebra espontânea de simetria e mecanismo de Higgs: uma abordagem a partir dos osciladores harmônico simples e anarmônico

Orientador: Prof. Dr. Wagner Franklin Balthazar

Coorientador: Prof. Dr. José Abdalla Helayël-Neto

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada em (dia) de (mês) de (ano).

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wagner Franklin Balthazar – IFRJ

Prof. Dr. Nelson Studart Filho – UFABC

Prof. Dr. Paulo Victor dos Santos Souza – IFRJ

Volta Redonda - RJ

2020

Sá, Adriano de Souza.

S111q

Quebra espontânea de simetria e mecanismo de Higgs: uma abordagem a partir dos osciladores harmônicos simples e anarmônicos. / Adriano de Souza Sá. -- RJ: Volta Redonda, 2022.

147 f.: il.: Color.

Orientador: Prof^o. Dr, Wagner Franklin Balthazar
Coorientador: Prof^o Dr, José Abdalla Helayël-Neto

Dissertação (Mestrado) apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal Fluminense e do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, Volta Redonda, 2022.

1. Física 2. Educação – Instrumentos I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, Volta Redonda II. Universidade Federal Fluminense III. Balthazar, Wagner Franklin IV. Helayël-Neto, José Abdalla V. Título.

CDU 537

Dedico essa obra aos meus saudosos avós, em especial ao meu avô Adriano de Sousa. Também dedico a minha saudosa e fiel escudeira Dercy.

AGRADECIMENTOS

Quero primeiramente agradecer aos meus orientadores: Dr. Wagner Franklin Balthazar e Dr. José Abdalla Helayël-Neto. Penso que a vida é uma constante interação com o mundo e ter ao meu lado pessoas que me inspiram, torna mais fácil as batalhas enfrentadas no trabalho.

Professor Helayël: cientista e ser humano único. Personificação da fraternidade e do conhecimento. Conviver com ele é compreender a vida que vale a pena ser vivida.

Professor Wagner: foi com quem tive meu primeiro contato mais próximo no MNPEF. Um homem calmo, prestativo e atencioso. Desequência didática e o início senti admiração pela maestria com a qual conduzia suas aulas de Mecânica Quântica. Quero um dia ter metade da sua didática.

A vida é um aglomerado de instantes únicos, virginais e irrepitíveis, por isso tento sempre me atentar ao que está acontecendo a cada momento, afinal, isso é tudo que existe, é tudo que temos. O passado só existe na memória, o futuro é uma mera projeção que nunca ocorre como esperamos. Sendo assim, o que me resta é aproveitar essa breve passagem por esse pequeno planeta, para de alguma forma ajudar o próximo seguindo a mais bela lição de Jesus de Nazaré. Para, também, conhecer a mim mesmo como recomenda Platão e dessa forma poder me tornar quem sou, como aconselha Nietzsche.

Preciso deixar claro que entre pensar, sentir e agir há um abismo, e muitas vezes se torna difícil trilhar nossos caminhos. Se hoje sou quem sou; se hoje estou aqui; se hoje tenho desejo de continuar firme em busca de meus objetivos, devo agradecer a todos aqueles que estão sempre ao meu lado. Primeiramente, agradeço também minha mãe Clarice Maria de Sousa Arêdes, que é pra mim a pessoa mais importante do mundo. Meu pai João Bosco de Sá pelo companheirismo de sempre. Meus familiares e amigos pelo apoio nos momentos difíceis e por me proporcionar bons momentos de alegria que foram essenciais para me revitalizar e continuar sempre firme.

“Eu acho que é uma peculiaridade minha gostar de brincar com equações, apenas procurando por belas relações matemáticas que talvez não tenham qualquer significado físico. Às vezes elas tem.”

(Paul Dirac)

RESUMO

Sequência Didática para Ensinar Quebra de Simetria no Ensino Médio a partir dos Osciladores Harmônico e Deformado

Adriano de Sousa Sá

Orientador: Prof. Dr. Wagner Franklin Balthazar

Coorientador: Prof. Dr. José Abdalla Helayël-Neto

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal Fluminense no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física

Esse é um trabalho desenvolvido por meio de uma Pesquisa Baseada em Design (PBD), onde apresentamos um tema avançado e de grande relevância para Física: a quebra espontânea de simetria, fundamental para o chamado Mecanismo de Higgs, numa linguagem adequada ao ensino médio. Nesse sentido, buscamos explicar o mecanismo de Higgs, a partir da analogia entre Osciladores Harmônico simples (OHS) e Anarmônico (OA). Iniciamos a partir do OHS para abordar um sistema físico simétrico, ou seja, com potencial parabólico e que oscila em torno da origem. Em seguida, abordamos o OA, cujo potencial tem um termo adicional de x^4 , se comparado com o potencial do OHS. Na sequência, discutimos como a massa física do bóson de Higgs surge a partir da oscilação da coordenada oscilatória de Higgs, aqui desempenhando o papel do campo de Higgs. Na tentativa de facilitar o processo de aprendizagem, tornando mais visual, propomos o uso de simulação computacional, utilizando o software Modellus, para estudar a energia potencial dos osciladores. Isso

também contribuiu para aumentar o protagonismo do aluno e colocá-lo como personagem ativo no processo de aprendizagem.

Palavras-chave: Ensino médio, osciladores, quebra espontânea de simetria, campo de Higgs, mecanismo de Higgs, modellus.

Volta Redonda

Julho de 2020

ABSTRACT

Adriano Sá

Orientador: Prof. Dr. Wagner Franklin Balthazar

Coorientador: Prof. Dr. José Abdalla Helayël-Neto

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal Fluminense no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

This is a work developed through a Design-Based Research (DBR), where we present an advanced theme of great relevance to Physics: the spontaneous symmetry breaking, fundamental for the so-called Higgs Mechanism, in a language suitable for high school. In this sense, we seek to explain the Higgs mechanism, from the analogy between Simple Harmonic (OHS) and Anharmonic (OA) Oscillators. We started from the OHS to approach a symmetrical physical system, that is, with parabolic potential and that oscillates around the origin. Next, we look at OA, whose potential has an additional term of x^4 compared to the potential of OHS. Next, we discuss how the physical mass of the Higgs boson arises from the oscillation of the Higgs oscillatory coordinate, here playing the role of the Higgs field. In an attempt to facilitate the learning process, making it more visual, we propose the use of computer simulation, using the Modellus software, to study the potential energy of oscillators. This also contributed to increase the student's protagonism and place him as an active character in the learning process.

Keywords: High school, oscillators, spontaneous symmetry breaking, Higgs field, Higgs mechanism, modells.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. Sequência Didática	19
2.2. Pesquisa Baseada em Design	21
2.2.1. Definição do Tema e dos princípios de design	25
2.2.2. Design	26
2.2.3. Aplicação	26
2.2.4. Avaliação	27
2.2.5. Re-design	27
2.3. O Ensino de Física No Brasil	28
2.3.1. Física moderna e contemporânea no ensino médio	29
2.4. Tecnologia Digital da Informação e Comunicação na Educação (TDIC)	31
3. OSCILADOR HARMÔNICO SIMPLES E ANARMÔNICO	37
3.1. Oscilador Harmônico Simples.....	37
3.1.1. A Energia do Movimento Harmônico Simples	40
3.2. Oscilador Anarmônico	43
3.3. Analogia entre o oscilador anarmônico e o campo de Higgs	47
4. METODOLOGIA.....	51
4.1. Contexto da Pesquisa.....	51
4.1.1 O professor	51
4.1.2 A comunidade escolar	52
4.2. A Pesquisa Baseada em Design e a Construção da Sequência Didática	53
5. PRODUTO EDUCACIONAL E APLICAÇÃO	59
5.1 A Sequência de Ensino	59
5.1.1. Aula 1 - Os osciladores harmônicos e o campo de Higgs	59
5.1.2 Aula 2 - Simulando o OHS	63
5.1.3. Aula 3 - A quebra de simetria a partir do Oscilador Anarmônico	65
5.1.4. Aula 4 - O mecanismo de Higgs	67
5.2 Redesign.....	68
6. APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL	71
6.1. Narrativa da Aplicação	71
6.1.1. Primeira Aula	71
6.1.2. Segunda Aula	74
6.1.3. Terceira Aula	76
6.1.4. Quarta Aula.....	79

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
APÊNDICE A - ORIENTAÇÃO PARA O PROFESSOR	85
APÊNDICE B - ATIVIDADE 1	114
APÊNDICE C - ATIVIDADE 2	116
APÊNDICE D - SLIDES UTILIZADOS EM AULA	118
APÊNDICE E - EQUAÇÕES DOS OHS E OA	126
REFERÊNCIAS	139

1. INTRODUÇÃO

Muito se tem discutido sobre um currículo de física mais atual pois em geral os conteúdos de física ficam restritos ao século XIX (MOREIRA e OSTERMANN, 2000). Muitas vezes o conteúdo lecionado não ultrapassa o que foi desenvolvido pelos cientistas até o final do século XVII, basicamente limitando a discussão de Mecânica, Ondas, Óptica Geométrica, Física Térmica e Eletromagnetismo. Como mostram Rezende Junior e Cruz (2009) alguns fatores dificultam a inserção desses tópicos, como a falta de material didático e a formação de professores. Buscando soluções para paradigmas como esses, a academia tem se empenhado, criando cursos de Pós-Graduação voltados para professores da educação básica e, desenvolvendo ao longo das últimas décadas um grande número de trabalhos que visam inserir no ensino médio e fundamental a Física Moderna e Contemporânea (FMC). Como exemplo de bons materiais para aulas de FMC, que abordam os mais diversos tópicos e que tem como público alvo alunos da educação básica, podemos citar: efeito fotoelétrico, laser e emissão de Corpo Negro (VALADARES e MOREIRA, 1998); Física Moderna no Ensino Médio: O espaço-tempo de Einstein em Tirinhas (CARUSO e FREITAS, 2009); Dualidade onda-partícula : uma sequência didática para o Ensino Médio com foco em atividades investigativas (MONICO, 2016); Proposta metodológica sobre o efeito fotoelétrico para o ensino médio (MUNIZ, A. DA SILVA, J. SILVA e NASCIMENTO, 2018); A inserção de física moderna no ensino médio por meios de práticas experimentais e aplicações na astronomia (GARCIA e COSTA, 2014); Como ensinar a Física Moderna no ensino médio (COSTA, 2004); Partículas Elementares no Ensino Médio: uma Abordagem a Partir do LHC (W. BALTHAZAR, 2008), dentre vários outros trabalhos, conforme apontam por Moreira e Ostermann (2000) e Silva e Pinheiro (2020).

Além das discussões sobre temas atuais da física para o ensino médio, outro ponto importante é o próprio ambiente da sala de aula que deve ser conectado à realidade. Nesse sentido, podemos pontuar como um dos motivos para que se contemple a FMC no currículo básico, a necessidade de preparar o estudante para que compreenda o papel da FMC, que está por trás de várias coisas em seu cotidiano. Nesse sentido, a inserção de FMC nas salas de aula do ensino médio reflete a própria necessidade da sociedade que interage cada vez mais com

as novas descobertas da física no seu dia-a-dia, como aponta a competência 3 da Base Nacional Comum Curricular (BNCC)

Investigar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo, utilizando procedimentos e linguagens próprios das Ciências da Natureza, para propor soluções que considerem demandas locais, regionais e/ou globais, e comunicar suas descobertas e conclusões a públicos variados, em diversos contextos e por meio de diferentes mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC) (Base Nacional Comum Curricular, 2018, p. 558).

Além disso, como mostram Silva, Arengi e Lino (2013), podemos destacar a própria mudança de paradigma que a FMC representa para a física e a necessidade desse conhecimento para as relações entre ciência, tecnologia e sociedade.

Dentro dessa tendência de atualização do currículo de física na educação básica, é notável um movimento ainda mais inovador: a Física de Fronteira no Ensino Médio. Pesquisas são realizadas com o objetivo de tornar palpável para os alunos, temas como os que são apresentados nos seguintes trabalhos: Matéria escura no ensino médio (XIMENES e AGUIAR, 2016); Construção de um Website sobre a física dos neutrinos para alunos do ensino médio (SOUZA, 2020); Do átomo grego à Física das Interações Fundamentais (CARUSO e SANTORO, 2012); O mundo das partículas de hoje e de ontem (ALVES, CARUSO, MOTTA e SANTORO, 2012). Não poderia deixar de mencionar ainda o projeto Frontier Projects, cujo objetivo é integrar pesquisa científica de fronteira e pesquisa em ensino e o International Centre for Theoretical Physics - South American Institute for Fundamental Research (ICTP-SAIFR) que visa a Física de Fronteira para a sala de aula, fornecendo materiais traduzidos e minicursos para professores da educação básica, e também dispõe de minicursos para estudantes do ensino médio.

Um tema que aqui se faz necessário destacar é o Bóson de Higgs (Higgs, 1964), detectado experimentalmente em 2012 no Large Hadron Collider (LHC) (Pimenta, Belussi e Natti, 2013). Ele, que é responsável pela origem da massa de algumas partículas, foi a última partícula do modelo padrão a ser detectada. Sua descoberta gerou grande impacto na

academia e na mídia, ficando conhecido como a partícula de Deus. Diversos trabalhos ligados ao Bóson de Higgs foram desenvolvidos nas áreas de ensino e divulgação científica, podemos destacar obras como: Jogo de Física de partículas: Descobrindo o bóson de Higgs (SOUZA, NASCIMENTO, COSTA e FERREIRA, 2018); Uma abordagem do modelo padrão da física de partículas acessível a alunos do ensino médio (MAIA e ALMEIDA, 2011); O Bóson de Higgs na mídia, na Física e no Ensino da Física (MOREIRA, 2017). Podemos também citar livros escritos em linguagem acessível que podem servir como porta de entrada no assunto, para professores do ensino médio, como é o caso das obras: O que são quarks, glúons, bósons de Higgs, buracos negros e outras coisas estranhas? (CARUSO, OGURI e SANTORO, 2012) e Próximas descobertas na Física de Altas Energias (ABREU, OGURI e SANTORO, 2018).

Um tema interessante a se tratar, associado ao bóson de Higgs, é a quebra espontânea de simetria, também conhecida como mecanismo de Higgs, processo esse que está ligado a geração do campo de Higgs que por sua vez, ao acoplar com o bóson, possibilita a interação com certas partículas que dessa forma “ganham” massa.

Nesse trabalho, visamos abordar o mecanismo de Higgs por meio de uma matemática que seja palpável aos alunos do ensino médio. Para isso, fazemos o uso de analogia com osciladores. Partimos do estudo do oscilador harmônico simples (OHS) e damos continuidade aos estudos até o oscilador anarmônico (OA) cuja diferença entre OHS é um termo adicional, proporcional a x^3 , na força descrita pela Lei de Hooke. Esse último oscilador, por sua vez, sofre uma quebra espontânea de simetria, permitindo assim uma analogia com o processo que ocorre com o campo de Higgs, mostrando como surge a massa do bóson de Higgs.

Para tornar a proposta ainda mais acessível, utilizamos o software Modellus que permite simulação dos osciladores harmônico e anarmônico facilitando a comparação entre os gráficos da energia potencial desses dois osciladores e auxiliando na visualização da quebra de simetria que ocorre no OA. O Modellus é um programa que simula sistemas físicos, permitindo criar animações de forma simples. Os alunos podem inserir as equações, parâmetros e condições iniciais do sistema, como se estivesse escrevendo no papel, sem que haja necessidade de conhecimento em programação. Pois se tratar de um tipo de Tecnologia de Tecnologia Digital de Informação e Comunicação (TDIC), esse software se mostra bem alinhado com as novas propostas da BNCC, como vimos na situação anterior nessa mesma seção Ao que indica as TDIC ajudam no que tange o engajamento dos estudantes e a

utilização dessas ferramentas estão em alta, em especial, se tratando do Modellus vários trabalhos estão sendo publicados a respeito, como: Uso da Ferramenta Modellus no Ensino de Física: uma abordagem à luz da Teoria dos Campos Conceituais (ANDRADE, 2015); O uso do software Modellus como ferramenta auxiliar no ensino de física: uma aplicação da cinemática (AMORIM e SANTOS, 2019); A utilização do software Modellus no ensino da Física (MACHADO e COSTA, 2009); O uso do Modellus aplicado ao ensino de física: uma proposta didática para o ensino de oscilações harmônicas (GONÇALVES, CARVALHO e SOUSA, 2018). Por fim, associamos a massa do bóson de Higgs à energia do campo de Higgs através da relação massa-energia.

Para unir todos esses pontos até aqui citados, tornando assim possível o encadeamento do processo de ensino-aprendizagem, elaboramos uma sequência didática, por meio de uma pesquisa baseada em design (Design-based research - DBR). O DBR tem sido uma metodologia muito utilizada em pesquisas no ensino de ciências como podemos ver nos trabalhos: O Percurso Epistemológico dos Saberes e a Equivalência Massa-Energia (KNEUBIL, 2014); Elaboração e análise de Sequências de Ensino-Aprendizagem sobre os estados da matéria (RODRIGUES e FERREIRA, 2011); Estrutura da Matéria na Educação Secundária: Obstáculos de Aprendizagem e o Uso de Simulações Computacionais (PESSANHA, 2014). Uma grande vantagem da DBR aplicada ao ensino, é possibilitar a reaplicação da pesquisa por quantas vezes o pesquisador julgar necessário, podendo assim adaptar o processo em busca do ponto ótimo a ser alcançado.

Portanto, nesse trabalho, realizamos uma DBR que propõe uma sequência didática e verifica a relação ensino-aprendizagem por meio de análise de narrativas, com o objetivo de avaliar todo o processo relacionado ao produto. Queremos assim, averiguar se o produto desenvolvido, aplicado naquele determinado contexto em que foi aplicado, corresponde de forma eficiente ao que se propõe.

Em suma, o trabalho se fez estruturado por capítulos que são apresentados da maneira que se segue:

O capítulo 2, contempla o referencial teórico que fundamenta essa pesquisa. Nele são apresentadas as seguintes seções: 2.1 Sequência didática, em que busca-se apresentar o que é

uma sequência didática e como ela se estrutura segundo diversos autores; Na seção 2.2, falamos sobre a DBR, suas características, aplicações e suas distintas etapas. Em seguida, separamos por subseções cada uma das etapas de uma DBR, tendo como referencial Kneubil e Pietrocola (2017).

No capítulo 3 discutimos a física que está associada aos OHS e OA e consequentemente ao mecanismo de Higgs por meio de um formalismo matemático acessível a estudantes do ensino médio, ou seja, sem a utilização de ferramentas apresentadas apenas no ensino superior.

A metodologia utilizada nesse trabalho, é apresentada no capítulo 4. São descritas as etapas que constituem a sequência didática elaborada. Aqui também é apresentado um resumo bibliográfico do professor-pesquisador e do contexto em que a pesquisa foi aplicada.

No capítulo 5, descrevemos, separando em quatro aulas, as fases de aplicação da sequência didática. São expostos os materiais necessários para cada etapa, o tempo necessário para o desenvolvimento e o conteúdo abordado em cada atividade.

A avaliação da aplicação do produto educacional é apresentada no capítulo 6. Para isso, utilizamos narrativas, que servem como base para uma análise qualitativa dos resultados alcançados.

No capítulo 7, as considerações finais a respeito de todo o processo de pesquisa: os pontos positivos e negativos, as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do trabalho, as implicações do produto e as possibilidades de desenvolvimento de futuras pesquisas, com base no que foi aqui desenvolvido.

Por fim, destacamos que a proposta de abordagem da quebra de simetria e do mecanismo de Higgs para o ensino médio foi publicada na Revista Brasileira de Ensino de Física (Sá, et.al., 2022).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Sequência Didática

Sequência didática é uma série de atividades ordenada e articulada, onde o professor vai organizar sistematicamente atividades que possam levar os alunos a compreensão dos conteúdos, factuais, conceituais, procedimentais e atitudinais de uma determinada unidade didática (ZABALA, 1998). Ainda segundo Zabala (1998, p.18), uma sequência didática tem uma organização, que faz com que o conjunto de aulas que ali estão, se unificam como se fosse uma única aula, onde percurso é trilhado com conhecimento, tendo ciência de onde se sairá e onde chegará. Uma interessante definição é apresentada por Castro (1976 apud Mazeti, 2017, p.37), que compara uma sequência didática a um minicurso.

De acordo com Oliveira (2013) essa forma de ensinar foi criada na França na década de 80, com o objetivo de melhorar o ensino da língua do país, tentando abandonar o ensino fragmentado da disciplina. No início, a proposta não foi muito bem vista, mas com o tempo foi se consolidando e estudos começaram a respeito desse método começaram a surgir. No Brasil, a sequência didática foi aparecer apenas em 1992, também sendo utilizada no ensino do nosso idioma (OLIVEIRA, 2013).

Oliveira (2013), mostra, segundo sua visão, os passos que devem ser adotados para utilização de uma sequência didática, segundo a autora, são eles: escolha do tema, problematização, planejamento de conteúdos, objetivos, determinação da ordem das atividades, considerando o material didático, cronograma, ligação entre as atividades e avaliação. Zabala (1998) diz que uma sequência didática pode ser dividida de diferentes maneiras. Ao pensar em uma sequência didática, é preciso atenção no que será realizado, sempre com foco nos objetivos estipulados no planejamento sem fugir do tema abordado. A forma da sequência didática não segue um padrão pré estabelecido. Separar as atividades em uma organização lógica, tem como objetivo, deixar claro para o professor uma sequência que possa fornecer a aprendizagem ao aluno, sem estabelecer padrões universais.

Para organizar uma sequência didática, deve-se levar em consideração o espaço e o tempo. Tendo como espaço, o ambiente que se faz necessário para realização de tais

atividades. Observando se possui a infraestrutura que necessita, se precisará buscar outro ambiente, se os alunos ficarão agrupados ou em sentados individualmente formando filas. Em relação ao tempo, que quase sempre é escasso, o planejamento deve ser feito de forma que atividades que necessitam de continuidade, como as fases iniciais não sejam fragmentadas (ZABALA, 2010). É importante também conhecer o nível de conhecimento da turma, organizar os conhecimentos prévios, de forma que as atividades possam ser organizadas de uma forma que atenda a necessidade dos discentes, sem fugir da realidade que ali se encontra.

Zabala (1998, p.58) nos traz alguns exemplos de sequências didáticas, aqui é apresentada uma, para melhor elucidar:

1. Apresentação por parte do professor ou da professora de uma situação problemática relacionada com um tema O professor ou a professora desenvolve um tema em torno de um fato ou acontecimento, destacando os aspectos problemáticos e os que são desconhecidos para os alunos. Como na unidade anterior, os conteúdos do tema e da situação que se coloca podem ir de seqüência didática e um conflito social ou histórico, diferenças na interpretação de certas obras literárias ou artísticas, até o contraste entre um conhecimento vulgar de determinados fenômenos biológicos e possíveis explicações científicas;
2. Proposição de problemas ou questões Os alunos, coletiva e individualmente, dirigidos e ajudados pelo professor ou professora, expõem as respostas intuitivas ou suposições sobre cada um dos problemas e situações propostos;
3. Proposta das fontes de informação Os alunos, coletiva e individualmente, dirigidos e ajudados pelo professor ou professora, propõem as fontes de informação mais apropriadas para cada uma das questões: o próprio professor, uma pesquisa bibliográfica, uma experiência, uma observação, uma entrevista, um trabalho de campo;
4. Busca da informação Os alunos, coletiva e individualmente, dirigidos e ajudados pelo professor ou professora, realizam a coleta dos dados que as diferentes fontes lhes proporcionaram. A seguir selecionam e classificam estes dados;
5. Elaboração das conclusões Os alunos, coletiva e/ou individualmente, dirigidos e ajudados pelo professor ou professora, elaboram as conclusões que se referem às questões e aos problemas propostos;
6. Generalização das conclusões e síntese Com as contribuições do grupo e as conclusões obtidas, o professor ou professora estabelece as leis, os modelos e os princípios que se deduzem do trabalho realizado;
7. Exercícios de memorização: Os meninos e meninas, individualmente, realizam exercícios de memorização que lhes permitam lembrar dos resultados das conclusões, da generalização e da síntese;
8. Prova ou exame Na classe, todos os alunos respondem às perguntas e fazem os exercícios do exame durante uma hora;
9. Avaliação A partir das observações que o professor fez

ao longo da unidade e a partir do resultado da prova, este comunica aos alunos a avaliação das aprendizagens realizadas.

É importante mencionar que uma sequência didática não segue um modelo padrão, aqui foi apresentado apenas um, de n modelos possíveis. Um modelo muito conhecido é aqui apresentado por Bini (1977 apud Zabala, 1998), chamado por ele de “circuito didático dogmático”, que podemos, segundo Zabala (1998), associar a “sequência estereotipada do modelo tradicional expositivo”: 1. O professor apresenta a lição; 2. Os alunos estudam de forma individual em seus respectivos livros didáticos; 3. O conteúdo aprendido é repetido, visando a fixação, sem que haja um debate a respeito do mesmo; 4. O docente avalia a aprendizagem atribuindo uma nota.

2.2. Pesquisa Baseada em Design

Nessa seção será analisada a “*design-based research*”(DBR), que de acordo com Peterson e Herrington (2005) surgiu no final do século XX. No português, podemos chamá-la de pesquisa baseada em design (PBD). Mas várias outras nomenclaturas são atribuídas como: Design Experiments (BROWN, 1992); Design Research (REEVES; HERRINGTON; OLIVER, 2005); Development Research (VAN DEN AKKER, 1999).

Como mostram McKenney e Reeves (2013) uma DBR se inicia com a tentativa de solucionar por meio de investigação científica e prática um problema que foi observado. Podemos compreendê-la como uma abordagem onde o pesquisador tem um forte papel intervencionista, podendo fazer uso de métodos flexíveis, porém seguindo um processo bem desenhado, que no final fornecerá dados que indicarão se o objetivo proposto foi alcançado, e que deverá ser otimizado e repetido, buscando um ponto ótimo para o produto final.

Kneubil e Pietrocola (2017) ainda ressaltam que a equipe responsável por gerenciar as etapas que formam uma DBR é constituída por pesquisadores, comunidade escolar e professores da instituição onde ocorrerá a implementação da pesquisa. Por isso, é fundamental a colaboração de todos os envolvidos, já que como disseram Sandoval e Bell (2004) a sala de aula será utilizada como laboratório natural, onde problemas reais devem ser solucionados por meio de um trabalho que engloba o conhecimento prático do professor e o conhecimento técnico do pesquisador.

Wang e Hannafin (2005, pp. 2-3) resumem muito bem ao afirmar que uma DBR procura de forma sistemática, porém flexível melhorar as práticas de ensino de maneira colaborativa entre os pesquisadores e professores.

Nesse trabalho tratamos especificamente da DBR aplicada no ensino, mais especificamente na criação de uma sequência didática, mas essa abordagem se expande para diversas áreas do conhecimento.

A pesquisa em design educacional é um gênero de pesquisa em que o desenvolvimento iterativo de soluções para problemas educacionais complexos fornece o cenário para a investigação científica. Soluções que resultam de pesquisas de design educacional podem ser produtos educacionais (por exemplo, um jogo de aprendizagem de mundo virtual multiusuário), processos (por exemplo, uma estratégia de aprendizagem para o aluno em curso online), programas (por exemplo, uma série de workshops destinados a ajudar professores desenvolvem estratégias de questionamento mais eficazes) ou políticas (por exemplo, durante todo o ano escolar) (MCKENNEY, S. e REEVES, T., 2014, p.3)

Nesse tipo de pesquisa, o pesquisador se aproxima mais de seu objeto de estudo, podendo estar em constante interação com o professor e os estudantes. Como ressaltam Méheut e Psillos (2004), na construção de uma sequência didática devemos observar e entender a interação entre quatro elementos: professor, estudantes, conhecimento científico e mundo material, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Losango didático



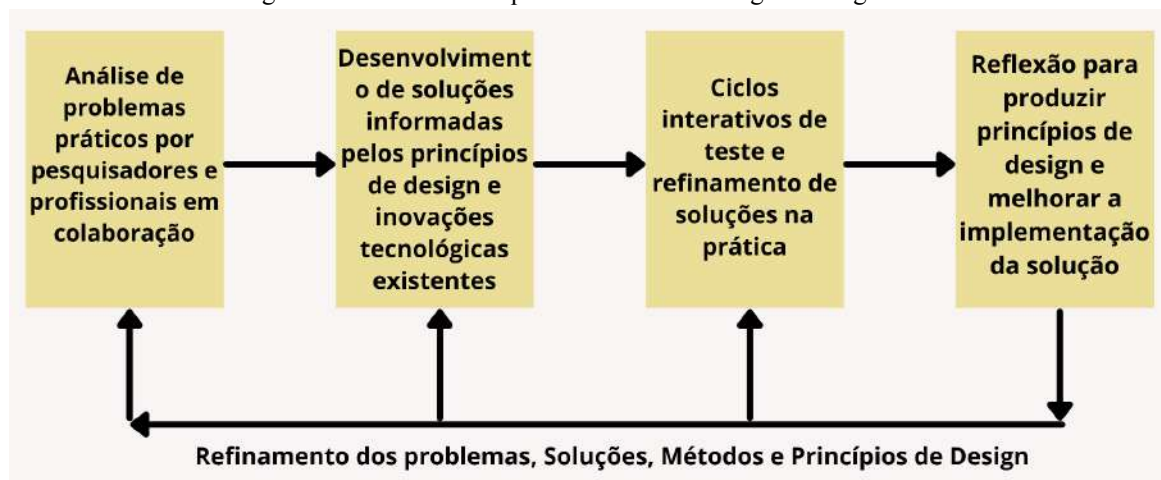
Fonte: Adaptado de Méheut e Psillos (2004, p.517).

No eixo vertical temos a ligação entre o conhecimento e o mundo material. Nele é possível destacar pontos como métodos e processos de elaboração e validação do conhecimento científico. Já o eixo horizontal representa a esfera pedagógica, onde estão relacionadas questões como a interação professor-alunos e as escolhas do professor para conduzir a aula (MÉHEUT, 2005, p. 196).

Como dito anteriormente, uma DBR é elaborada de forma sistêmica, com etapas claras e bem definidas. Na próxima seção tratamos de cada uma das etapas que constituem uma DBR, com objetivo de criação de uma sequência didática como uma das etapas da DBR.

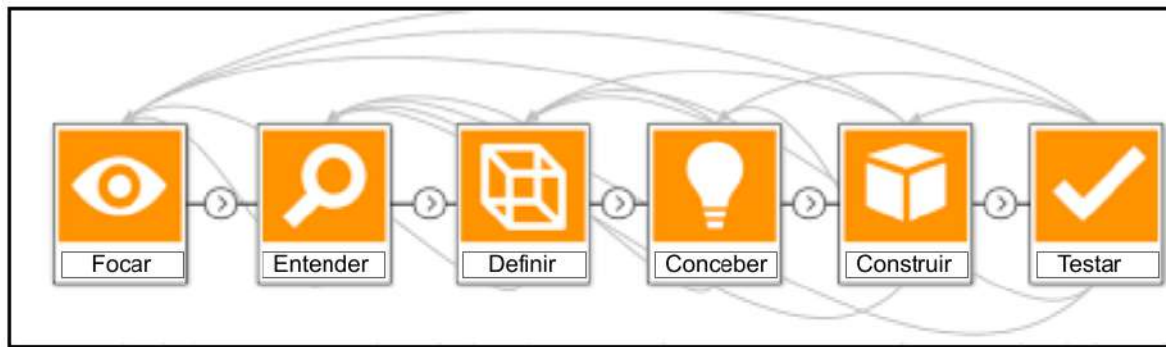
Uma DBR pode apresentar um número distinto de etapas. Para elucidar trazemos como exemplo Reeves (2006) que cria um modelo de 4 fases (Figura 2): Refinar problemas, elaborar soluções, definir métodos e princípios de Design e Easterday, Lewis e Gerber (2014) que criam um modelo com 6 etapas (Figura 3): focar no problema, entender o problema, definir objetivos, planejar solução, criar a solução e testar a solução.

Figura 2- Modelo de Pesquisa Baseada em Design: Fluxograma 1



Fonte: Adaptado de Reeves (2006)

Figura 3- Modelo de Pesquisa Baseada em Design: Fluxograma 2

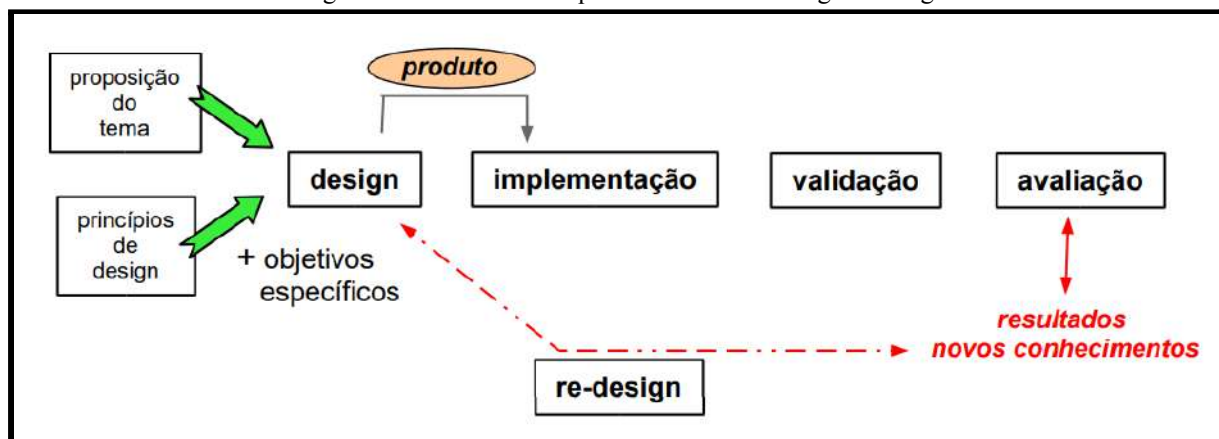


Fonte: Adaptado de Easterday, Lewis & Gerber (2014)

Wang e Hannafin (2005), enumeram nove pontos que julgam essenciais para implementação da DBR: utilizar o conhecimento já existente para criar o design; criar um plano inicial que seja objetivo, claro e realista; realizar a investigação em ambiente real; ter uma boa relação colaborativa com os membros que participarão do processo; definir bem os objetivos que devem ser alcançados e implementar de maneira sistemática o processo; analisar os dados imediata, contínua e retrospectivamente; refinar o projeto de forma contínua; relatar o contexto e os princípios de design; destacar a possibilidade de generalização do design.

Aqui, nesse trabalho, como será mostrado no capítulo 4, utilizamos como base teórica o modelo que traz a Figura 4.

Figura 4 - Modelo de Pesquisa Baseada em Design: Fluxograma 3



Fonte: Adaptado de Méheut e Psillos (2004, p.517).

Proposto por Kneubil e Pietrocola (2017), esse modelo é constituído por cinco fases, sendo elas: 1. Seleção do tema e proposição dos princípios de design: elaboração do design, aplicação, avaliação e re-design. Como mostra a Figura 4, temos um processo cíclico, em que

após avaliação, são gerados novos conhecimentos e, se necessário for, há a realização do redesign, iniciada com ajustes no primeiro design proposto e nova implementação, validação e avaliação.

A seguir discutiremos separadamente cada uma das etapas destacadas na imagem.

2.2.1. Definição do Tema e dos princípios de design

O tema escolhido pode ter diferentes motivações e pode pertencer a uma ou mais áreas do conhecimento. Tudo dependerá do que a equipe envolvida na pesquisa pretende abordar. Pode se tratar de uma inovação didática, como uma nova metodologia de ensino ou apresentar natureza científica, como propor um conteúdo que geralmente não é tratado no currículo em questão (KNEUBIL e PIETROCOLA, 2017).

Associado ao tema são escolhidos princípios de design, que devem estar definidos de forma clara, para que outros pesquisadores possam compreender facilmente a proposta elaborada, sem que haja confusão do que ensinar e de como ensinar.

Por exemplo, Hernández (2012) desenvolveu uma sequência didática sobre propriedades acústicas dos materiais partindo de alguns princípios de design, entre os quais podemos destacar: (i) o processo de modelização desempenha um papel central no entendimento da ciência por relacionar a descrição de objetos e eventos do mundo material para o mundo das teorias e modelos; (ii) a contextualização e a problematização do conteúdo a ser aprendido, promove nos alunos uma significância do que é ensinado. Pode-se perceber que o primeiro princípio é de natureza epistemológica e o segundo, didática. Estes princípios, entre outros, guiaram o design da TLS desenvolvida e apresentada pela autora (Kneubil e Pietrocola, 2017, p.9) .

Anderson e Shattuck (2012) ressaltam que os princípios de design não devem necessariamente ser mantidos até o final do processo, aliás a interação entre comunidade escolar, professor e pesquisador, contribui para que possíveis mudanças sejam realizadas. Assim, identificando a necessidade de alterá-los para atender melhor a realidade encontrada, o grupo que realiza pesquisa pode mudar esses princípios várias vezes, na busca por resultados mais satisfatórios.

2.2.2. Design

Essa é a fase em que as aulas que compõem a sequência didática são elaboradas, tendo como pilares os chamados “*objetivos específicos*”. Diferentemente dos princípios de design que são mais gerais, esses objetivos se relacionam de forma mais direta às ações que serão realizadas na sequência didática, relacionando os conteúdos e/ou habilidades que serão trabalhadas (KNEUBIL e PIETROCOLA, 2017).

Em geral, os objetivos são definidos com verbos ou ações que a TLS deve promover como, por exemplo, mostrar como o som se propaga dentro da matéria, distinguir as características inercial e gravitacional da massa, aprofundar no significado da relação massa-energia, etc (Kneubil e Pietrocola, 2017, p.9).

Até aqui vimos toda a estruturação teórica da pesquisa. Agora seguiremos para a parte prática onde será colocada a “mão na massa”.

2.2.3. Aplicação

A aplicação será baseada no objetivo principal da sequência didática. O professor que conduzirá as aulas que compõem a sequência didática, deve buscar o máximo de domínio do material que irá aplicar, tendo clareza dos princípios de design, objetivos, contexto e tempo da aplicação, conceitos técnicos que serão trabalhados e como ocorrerá a avaliação. Esse é um ponto elementar para obtenção de um fluxo que chegue o mais próximo possível do que se foi planejado.

Kneubil e Pietrocola (2017), alertam a respeito da importância do professor fazer parte do processo de elaboração do design. Se isso acontece, a aplicação pode ser mais rica, já que o docente terá contribuído de forma mais participativa para a criação da sequência didática e a conhecerá de forma mais profunda.

Além disso, a intenção desse preparo também é transformar a TLS em objeto de análise. Ou seja, considerando que o professor implementador domine aquele conteúdo e tenha se preparado bem, a avaliação do sucesso ou fracasso do processo se limita apenas à avaliação da TLS e das estratégias de ensino incorporadas nela (Kneubil e Pietrocola, 2017, p.10).

Se o docente não se encontra em plenas condições de aplicar a sequência didática, fatores não esperados podem aparecer, e conseqüentemente influenciar nos resultados.

2.2.4. Avaliação

Como mostram Kneubil e Pietrocola (2017), a avaliação deve conter instrumentos que possibilitam verificar se o objetivo principal e os objetivos específicos foram alcançados, se os princípios didáticos foram respeitados e se a sequência didática fluiu como planejado, alcançando resultados esperados no que diz respeito ao ensino e a aprendizagem.

Esses instrumentos podem ser aplicados durante as aulas ou no início e fim da sequência didática, na forma de pré e pós teste. Podem ser questionários, mapas mentais, filipetas ou “n” outros instrumentos avaliativos. Os dados obtidos por meio dessas ferramentas avaliativas serão utilizados para criação da próxima etapa: o re-design.

2.2.5. Re-design

Com base nos dados fornecidos pela avaliação, serão levantados os pontos positivos e negativos encontrados na sequência didática. Partindo disso, será elaborado o Redesign, que buscará otimizar a sequência didática, solucionando os problemas detectados.

As alterações e o redesenho da TLS podem ser considerados como sugestões para uma próxima implementação. Assim, o redesenho assemelha-se a um manual preventivo, alertando o professor, para as futuras implementações, de dificuldades e obstáculos que aparecem em sala de aula, tanto em relação ao conteúdo, como em relação à aprendizagem dos alunos e à dificuldade do professor (Kneubil e Pietrocola, 2017, p.12).

Após realizado o redesign finalizamos o primeiro ciclo de pesquisa. Em DBR temos um processo cíclico, também chamado de processo interativo, onde as etapas que foram descritas nessa seção, serão repetidas a quantidade de vezes que os pesquisadores julgarem necessário. A sequência didática estará definitivamente pronta, quando um ponto ótimo for atingido, onde os pesquisadores julgaram ter obtido o melhor resultado de ensino e aprendizagem.

2.3. O Ensino de Física No Brasil

Feynman (2000, p.205) em uma de suas vindas ao Brasil, teve a oportunidade de lecionar para um grupo de alunos, que se preparavam para trabalhar como professores. Tais alunos conseguiam responder uma pergunta se feita de forma específica, no entanto, se o mesmo questionamento fosse realizado, porém enunciado de uma forma diferente, os estudantes não eram capazes de responder.

[...] descobri que os estudantes tinham decorado tudo, mas não sabiam o que queria dizer. Quando ouviram "luz que é refletida por um meio com um índice de refração", não sabiam que isso significava um material como a água. Eles não sabiam que "a direção da luz" é a direção na qual você vê alguma coisa quando está olhando, e assim por diante. Tudo estava totalmente decorado, mas nada havia sido traduzido em palavras que fizessem sentido. Assim, se eu perguntasse o que é o ângulo de Brewster, eu estava entrando no computador com a senha correta. Mas se digo "Observe a água", nada acontece -eles não têm nada que responda ao comando "observe a água".

É possível assimilar essa crítica à outra feita por Moreira (2018 p.76), a respeito da fraca formação em física dos professores, que encontram na graduação um ensino tradicional, de aulas expositivas seguidas de resolução de problemas. Além de terem pouquíssimo contato com a física moderna e contemporânea. Associando essa falha no método utilizado na formação de docentes em física, que se arrasta por décadas, ao fato de não ser disponibilizado na licenciatura uma grade maior em física moderna, temos como resultado, no ensino médio, aulas pouco motivadoras, a respeito de temas que, em grande parte, não chamam a atenção dos jovens estudantes. Feita essa análise, direciono o foco a pesquisa em ensino de física, como Moreira (2018, p.74) aponta, os professores de física que atuam na educação básica, praticamente não participam de pesquisas nessa área, isso atrapalha a chegada de novos conhecimentos a sala de aula. Esse é um ponto crucial para a possibilidade de trabalhar em aula conteúdos de física moderna, porém a ausência de incentivo institucional, para que esses docentes realizem pesquisas (MOREIRA, 2018), e a má remuneração, obrigam os professores

a terem uma extensa carga horária de aulas (KESSLER, 2008), o que gera grande empecilho para realização de outras atividades.

A pequena carga horária de física no ensino médio é outro problema a se enfrentar. Alegações são feitas quanto a isso, afirmando a dificuldade em se completar até mesmo a programação de física clássica. Mais um ponto apontado é a dificuldade em se abordar os formalismos matemáticos que seriam avançados demais para os alunos, além da dificuldade que eles teriam para compreender abstrações dos fenômenos quânticos e relativísticos que fogem muito da realidade do cotidiano (MONTEIRO, NARDI e FILHO, 2009).

2.3.1. Física moderna e contemporânea no ensino médio

Já no final do século XX, Valadares e Moreira (1998) chamaram a atenção para a necessidade de dar ao aluno do ensino médio a chance de conhecer os fundamentos físicos que estão por trás da tecnologia utilizada no cotidiano. Atualmente a influência da tecnologia em nossa vida é muito maior do que na época em que tal artigo foi publicado, e a cada ano que passa, são inventados e aprimorados aparelhos tecnológicos em diversas áreas (comunicação, medicina, informação, etc). Lamentavelmente o ensino de física que na época já estava defasado, pouco mudou e continua desatualizado. Isso acaba por dificultar a proximidade entre as aulas de física e a realidade contextual que o estudante vive, não permitindo a compreensão da importância dessa ciência para a sociedade (OLIVEIRA, VIANNA e GERBASSI 2007).

O quadro se agrava à medida que esse aluno, quando termina o ensino médio, para de estudar ou enveredar por carreiras onde não há mais ênfase numa formação científica. Nesses casos, o ensino médio constitui o último contato formal com a física. Dessa forma, os problemas encontrados nesse segmento do ensino, no que diz respeito a uma formação científica mais atual e mais presente no dia a dia, contribuem de forma negativa para a formação da cidadania de boa parte dos alunos (OLIVEIRA, VIANNA e GERBASSI 2007, p.448).

Ostermann e Moreira (2000) destacam motivos, levantados na III Conferência Interamericana sobre Educação em Física (Barojas, 1988), para se ensinar física moderna: despertar a curiosidade dos estudantes e mostrar como a física foi desenvolvida por humanos

comuns em conjunto. Isso aproxima a ciência deles; dar ao estudante a chance de conhecer a física que vem sendo feita desde o século XIX, física essa que revolucionou a ciência e a sociedade; ao aproximar a ciência dos discentes, torna-se possível o despertar do interesse pela carreira científica; novos conteúdos no currículo entusiasma o professor, quebrando aquela inércia de sempre se ensinar o mesmo; apesar de física moderna ser complexa e abstrata, a física clássica também apresenta um grau de abstração considerado de difícil compreensão pelos alunos.

O último tópico traz uma boa reflexão: se a dificuldade em compreender abstrações, é uma realidade vivenciada constantemente em sala, nas aulas de física clássica, por que então não buscar meios de se inserir física moderna na sala de aula? Outras dificuldades poderiam ser apontadas como por exemplo a matemática, mas para isso alternativas são conhecidas. A sequência didática, que será apresentada nessa dissertação, é um exemplo de como é possível se explicar física moderna, fazendo uso apenas da matemática de nível básico. Em outra vertente didática, Carvalho e Zanetic (2004) introduzem física moderna no ensino médio tendo a arte como complemento para compreensão de conceitos básicos de mecânica quântica e relatividade, na experiência os alunos desenvolvem histórias que posteriormente viram uma produção audiovisual criada em computador. Os estudantes são questionados antes e após a atividade, a respeito do seu entendimento dos conceitos físicos trabalhados.

Mas afinal, se a física moderna deve ser introduzida no ensino básico, quais tópicos deveremos ensinar? Os temas são diversos e o tempo de aula é escasso, sendo assim, é preciso estabelecer o que se julga mais necessário ensinar. Ostermann e Moreira (2000) realizaram uma pesquisa onde foram entrevistados pesquisadores da área e professores de física, os profissionais foram questionados a respeito dos tópicos que concebiam como mais relevantes para serem abordados no ensino médio. Os dados obtidos, apontam como mais importantes, os seguintes: átomo de Bohr, big bang, dualidade onda-partícula, efeito fotoelétrico, estrutura molecular, fibras ópticas, fissão e fusão nuclear, forças fundamentais, laser, leis de conservação, metais e isolantes, origem do universo, partículas elementares, radioatividade, raios-X, relatividade restrita, semicondutores, supercondutores. Alguns desses temas já são contemplados em aulas de física no ensino básico, porém sob uma análise clássica. Na lista também aparecem temas que foram incluídos em livros didáticos do Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio (PNLEM).

Em pesquisa realizada, Domingui (2012) analisa os cinco livros didáticos de física que fazem parte do PNLEM, com o objetivo de averiguar o conteúdo de física moderna que os exemplares trazem. Conclui-se que todos os livros do PNLEM contém algum conteúdo de física moderna, sendo que quatro deles destinam um capítulo ou unidade específico para esse conteúdo. Autores de três desses livros defendem a inserção de física moderna no ensino médio, já os autores dos outros dois livros se mostram mais conservadores e fazem ressalvas quanto à prioridade de se ensinar física moderna. No entanto, há a possibilidade de se ensinar física moderna a partir da física clássica, como mostraremos na presente dissertação.

2.4. Tecnologia Digital da Informação e Comunicação na Educação (TDIC)

A tecnologia é uma realidade inegável em nossas vidas, e isso não é de hoje. Analisando as tecnologias digitais de informação e comunicação (TIDCs), podemos notar que elas estão em nosso cotidiano a décadas, em aparelhos como o rádio, a televisão, os computadores até chegarmos a mais recentemente, os smartphones. Reconhecendo isso, é levantada a questão de como inserir essas tecnologias no processo de ensino (TONIATO; FERREIRA; FERRACIOLI, 2006).

Várias são as propostas para inserção de TDICs em aulas: Ensino de Física com TDIC (ANGOTTI, 2015); Uma proposta de objeto educacional digital para o ensino de cinemática (PORTELA 2019); A utilização das TDIC como Ferramenta potencializadora no ensino de queda livre (2019) A utilização de TDICs pode ser um fator de motivação para alunos e docentes, porém, não basta apenas implementar a tecnologia na aula, sem se criar um contexto capaz de criar uma esfera motivadora na classe. Esquembre (2001) mostra que ainda no século passado existia uma visão romantizada de que a tecnologia, mais especificamente os computadores, seriam a ferramenta responsável por uma revolução no ensino, sem se levar em conta outros fatores.

Deve existir, portanto, um propósito ao qual a tecnologia ajudará alcançar o objetivo e o professor deve ter domínio da ferramenta, para auxiliar os alunos na interpretação das análises que ali serão realizadas (XAVIER; TEIXEIRA; SAVETI, 2010). Acrescentar uma TDIC à aula sem criar esse contexto pode apenas mascarar uma aula tradicional. Temos como

exemplo uma aula onde o slide passado em um notebook substitui o giz e o quadro, porém o ensino continua sendo o mesmo de sempre (MOREIRA, 2018).

Feito ressalvas, vários são os motivos para que as TDICs sejam introduzidas nas aulas. A geração que hoje está no ensino médio, cresceu com a tecnologia em sua vida. Não conceber a tecnologia na sala de aula, acaba por criar um ambiente educativo distante da realidade do aluno, visto que esse se encontra submerso por tecnologias em seu cotidiano (SANCHO, 1998, p.40). Outro fator relevante é a otimização do tempo de aula possibilitado por ferramentas digitais, como os Plickers, que dá a chance do professor colher dados referentes a aprendizagem de forma rápida e prática, o que permite a aula se tornar mais fluida ou o Google Classroom que facilita o armazenamento e troca de informações. As TDICs agregam muito ao ambiente escolar, auxiliando no processo de transformação da maneira de se pensar o trabalho educativo (PERRENOUD, 2000).

Moreira (2018) aponta, como um grande e importante desafio para o ensino de física contemporânea, a utilização das TDICs que, apesar de tornar possível a criação de um ambiente mais interativo e propício para aprendizagem, de uma forma geral, não são muito utilizadas.

Simulações computacionais, modelagem computacional, laboratórios virtuais deveriam estar naturalmente integrados ao ensino de Física no século XXI. Celulares também poderiam fazer parte dessa tecnologia que deveria permear o ensino de Física nos dias de hoje. Mas não é assim. É claro que a escola pode não ter a instrumentação necessária, mas a principal razão da não incorporação das TIC no ensino de Física na atualidade é o foco no treinamento para as provas, a ênfase nas “respostas corretas”, no emprego de fórmulas para resolver problemas conhecidos. Isso é ensino de Física? Certamente não! (MOREIRA, 2018, p. 76)

Isso demonstra a dificuldade enfrentada pelos professores de educação básica, que pretendem proporcionar aos alunos uma melhor aprendizagem, por meio de novas ferramentas e métodos de ensino. Muitas vezes os próprios alunos se colocam contra as novidades inseridas em aula, por acreditarem que resolver infinidades de exercícios seja mais útil, visão essa, proveniente da a pressão infligida pelos vestibulares.

No que se refere às simulações computacionais, são de extrema utilidade para a compreensão de conceitos abstratos, possibilitando aos discentes manipular um sistema e

suas variáveis, o que permite colher diferentes, possibilitando uma análise mais profunda dos conceitos teóricos que estão ali envolvidos (LARA; MANCIA; SABCHUK; MIQUELIN; PINTO, 2011). Compartilho da visão desses autores, por isso, aqui nesta presente dissertação, será buscado tornar conceitos abstratos mais palpáveis, por meio de simulações.

As simulações fornecem um amplo leque de abordagens, possibilitando a exploração e demonstração de diversos fenômenos (SILVA; GERMANO; MARIANO, 2011). Indo além, essas ferramentas dão ao aluno a chance de terem uma experiência próxima do que é o trabalho dos cientistas de diversas áreas que também trabalham com simulações, possibilitando inclusive que os alunos controle os dados inseridos, analise seus resultados e perceba mudanças no sistema físico conforme variáveis são manipuladas (GRECA e MOREIRA, 2002). Outras vantagens são: demonstração dinâmica dos fenômenos, coleta de dados em um curto intervalo de tempo, motivação e interatividade (MEDEIROS e MEDEIROS, 2002).

Os programas de simulação permitem que o professor crie seu modelo didático de forma personalizada, podendo trabalhar conceitos específicos e controlar os pontos mais relevantes, que merecem mais atenção (MARTINEZ et al, 2008). De acordo com Veit e Araújo (2004), as simulações também possibilitam um espaço maior para as discussões dos conceitos físicos, já que o computador opera os cálculos, no entanto, é necessário que as equações trabalhadas, sejam analisadas antes da simulação, de forma que sua validade seja comprovada. Esse ponto pode ser importante para despertar o interesse daqueles alunos que se encantam pelos conceitos, porém apresentam dificuldades matemáticas que foram agravadas ao longo das séries.

Apesar de apresentar tantas vantagens, as simulações muitas vezes não são utilizadas em aula devido a fatores como a falta de estrutura de muitos colégios e professores que não tiveram uma capacitação adequada para trabalhar com essas ferramentas e que não possuem conhecimento a respeito das qualidades e defeitos do produto (HEIDEMANN, ARAÚJO e VEIT, 2014).

Na literatura científica, vários trabalhos já trataram de temas envolvendo simulações no ensino de física por meio dos mais diversos softwares e plataformas.

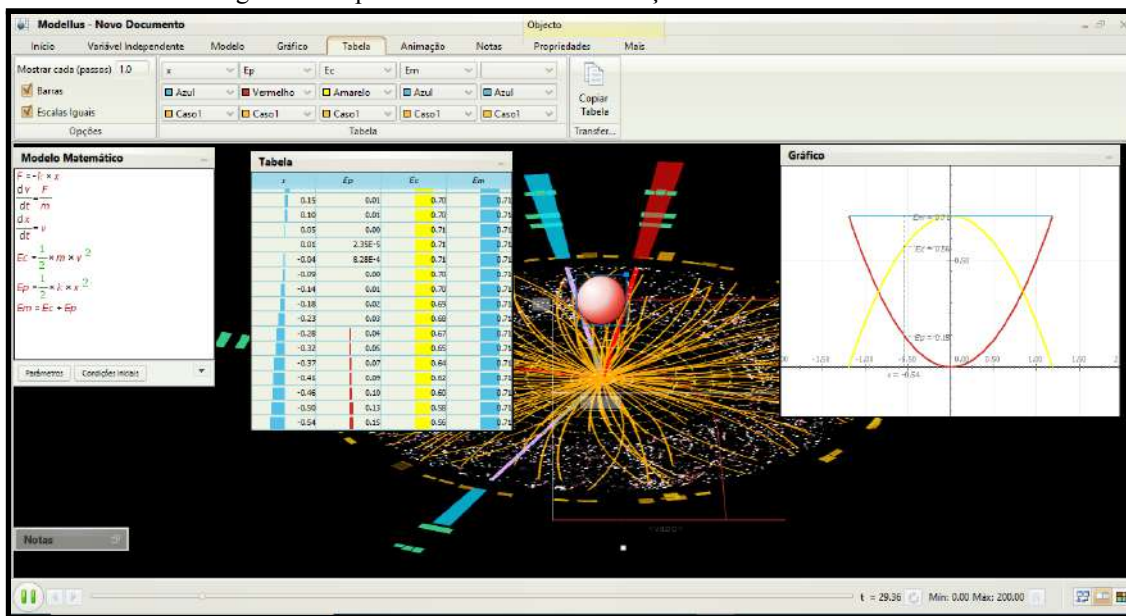
Uma pesquisa no website de busca google (www.google.com.br) com os termos *simulation physics*, em 20 de setembro de 2010, nos fornece um total de

"Aproximadamente 27.300.000 resultados ". Para o termo simuladores física, o referido website de busca nos fornece "Aproximadamente 1.470.000 resultados" (DE SOUZA FILHO, 2010, p.41).

Podemos destacar alguns como: Tracker (CORDEIRO E RODRIGUES, 2019), (SANTOS E CARVALHO, 2017) e (BEZERRA et al., 2014); Phet simulator (Arantes; MIRANDA e STUDART 2010), e (OLIVEIRA e TOLEDO, 2019); EveryCircuit (ANDRADE, JUNIOR e BUFFON, 2018) e Modellus (Andrade, 2016), (Pastana, 2017).

Nesse trabalho, utilizaremos o software Modellus, desenvolvido pelo professor Victor Duarte da Universidade Nova de Lisboa. Trata-se de uma excelente ferramenta de modelagem e simulação, que permite explorar modelos do ponto de vista da física e da matemática.

Figura 5 - Captura de tela de uma simulação realizada no Modellus



Fonte: Próprio autor

O software possibilita a manipulação de condições iniciais, o estabelecimento de parâmetros além de possibilitar o fácil manuseio, por permitir que equações sejam inseridas como se estivessem sendo escritas no papel, sem que seja preciso conhecimento técnico em programação (MARTINEZ et al, 2008). Isso fica claro na figura 6, que mostra a caixa “modelo matemático” onde são inseridas as equações. Na mesma figura, vemos as caixas “parâmetros” e “condições iniciais”.

Figura 6 - Modelo matemático no Modellus

Modelo Matemático

$$F = -k \times x$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F}{m}$$

$$\frac{dx}{dt} = v$$

$$E_c = \frac{1}{2} \times m \times v^2$$

$$E_p = \frac{1}{2} \times k \times x^2$$

$$E_m = E_c + E_p$$

Parâmetros Condições Iniciais

Fonte: Próprio autor

O Modellus auxilia na aquisição de significados, permitindo ao aluno criar suas próprias simulações ou trabalhar simulações criadas por terceiros, dando liberdade para o estudante testar suas ideias, fazendo e refazendo representações. Dessa forma os alunos se habituariam às representações com maior facilidade, do que se estivessem analisando-as em livros ou no quadro (VEIT e TEODORO, 2002).

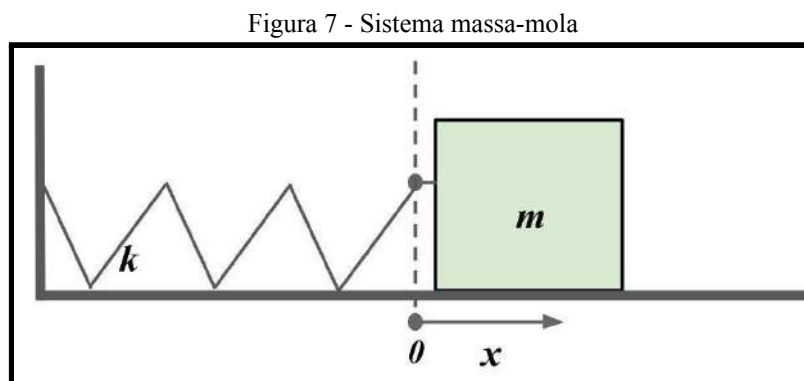
Veit e Teodoro (2002) discutem as habilidades referentes a disciplina de física que podem ser trabalhadas no modellus e que estão presentes nos parâmetros curriculares nacionais para o ensino médio (PCNEM): compreender enunciados que envolvam códigos e símbolos físico; utilizar e compreender tabelas, gráficos e relações matemáticas gráficas para a expressão do saber físico; ser capaz de discriminar e traduzir as linguagens matemática e discursiva entre si; expressar-se corretamente utilizando a linguagem física adequada e elementos de sua representação simbólica; apresentar de forma clara e objetiva o conhecimento apreendido, através de tal linguagem; elaborar sínteses ou esquemas estruturados dos temas físicos trabalhados; desenvolver a capacidade de investigação física. Classificar, organizar, sistematizar. Identificar regularidades; observar, estimar ordens de grandeza, compreender o conceito de medir, fazer hipóteses, testar; conhecer e utilizar conceitos físicos; relacionar grandezas, quantificar, identificar parâmetros relevantes; compreender e utilizar leis e teorias físicas; construir e investigar situações-problema,

identificar a situação física, utilizar modelos físicos, generalizar de uma a outra situação, prever, avaliar, analisar previsões.

3. OSCILADOR HARMÔNICO SIMPLES E ANARMÔNICO

3.1. Oscilador Harmônico Simples

Um exemplo de oscilador harmônico simples (OHS), recorrente em livros didáticos, é o sistema massa-mola. Imaginemos um corpo de massa “ m ”, preso a uma mola que possui constante elástica “ k ” e está fixada de forma que fique presa na posição horizontal, oscilando no eixo x , numa superfície sem atrito, como mostra a figura 7.



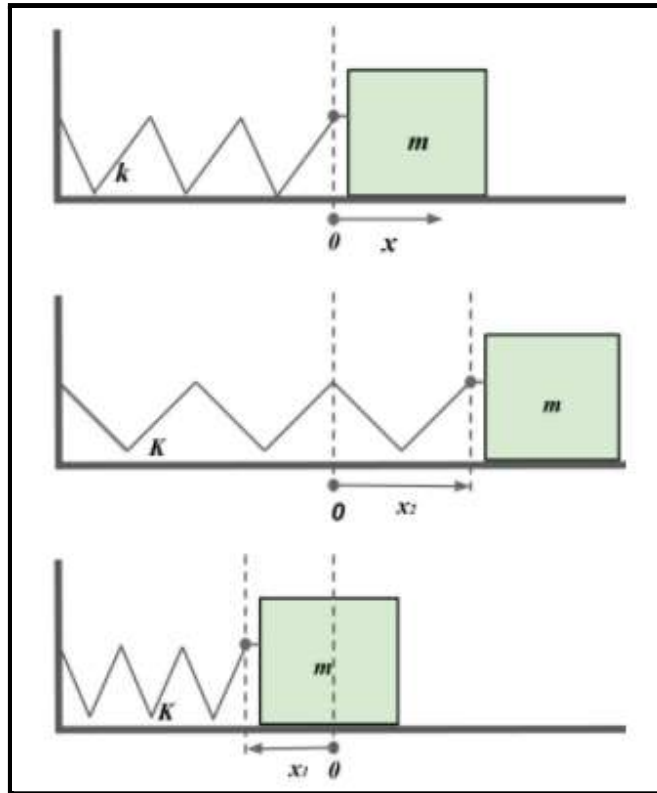
Fonte: Próprio autor

Após ser tirado de sua situação de equilíbrio (podendo a mola ser comprimida ou esticada), o corpo oscila com frequência constante f em torno do ponto de equilíbrio $x = 0$. A oscilação é provocada pela força elástica restauradora F , conhecida como Lei de Hooke,

$$F = -kx \quad (1)$$

responsável por fazer o corpo de massa m oscilar. Na ausência de atrito o corpo oscila em duas posições máximas $\pm x_m$ em relação à origem, conhecidas com amplitude do movimento harmônico. É importante mencionar que no sistema bloco-mola, toda a massa está contida no bloco, a mola é responsável pela força restauradora e sua massa é desprezada. A Figura mostra o movimento do bloco em diferentes posições.

Figura 8 - Sistema massa-mola: em equilíbrio, esticado e comprimido



Fonte: Próprio autor

Com base na figura, podemos ver que $F > 0$ ($F < 0$) para qualquer posição $x < 0$ ($x > 0$). Assim para $x < 0$ o bloco desacelera ($a > 0$) quando se move para esquerda ($v < 0$) e acelera quando se move para direita ($a < 0$, $v > 0$). Naturalmente, a dinâmica do sistema bloco-mola é descrita pela segunda lei de Newton,

$$F = ma, \quad (2)$$

onde m é a massa do bloco e a é a aceleração do bloco. Partindo da segunda Lei de Newton podemos escrever equações que descrevem o oscilador harmônico simples, considerando (1) e (2) obtemos

$$m \cdot a = -kx, \quad (3)$$

consequentemente,

$$a = -\frac{k}{m}x. \quad (4)$$

Da Eq. (4) vemos que a aceleração é uma função da posição $a(x)$. Cabe agora avaliar o termo $-\frac{k}{m}$, para isso faremos uma análise dimensional. Considerando que k tem unidades de medida em $\frac{N}{m}$ e m em kg .

$$k \rightarrow \frac{N}{m} \rightarrow \frac{Kg.m}{s^2.m} \rightarrow \frac{Kg}{s^2}.$$

Assim, temos que

$$\frac{K}{m} = \frac{Kg}{Kg.s^2},$$

$$\frac{K}{m} = \frac{1}{s^2},$$

$$\sqrt{\frac{K}{m}} = \sqrt{\frac{1}{s^2}} = \frac{1}{s}.$$

Note que ω tem dimensão de frequência (s^{-1}), por isso, está associado ao número de oscilações que o sistema realiza por segundo. É importante destacar que a frequência depende exclusivamente de k e m , sendo, portanto, uma característica de cada sistema físico bloco-mola. Podemos, portanto, dizer que o termo $\sqrt{\frac{K}{m}}$ equivale a frequência angular ω do oscilador,

$$\sqrt{\frac{K}{m}} = \omega,$$

assim podemos considerar

$$\omega^2 = \frac{K}{m}. \quad (5)$$

Associando a Eq. (3) e (4) obtemos,

$$a = -\omega^2 x. \quad (6)$$

Sabemos que a aceleração é a derivada segunda da posição, portanto

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega^2 x. \quad (7)$$

Esta equação diferencial tem solução conhecida

$$x(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t). \quad (8)$$

Sem perda de generalidade, podemos considerar a função posição da oscilador bloco mola, como segue

$$x(t) = A \cos(\omega t). \quad (9)$$

Se derivarmos a Eq. (5), obtemos a velocidade da partícula

$$v(t) = -\omega A \sin(\omega t). \quad (10)$$

3.1.1. A Energia do Movimento Harmônico Simples

Em um OHS podemos analisar também a energia potencial que o sistema apresenta. Sendo a energia potencial, uma energia dissociada da velocidade, mas associada à localização do objeto em uma região onde existe uma força, podemos concluir que, nesse exemplo específico, a energia potencial será associada a força elástica de restauração. Ao soltar o corpo e permitir que ele entre em movimento, a energia potencial do sistema começa a se transformar em energia cinética, essa sim, associada à velocidade do corpo. A seguir serão deduzidas as equações da energia potencial e energia cinética a partir da Eq. (1) que enuncia a lei de Hook e da Eq. (2) que descreve o princípio fundamental da dinâmica.,

Sabendo que,

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}, \quad (11)$$

substituindo a Eq. (11) na Eq. (2),

$$\begin{aligned} m \frac{\Delta v}{\Delta t} &= -Kx, \\ m \Delta v &= -Kx \Delta t, \end{aligned}$$

multiplicando os dois lados da equação por v ,

$$\begin{aligned} m \Delta v v &= -Kx \Delta t v, \\ m \Delta v v &= -Kx \Delta t \frac{\Delta x}{\Delta t}, \\ m \Delta v v &= -Kx \Delta x. \end{aligned} \quad (12)$$

Agora, trabalhamos matematicamente a variação da velocidade do corpo (Δv).

É conveniente dizer que:

$$\begin{aligned} \Delta v &= (v + \Delta v) - v, \\ \Delta v^2 &= (v + \Delta v)^2 - v^2, \\ \Delta v^2 &= (v^2 + 2v\Delta v + (\Delta v)^2) - v^2, \\ \Delta v^2 &= 2v\Delta v + (\Delta v)^2. \end{aligned}$$

Como (Δv) é um termo muito pequeno, $(\Delta v)^2$ poderá ser desprezado, assim:

$$\Delta v^2 \cong 2v\Delta v.$$

$$\frac{1}{2}\Delta v^2 \cong v\Delta v. \quad (13)$$

O mesmo pode ser feito com a variação do deslocamento (Δx)

$$\begin{aligned} \Delta x &= (x + \Delta x) - x, \\ \Delta x^2 &= (x + \Delta x)^2 - x^2, \\ \Delta x^2 &= (x^2 + 2x\Delta x + (\Delta x)^2) - x^2, \\ \Delta x^2 &= 2x\Delta x + (\Delta x)^2, \\ \Delta x^2 &\cong 2x\Delta x, \\ \frac{1}{2}\Delta x^2 &\cong x\Delta x. \end{aligned} \quad (14)$$

Substituindo as Eqs. (13) e (14), na Eq. (12), vamos obter,

$$\begin{aligned} m\frac{1}{2}\Delta v^2 &= -K\frac{1}{2}\Delta x^2, \\ m\frac{1}{2}(v^2 - v_0^2) &= -K\frac{1}{2}(x^2 - x_0^2), \\ (m\frac{1}{2}v^2 - m\frac{1}{2}v_0^2) &= -(m\frac{1}{2}x^2 - m\frac{1}{2}x_0^2), \\ \Delta(\frac{1}{2}mv^2) &= -\Delta(\frac{1}{2}kx^2), \\ \Delta(\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2) &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Vemos que a lei de conservação da energia é respeitada e que a energia total do sistema é

$$(\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2),$$

onde a energia cinética é descrita por

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2, \quad (16)$$

e a energia potencial

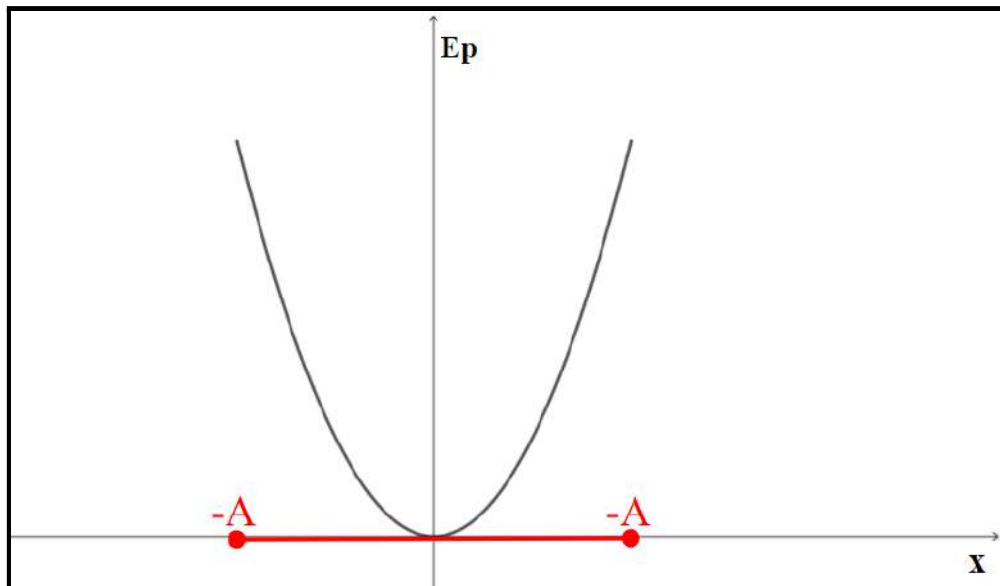
$$E_p = \frac{1}{2}kx^2. \quad (17)$$

A energia total do sistema será o somatório da energia potencial e da energia cinética. Lembrando que a primeira aumenta, conforme a segunda diminui, e vice-versa, ou seja, a energia total do sistema é conservada.

$$E_t = E_c + E_p, \quad (18)$$

onde E_t é a energia total, E_c a energia cinética e E_p a energia potencial do sistema em questão.

Figura 10 - Função energia potencial do OHS



Fonte: Próprio autor

A Figura 10 apresenta o gráfico da energia potencial de um OHS. Para traçar o gráfico da energia, foi utilizado o exemplo de um corpo preso em uma mola, que tem seu ponto de equilíbrio em $x = 0$ e é esticada até o ponto $+A$. Ao soltar o corpo, a mola oscila entre os pontos $-A$ e $+A$. Esse sistema pode ser descrito pela equação

$$\frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2, \quad (19)$$

onde a energia potencial é máxima em $-A$ e $+A$, e a energia cinética tem seu maior valor em $x = 0$.

Até o momento foram demonstrados exemplos de casos em que um corpo oscila de forma harmônica simples, onde é possível observar a harmonia das medidas, ou seja, a simetria. É verdadeiro por tanto que ao substituir x por $-x$ (dois pontos equivalentes, simétricos) na equação de energia potencial, nada iria mudar. Agora pensamos: o que ocorreria então se a simetria desse sistema fosse quebrada?

3.2. Oscilador Anarmônico

Começamos agora a saga para tentar responder a questão que fechou o capítulo anterior. Para isso, tomamos como objeto de estudo uma mola deformada, constituída de um material com propriedade elástica não linear, que não satisfaz a lei de Hook. Aqui a mola irá seguir a lei de Hook deformada

$$F = -Kx - gx^3, \quad (20)$$

onde a deformação é representada por “ $-gx^3$ ”. Note que nesse caso, a deformação não será linear. Considerando $F = 0$, para estudar as posições de equilíbrio instantâneo, temos

$$\begin{aligned} (0 &= -Kx - gx^3)(-1), \\ Kx + gx^3 &= 0, \\ (K + gx^2)x &= 0, \end{aligned}$$

assim $x = 0$ ou

$$\begin{aligned} K + gx^2 &= 0, \\ gx^2 &= -K, \\ x &= \sqrt{\frac{-K}{g}}, \end{aligned} \quad (21)$$

$\frac{-K}{g} \in \mathbb{R}$, logo $K < 0$ e $g > 0$.

Como foi feito anteriormente partiremos da Eq. 20, porém agora o objetivo é encontrarmos a equação da energia do sistema.

$$\begin{aligned} ma &= -Kx - gx^3, \\ m \frac{\Delta v}{\Delta t} &= -Kx - gx^3, \\ m\Delta v &= -Kx\Delta t - gx^3\Delta t, \\ mv\Delta v &= -Kxv\Delta t - gx^3v\Delta t, \\ mv\Delta v &= -Kx \frac{\Delta x}{\Delta t} \Delta t - gx^3 \frac{\Delta x}{\Delta t} \Delta t, \\ mv\Delta v &= -Kx\Delta x - gx^3\Delta x. \end{aligned} \quad (22)$$

Já conhecemos os termos $v\Delta v$ e $x\Delta x$, como demonstrado nas Eqs. (13) e (14), mas ainda é preciso desenvolvermos o termo x^3 , como segue,

$$\Delta x^4 = (x + \Delta x)^4 - x^4, \quad (23)$$

$$\Delta x^4 = x^4 + 4x^3\Delta x + 6x^2(\Delta x)^2 + 4x(\Delta x)^3 + (\Delta x)^4 - x^4.$$

Por serem muito pequenos, aqui podemos por conveniência descartamos os termos x^4 , $(\Delta x)^3$, $(\Delta x)^2$ e x^2 , restando,

$$\begin{aligned} \Delta x^4 &\cong 4x^3\Delta x, \\ \frac{1}{4}\Delta x^4 &\cong x^3\Delta x. \end{aligned} \quad (24)$$

Substituindo na Eq (22) os termos encontrados em (13), (14) e (24), obtemos,

$$\frac{1}{2}m\Delta v^2 = -K\frac{1}{2}\Delta x^2 - g\frac{1}{4}\Delta x^4. \quad (25)$$

Temos então a energia cinética do sistema

$$\Delta E_c = -K\frac{1}{2}\Delta x^2 - g\frac{1}{4}\Delta x^4 \quad (26)$$

$$\Delta E_c + \Delta\left(\frac{1}{2}Kx^2 + \frac{1}{4}gx^4\right) = 0.$$

A variação da energia é zero, respeitando a conservação da energia.

A energia total (E_t) será, portanto,

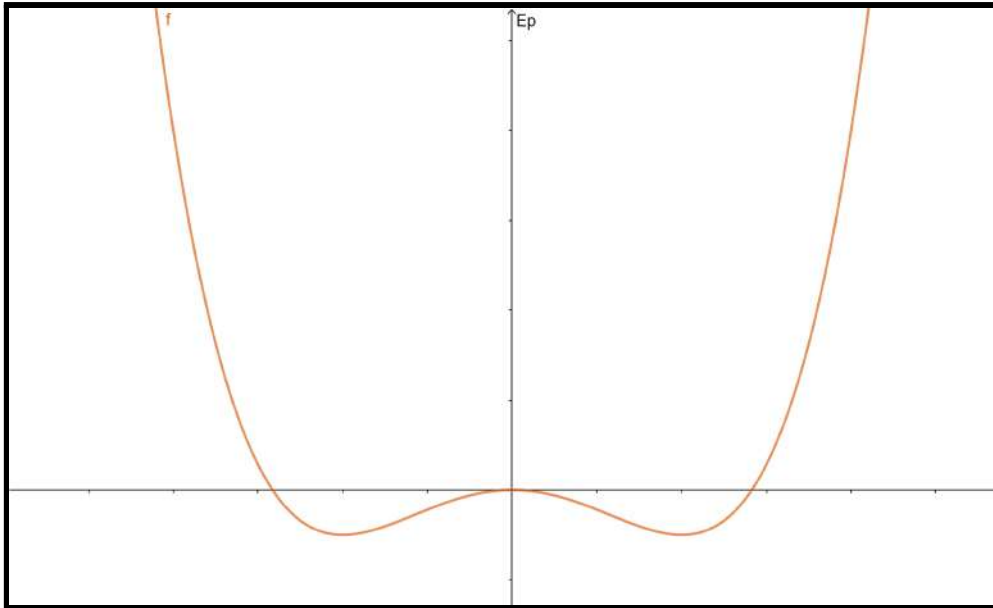
$$E_t = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}Kx^2 + \frac{1}{4}gx^4, \quad (27)$$

onde a energia potencial (E_p)

$$E_p = \frac{1}{2}Kx^2 + \frac{1}{4}gx^4 \quad [K < 0 \text{ e } g > 0]. \quad (28)$$

Com essa equação de energia potencial, encontramos um gráfico que revela simetria, porém, com uma análise mais rigorosa, podemos extrair dele, informações valiosas para respondermos a questão que está aberta.

Figura 11 - Função energia potencial do OA

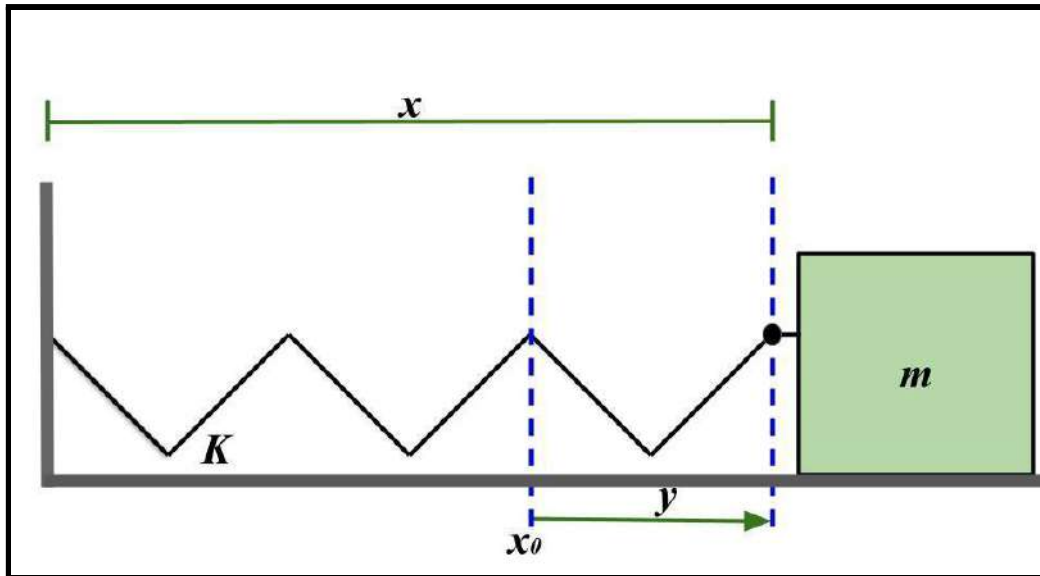


Fonte: Próprio autor

Um corpo oscila de forma estável, quando essa oscilação ocorre em torno do ponto de equilíbrio, sendo esse, o ponto de mínima energia do sistema, onde a força é zero. Assim, podemos concluir que, a origem do gráfico, não é o ponto de equilíbrio, já que temos ali, energia máxima local. Continuando o raciocínio, teremos nos pontos mínimos do gráfico, o ponto de equilíbrio, dessa maneira, o próprio sistema, ou quem o controla, terá que escolher um dos dois pontos mínimos, para oscilar em torno do mesmo, “esquecendo” o lado não adotado. Dessa forma a simetria é quebrada.

Para exemplificar, tomemos o ponto $x_0 = \sqrt{\frac{-K}{g}}$, como posição de equilíbrio, onde o sistema oscilará em torno. Sendo “ x ” a distância da massa até a origem, encontramos um y como coordenada que mede a diferença entre a posição da massa em um determinado instante e a posição da massa em estado de equilíbrio. Em outras palavras, as oscilações em torno de x_0 serão descritas por y .

Figura 12 - Sistema bloco-mola com novo ponto de equilíbrio



Fonte: Próprio autor

Aqui partimos para encontrar a nova equação que descreve esse sistema não simétrico. Para isso, será necessário a inclusão da coordenada oscilatória, que nesse ponto, já não é x , mas sim x_0 . Isolando " x ",

$$y = x - x_0,$$

$$x = x_0 + y, \quad (29)$$

e aplicando (29) na equação da energia total desse sistema, teremos:

$$E_t = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}K(x_0 + y)^2 + \frac{1}{4}g(x_0 + y)^4,$$

$$E_t = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}K(x_0^2 + 2x_0y + y^2) + \frac{1}{4}g(x_0^4 + x_0^3y + 6x_0^2y^2 + x_0y^3 + y^4),$$

$$E_t = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}Kx_0^2 + Kx_0y + \frac{1}{2}Ky^2 + \frac{1}{4}gx_0^4. \quad (30)$$

A energia será definida em relação a um nível de referência e, para descrevê-la, será importante tudo que a mede em função da posição. Sendo assim, o próximo passo será separar as constantes.

$$E_t = \frac{1}{2}Kx_0^2 - \frac{1}{4}gx_0^4 = \frac{1}{2}mv^2 + Kx_0y + \frac{1}{2}Ky^2 + gx_0^3y + \frac{3}{2}gx_0^2y^2 +$$

$$\frac{1}{4}gx_0y^3 + \frac{1}{4}gy^4),$$

$$E_t = \frac{1}{2}Kx_0^2 - \frac{1}{4}gx_0^4 = \frac{1}{2}mv^2 + x_0y(K + gx_0^2) + (\frac{1}{2}K + \frac{3}{2}gx_0^2)y^2 +$$

$$\frac{1}{4}gx_0y^3 + \frac{1}{4}gy^4, \quad (31)$$

podemos simplificar um pouco mais, já que:

$$x_0 = \sqrt{\frac{-K}{g}},$$

$$K + gx_0^2 = K - g\frac{K}{g} = 1,$$

e ainda

$$\frac{1}{2}K + \frac{3}{2}gx_0^2 = \frac{1}{2}K + \frac{3}{2}g\frac{-K}{g} = -K,$$

A nova energia total do sistema (E_{t2}), será descrita por

$$E_{t2} = E_t - \frac{1}{2}Kx_0^2 - \frac{1}{4}gx_0^4, \quad (32)$$

substituindo na Eq. (31) temos a nova equação da energia total do sistema.

$$E_{t2} = \frac{1}{2}mv^2 + x_0y - Ky^2 + \frac{1}{4}gx_0y^3 + \frac{1}{4}gy^4. \quad (33)$$

Note que, quando a oscilação ocorre em torno de $\frac{-k}{g}$, podemos definir uma nova constante elástica: $-2k = 2gx_0^2 > 0$, com isso, o significado físico da frequência é recuperado, pois,

$$\omega = \sqrt{\frac{-2k}{m}} = \sqrt{\frac{2gx_0^2}{m}},$$

é real. Interpretamos este resultado como a recuperação da Lei de Hooke para o oscilador anarmônico, que só ocorre porque, com a quebra de simetria, o sistema físico oscila em torno de uma das duas posições de equilíbrio estável deslocadas da origem. Este resultado será retomado na subseção que segue, quando discutiremos como o caso anarmônico pode constituir um tratamento ilustrativo para o campo de Higgs, o qual realiza a quebra espontânea da simetria subjacente à Teoria Eletrofraca

3.3. Analogia entre o oscilador anarmônico e o campo de Higgs

Nesta subseção, vamos trabalhar a analogia entre o oscilador anarmônico e o campo de Higgs. Isso é viabilizado porque o potencial clássico do campo de Higgs da Teoria Eletrofraca é regido por uma função energia potencial da mesma forma que a energia potencial do oscilador anarmônico, isto é, uma função com termos quadrático e quártico. A

coordenada x , do oscilador passa a ser o campo de Higgs, ϕ . Neste sentido, podemos escrever:

$$F_H = -k\phi - \lambda\phi^3, \quad (34)$$

onde as posições de equilíbrio são $\phi = 0$ ou $\phi = \pm\sqrt{\frac{-k}{\lambda}}$.

Da mesma forma, podemos associar a energia potencial do OA, com a do campo de Higgs, fazendo a substituição das coordenadas,

$$E_H = \frac{1}{2}k\phi^2 + \frac{1}{4}\lambda\phi^4 \quad (35)$$

Como realizado na subseção anterior, a quebra de simetria ocorre quando os pontos de equilíbrio estável estão deslocados em relação à origem, estando, agora, à direita ou à esquerda. A mudança de ponto de equilíbrio corresponde ao que denominamos uma transição de fase do sistema. O sistema é essencialmente o mesmo: a massa e a mola, mas com os parâmetros em outra região de valores, de forma que o sistema apresenta uma física diferente daquela correspondente à fase (ou situação) em que a oscilação se dá em torno da origem, quando não ocorre quebra de simetria. Desta forma, precisamos reinterpretá-lo para o caso em que o campo não flutua em torno da configuração de campo trivial (campo nulo), de forma que o problema requer a introdução de uma nova coordenada física, como mostra a Eq 36.

$$\phi = \phi_0 + H \quad (36)$$

É importante destacar que, nesta situação, H representa o campo que corresponde às flutuações (oscilações) em torno da configuração de equilíbrio, ϕ_0 ; é ao campo H que nos referimos como campo de Higgs e a partícula a este associada é o bóson de Higgs. O ponto central na analogia oscilador anarmônico e o campo de Higgs consiste em substituir a coordenada oscilatória, y , em torno da posição de equilíbrio, x_0 , pelo campo de Higgs, H , que flutua em torno da configuração de mínima energia, ϕ_0 . Seguindo com o paralelo entre o oscilador anarmônico e o campo de Higgs, destacamos que o termo em y^2 na expressão da energia dada pela Eq (31), cujo coeficiente é

$$\frac{1}{2}K + \frac{3}{2}gx_0^2 = gx_0^2 + \frac{1}{2}2gx_0^2, \quad (37)$$

corresponde à massa do bóson de Higgs segundo a relação abaixo:

$$m_H^2 = 2g\phi_0^2 = -2K. \quad (38)$$

Lembramos aqui a relação $K = -gx_0^2$ e que, na versão do campo de Higgs, y se torna H e x_0 é substituído ϕ_0 . O fator 2 na expressão acima aparece porque a forma canônica do termo de massa de um campo escalar real, como é o campo H , tem a forma $\frac{1}{2}m^2H^2$.

Aqui, cabe um comentário oportuno, já que se trata de um ponto nevrálgico, e ainda em aberto, da Teoria Eletrofraca; na verdade, do Modelo-Padrão. O parâmetro de restauração, k , é, na verdade, a menos do fator (-2) , a própria massa do bóson de Higgs, como fica explícito na equação acima para m_H^2 . A justa crítica que se faz é que a massa do bóson de Higgs não é um subproduto do mecanismo de Higgs, ou seja, não é gerada pela dinâmica do sistema; ao contrário, é introduzida de forma ad-hoc ao se formular o modelo, é um “input”. Em outras palavras, esta massa já está presente ao se construir o modelo, quando se propõe a expressão da energia potencial.

4. METODOLOGIA

Nesse capítulo é apresentado questões referentes à aplicação do produto: onde foi aplicado, quais os objetivos, os conceitos trabalhados, ferramentas utilizadas, tempo necessário e tudo mais que envolveu o processo de elaboração e aplicação do produto.

4.1. Contexto da Pesquisa

4.1.1 O professor

O professor-pesquisador nasceu em fevereiro de 1994, em Arantina-MG, pequena cidade localizada na serra da Mantiqueira. Na cidade concluiu todo o ensino fundamental e médio, sempre em escolas públicas. Foi então que no ano de 2013, mudou-se para Resende-RJ, para iniciar sua graduação. Ali morou durante 4 anos, retornando a Arantina em julho de 2017, para trabalhar pela primeira vez profissionalmente como professor, na cidade vizinha, Bom Jardim de Minas-MG.

Bacharel em Engenharia de Produção, realizou sua graduação na Faculdade de Engenharia de Resende-FER, que pertence a Associação Educacional Dom Bosco-AEDB, dando início ao curso em fevereiro de 2013 e terminando o mesmo em fevereiro de 2018. Apesar do grande interesse pela física e pela disseminação do conhecimento, possuía pouquíssimo conhecimento a respeito da carreira docente e científica. Devido a isso e a influência sociocultural, a escolha pela engenharia pareceu o mais viável.

Ao longo dos anos de graduação, os horizontes foram ampliados. Conhecendo melhor a academia e com o desejo e a curiosidade pelas questões da natureza que sempre lhe acompanharam, iniciou em Julho de 2017 sua Licenciatura em Física na Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ, pelo consórcio CEDERJ, polo Volta Redonda.

Sua jornada como professor inicia em 2015, quando começa a trabalhar lecionando para alunos particulares, em grande parte, estudantes de engenharia do ciclo básico.

O primeiro contato com a sala de aula ocorreu em março de 2017, na Escola Estadual Padre Francisco Rey em Arantina-MG, onde aplicou a metodologia Peer Instruction no ensino das leis de Newton, em uma turma do 1º ano do ensino médio. Na ocasião, a sala de aula foi utilizada como laboratório para que pudesse testar o aprendizado dos alunos de uma

escola pública, utilizando uma metodologia ativa no ensino de física. Enquanto a professora regente ministrava aulas tradicionais para metade da turma, em um horário distinto, o professor-pesquisador lecionava aulas utilizando o Peer Instruction para os outros alunos. Experiência que serviu como base para seu trabalho de conclusão de curso na faculdade de engenharia e que posteriormente virou livro publicado pela editora Nova Edições Acadêmicas.

Em julho de 2017 começa a lecionar as disciplinas de física e matemática em um curso pré-vestibular na cidade de Bom Jardim de Minas-MG. Desde então, dedica-se à pesquisa em ensino de física e à docência na educação básica da rede pública e em cursos preparatórios para vestibular da rede privada. Também engajado em causas sociais, desenvolve aulas comunitárias de matemática básica, para alunos carentes que encontram na matemática uma barreira para aprendizagem da física.

4.1.2 A comunidade escolar

O produto foi aplicado na Escola Estadual Padre Francisco Rey, que fica localizada na pacata cidade de Arantina, situada no estado de Minas Gerais. A população estimada é de apenas 2787 habitantes (IBGE, 2020) e tem uma economia que gira em torno do trabalho rural, comércio e atividades públicas. A escola Padre Francisco Rey é o único colégio que oferece ensino médio no município, e as aulas são ministradas nos períodos matutino e noturno. O colégio é formado por duas turmas de primeiro ano, uma de segundo ano e uma de terceiro ano, acumulando-se um total de 116 alunos, sendo que desses, 8 vivem na zona rural do município. A priori a escola foi escolhida por possuir uma estrutura julgada adequada para o desenvolvimento de atividades que necessitam de aparatos tecnológicos, como é o caso em questão. O laboratório de informática possui 18 computadores, todos com acesso a internet, o colégio também dispõe de um notebook e um projetor que fica à disposição dos professores. Com a pandemia causada pelo vírus da Covid-19, a estrutura escolar já não importava muito para a aplicação do produto, porém, a escolha pelo colégio foi mantida, visto que o professor-pesquisador possui forte vínculo com o colégio e boa relação com os funcionários.

O produto foi aplicado de forma remota no terceiro ano do ensino médio. A turma possui 28 alunos, porém, apenas 9 estudantes participaram da aplicação do produto. Infelizmente, esse foi o único cenário possível em função da pandemia do COVID-19, uma

vez que os estudantes tinham que possuir computador e ter acesso à internet em suas residências. Essa foi uma medida necessária devido aos protocolos sanitários que mantiveram as escolas fechadas durante a pandemia, visando garantir a saúde dos alunos e da comunidade. Todos os alunos escolhidos moram no perímetro urbano do município. As aulas foram ministradas em um horário não letivo, para que ocorressem com maior liberdade, sem que houvesse problemas como o conflito de horários com as aulas do colégio, permitindo o não comprometimento, do pouco tempo de aula que o professor de física tem, para lecionar os conteúdos, que hoje são contemplados pelo Currículo Básico Comum (CBC) de Minas Gerais. Durante a aplicação do produto educacional foram ministradas quatro aulas de 50 minutos, todas em dias úteis.

4.2. A Pesquisa Baseada em Design e a Construção da Sequência Didática

Nessa seção apresentamos a metodologia de elaboração, aplicação e avaliação da uma sequência didática norteada pela DBR, discutida no Capítulo 2.

Vale lembrar que a DBR possui as seguintes etapas: escolha do tema e dos princípios de design; design; implementação; avaliação e redesign.

É importante destacar no que se refere a escolha do tema: o grupo de trabalho foi composto por mim, meu orientador e coorientador; iniciamos o trabalho definindo o tema “*Quebra espontânea de simetria e mecanismo de Higgs: uma abordagem a partir dos osciladores harmônico simples e anarmônico*”; o tema se justifica pela sua importância e por motivar os alunos ao entendimento de uma física moderna e interessante que transcende a física clássica, sendo de suma importância para o aluno melhor compreender problemas relevantes do universo e da física atual.

Ainda na primeira etapa definimos os princípios de design, que são pressupostos teóricos fundamentais sobre o tema. Em nosso trabalho estabelecemos três princípios, um de natureza epistêmica e dois de natureza didática:

(1) discutir o papel central das teorias e seus modelos na interpretação física da natureza;

(2) preparar material didático com linguagem adequada ao ensino médio para abordar um tema atual da física e discutir o mecanismo de Higgs por meio de uma analogia com o OA;

(3) contextualizar o problema dando a ele significado e utilizar TDIC's para promover a participação do aluno como protagonista da construção do seu conhecimento.

A segunda etapa é a criação do design, ou seja, de nossa sequência didática, cujo principal objetivo é discutir a quebra de simetria e o mecanismo de Higgs a partir dos osciladores harmônico e anarmônico. Para isso, desenvolvemos o tema com um formalismo matemático adequado ao ensino médio, como discutido no capítulo 3, e utilizamos o software *Modellus* como ferramenta facilitadora de conhecimento. No que se refere a aplicação (terceira etapa da DBR), a proposta foi elaborada para ser aplicada em quatro tempos de aula, sendo que cada tempo possui uma hora, além de atividades extraclasse.

É importante mencionar que a seguir apresentaremos uma visão geral da sequência didática, que será apresentada com mais detalhes no Capítulo 5.

Na primeira aula, iniciamos de uma introdução cujo objetivo é dar uma visão geral de todo conteúdo que será trabalhado, para que o aluno possa ter o primeiro contato com alguns tópicos fundamentais, tais como: o conceito de campo, a interação das partículas com o campo de Higgs e a simetria de alguns sistemas. Em seguida, apresentamos o oscilador harmônico simples utilizando um sistema bloco-mola.

A ideia da proposta era apresentar o método das variações para desenvolver as equações da energia para o OHS e o OA. No entanto, em função da necessidade de aplicação remota da sequência didática, devido ao COVID-19, essa etapa não foi realizada como desejávamos. Nós apresentamos e discutimos as equações da energia para ambos osciladores e demos um enfoque mais qualitativo à proposta original.

Na segunda aula, buscando tornar o conteúdo ainda mais palpável, o estudo do OHS será realizado com o auxílio de simulações realizadas no software *Modellus*. Nessa etapa, o professor-pesquisador guia os estudantes para que possam juntos executar a simulação. O *Modellus* é uma ferramenta que torna o estudo mais visual e permite os próprios alunos colocarem a mão na massa e verificarem os distintos comportamentos que surgem com a manipulação das variáveis. No final da aula é proposta uma atividade para casa, conforme Apêndice B. Nela, os estudantes irão realizar a simulação do OA, com diferentes parâmetros e condições iniciais. O objetivo é que ele gere os gráficos utilizando a energia potencial do OA e que o comportamento das curvas para diferentes parâmetros.

O terceiro encontro se inicia com o professor-pesquisador lendo a atividade proposta na aula anterior. Os alunos mostram os resultados obtidos em cada item e a classe discute a

respeito. Nessa parte, o professor inicia a explicação do OA apresentado uma força de “Hooke” deformada (com um termo que vai com x^3) e energia potencial (que vai com x^4), está última já simulada pelos alunos. A partir daí, explora-se os pontos de equilíbrio instável e estável do OA para explicar o conceito de quebra de simetria. Naturalmente, isso acontece a partir dos resultados encontrados na simulação de cada sistema/diferentes parâmetros: existem ou quais são os pontos de equilíbrio? Onde há quebra de simetria?

Por fim, na quarta aula, é realizada a analogia entre o OA e o Campo de Higgs, de forma que as equações são manipuladas e os termos são trocados. O objetivo é mostrar aos alunos que assim como no OA, no Campo de Higgs, também ocorre uma quebra espontânea de simetria, que por sua vez, determina um novo ponto de equilíbrio / nova coordenada física, em torno do qual o sistema oscilará.

Ainda na quarta aula aplicamos uma atividade onde os alunos realizaram em casa algumas questões, com o intuito de avaliar a aprendizagem dos mesmos. Nela, foi pedido que os alunos calculassem a frequência de onda associada à massa de alguns corpos. A lista também continha exercícios com perguntas associadas aos conceitos de: Oscilador Anarmônico, descreva com suas palavras, como estão associados: simetria, quebra de simetria, ponto de equilíbrio de um sistema, a frequência de oscilação e energia potencial do sistema.

A seguir mostramos o Quadro 1 com um resumo da sequência didática.

Quadro 1 - Cronograma de Atividades

Aula e Data	Atividades	Ferramentas utilizadas
Aula 1 05/07/2021	Overview do conteúdo que será abordado ao longo da sequência didática e explicação do oscilador harmônico simples.	1- Internet 2- Notebook 3- Powerpoint 4- Mesa Digitalizadora 5- Google Meet 6- Youtube
Aula 2	Realizar a simulação de um oscilador harmônico simples	1- Internet 2- Notebook

06/07/2021	por meio de um software.	3- Modellus 4- Mesa Digitalizadora 5- Google Meet
Atividade para casa 06/07/2021 até 11/07/2021	Realizar simulações do OHS e do OA no Modellus e responder questões referentes a conteúdos abordados em aula.	1- Notebook 2- Modellus
Aula 3 12/07/2021	Apresentação das atividades realizadas em casa e explicação do OA e da ideia de quebra de simetria.	1- Internet 2- Notebook 3- Modellus 4- Mesa Digitalizadora 5- Google Meet 6- Power Point
Aula 4 13/07/2021	Analogia entre o OA e a quebra espontânea de simetria no campo de Higgs. Massa de Higgs? Questionário?	1- Internet 2- Notebook 3- Power Point 4- Mesa Digitalizadora 5- Google Meet

Fonte: Próprio Autor

Após a elaboração do design/sequência didática é iniciada a terceira etapa que consiste na implementação da sequência didática, que ocorreu no colégio descrito na seção 4.1, em formato remoto, em função da pandemia, com parte de uma turma do 3º ano do ensino médio. Durante a implementação ocorreu também a quarta etapa do DBR, que se refere a avaliação da sequência didática, cujo objetivo foi verificar se os resultados encontrados indicavam que objetivos e princípios definidos foram alcançados.

No que refere a avaliação, realizamos uma pesquisa qualitativa, que segundo Godoy (1995) não tem o intuito de utilizar instrumentos estatísticos para analisar os dados, mas sim, de analisar dados descritivos que são colhidos durante a pesquisa e que, dessa forma, tornam

possível a descrição dos objetos estudados. Seguindo Zabalza (2004) que diz que os dados são constituídos por registros realizados durante as atividades, para isso, optamos por utilizar o método de análise de conteúdo baseado na narrativa do professor pesquisador, que permite ao professor pesquisador, figura participativa durante todo o processo, colher e interpretar os dados gerados ao longo da aplicação da sequência didática.

Como ferramenta de coleta dessas informações, foram utilizados um diário de anotações do professor-pesquisador e a plataforma de gravação de áudio "Vocaroo". Qualquer tipo de interação aluno-professor e aluno-aluno que ocorreu durante a sequência didática foi gravada na plataforma e, logo após a aula, transcrita para o diário. Vale destacar que os alunos e responsáveis autorizaram a gravação dos áudios e o único a ter acesso a esse material (que foi excluído imediatamente após cada aula) foi o professor-pesquisador.

A apresentação da atividade proposta para realização em casa, após a segunda aula, e o questionário aplicado na parte final última aula, também foram fundamentais para a interpretação dos resultados alcançados.

Por fim é realizado o re-design, onde são reelaborados alguns pontos da sequência didática que foram identificados como falhos no processo de avaliação. Já as etapas do produto que tiveram êxito no que foi proposto continuam a integrar a sequência didática, obviamente. Nessa pesquisa, realizamos uma única vez cada uma das etapas da DBR, porém, como alertam Kneubil e Pietrocolla (2017), o processo pode ser repetido inúmeras vezes, visando a otimização da sequência didática. Esse é um aspecto positivo da DBR, pois possibilita os pares partirem de um ponto e trabalharem em cima de modelos de sequência didática, de forma que o conhecimento seja sempre aprimorado.

De acordo com Lijnse (2010), nesse ponto, espera-se que o professor-pesquisador tenha conseguido preencher o espaço vazio que existe entre o conhecimento teórico e prático.

5. PRODUTO EDUCACIONAL E APLICAÇÃO

5.1 A Sequência de Ensino

Nesse capítulo iremos detalhar toda a sequência didática, mostrando o conteúdo abordado em cada aula, as ferramentas necessárias, os conceitos físicos trabalhados e os objetivos em cada passo. Como comentado na seção anterior, esse trabalho traz uma sequência didática, para ensinar o mecanismo de Higgs, por meio de uma analogia com OHD, com a utilização do Modellus para realização de simulações. Utilizando os referenciais teóricos descritos no capítulo 2.1., elaboramos nossa sequência didática, seguindo um cronograma de atividades que busca passar um conteúdo de certa complexidade, no menor tempo possível, visto que é sabido que o tempo de aula de física na educação básica é escasso.

A sequência didática é composta por um total de seis aulas, sendo que cada uma aula corresponde ao tempo de 50 minutos. A seguir descrevemos as aulas separadamente por sessões.

5.1.1. Aula 1 - Os osciladores harmônicos e o campo de Higgs

Principais conceitos trabalhados: Oscilador harmônico simples; Oscilador harmônico deformado; Campo de Higgs

Objetivo: Passar uma visão geral a respeito do conceito de Campo na Física, Campo de Higgs e sua interação com as partículas e fazer uma breve revisão do OHS.

Tempo Necessário: 50 minutos

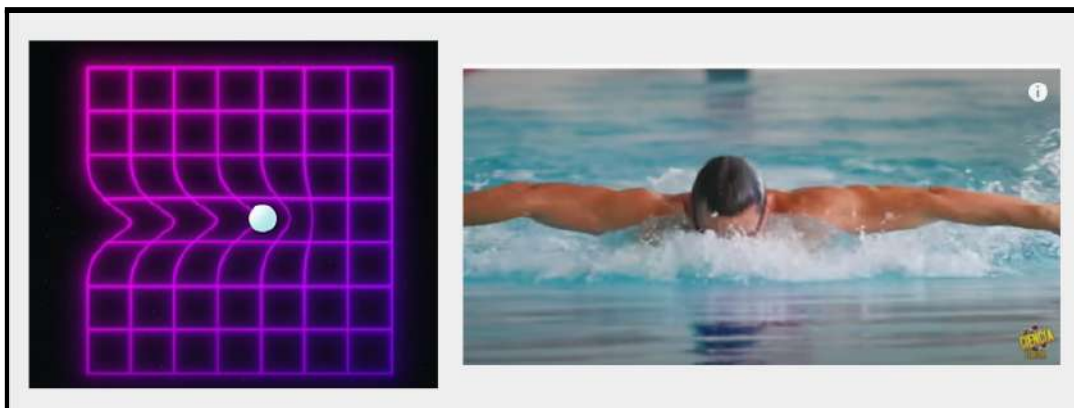
Na primeira aula o professor apresenta uma visão geral do que será estudado, mostrando de forma leve e introdutória o conceito de campo, simetria, quebra de simetria e o problema da geração de massa de algumas partículas.

Essa apresentação geral do tema, visa problematizar as questões que serão discutidas ao longo do que se propõe a sequência didática, buscando motivar o aluno e o informar brevemente o que estudaremos. Para realização dessa breve introdução ao tema, são

utilizados dois vídeos de apoio, contendo animações que podem facilitar a compreensão dos alunos.

O primeiro vídeo (Figura 13) é intitulado “*O Bóson de Higgs EXPLICADO*” (Loos, 2021).

Figura 13 - O Campo de Higgs e o Nadador

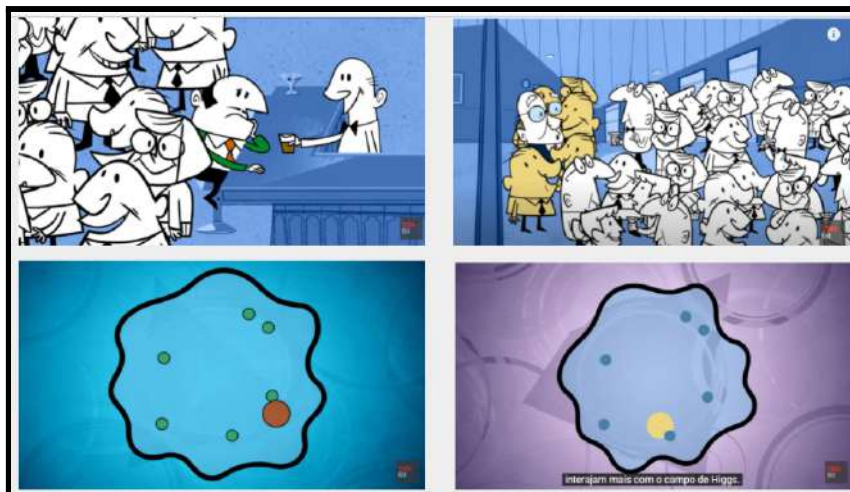


Autor: Loos (2021) (editado)

O professor-pesquisador mostra apenas os instantes em que é abordado o que é entendido com um campo na física, e onde por meio de uma analogia entre um nadador que se movimenta na água e partículas que interagem com o campo, tenta elucidar a interação de algumas partículas com o Campo de Higgs e, por consequência, a origem de suas massas. Nesse exemplo, o nadador faz a função das partículas que interagem com o campo. A água por sua vez seria o Campo de Higgs. O autor propõe que quanto maior a interação entre a água e o nadador, mais difícil será para o último se mover. Da mesma forma, quanto maior a interação entre o campo e a partícula, maior será a massa de tal.

O segundo vídeo também utiliza de uma analogia para explicar a interação de certas partículas com o campo, como mostra a Figura 14.

Figura 14 - O Campo de Higgs e os Clientes



Autor: Powerhouse Animation Studios Inc (2013) (editado)

Dessa vez é apresentada uma alegoria: um homem que ao entrar em um bar, consegue tranquilamente passar pela aglomeração de clientes, esse homem representa uma partícula que não interage com o campo, enquanto o campo é representado pelos clientes. Logo após, um homem que representa as partículas que interagem com o campo de Higgs, entra no bar e sente dificuldade em se deslocar.

Após isso é aberta uma discussão com a classe e os alunos apontam suas dúvidas e conclusões acerca do que viram. O professor deve guiar os estudantes de forma que o assunto não saia da esfera do que a sequência didática propõe, ou seja, da discussão a respeito do campo de Higgs.

Concluída a primeira parte da aula (apresentar o campo de Higgs aos estudantes), o professor propõe o entendimento de um sistema físico para compreensão do Campo de Higgs, é iniciado então os estudos referentes ao oscilador harmônico simples (OHS). O OHS é o ponto de partida para compreensão mais profunda do conceito de simetria.

Por meio de alguns exemplos desse sistema na natureza, que o professor apresenta, como um relógio de pêndulo e um sistema massa-mola. Busca-se permitir ao estudante, a criação de um vínculo entre, os conceitos aprendidos de maneira teórica e a prática cotidiana.

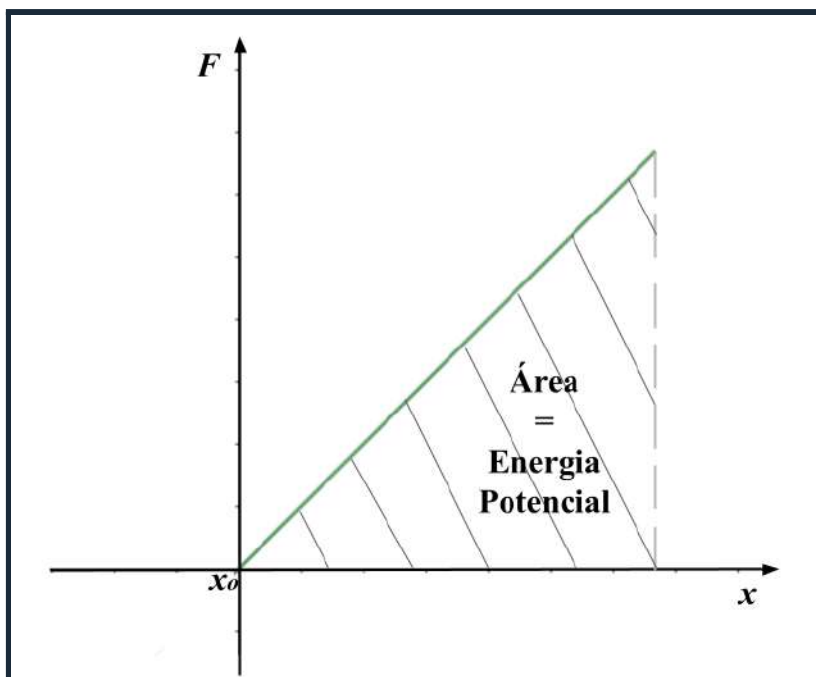
Figura 15 - Relógio de pêndulo, exemplo de OHS



Fonte: Saber Sistêmico (2021)

Feito isso, inicia-se a explicação de conceitos básicos, tais como: frequência e energia potencial do oscilador, necessários para a compreensão das equações do oscilador harmônico, que serão utilizadas na simulação da aula seguinte. É importante ressaltar que esses conceitos são conhecimentos prévios apenas revisados. Dessa forma, o professor começa o estudo das equações de energia do oscilador e do movimento harmônico, a partir da equação de Hooke. Tudo será desenvolvido manipulando equações por meio de técnicas de matemática básica, sem o uso de cálculo diferencial e integral ou qualquer outra ferramenta não contemplada no ensino básico. Para tal, a proposta é utilizar o formalismo matemático apresentado na seção 3, porém, devido a dificuldade de ministrar as aulas à distância (em função da pandemia), apresentamos somente as equações das energias do OHS, relacionando-as com a Física do sistema, obtendo a equação a partir do cálculo da área do gráfico da *Força Elástica x Módulo da Deformação da mola*, como demonstrado na Figura 16.

Figura 16 - Gráfico Força x Deformação da mola



Fonte: Próprio Autor

O ponto x_0 indica a coordenada em que a deformação da mola é igual a zero. A área tracejada tem a forma de um triângulo retângulo, cujo a área é calculada pela Eq. (39),

$$\text{Área} = \frac{b \cdot a}{2}, \quad (39)$$

onde b e a representam respectivamente a base e a altura do triângulo. Sendo a área igual a energia potencial elástica, a base igual o módulo da deformação da mola e a altura a força elástica, podemos deduzir que,

$$E_p = \frac{xF}{2} = \frac{x(xk)}{2} = \frac{kx^2}{2} \quad (40)$$

Destaca-se que, nessa etapa, a ideia é uma introdução geral com objetivo de contextualizar e problematizar o tema, além dos vídeos o professor utiliza um conjunto de slides como ferramenta de apoio, além da utilização de uma mesa digitalizadora. Os slides podem ser encontrados no Apêndice D.

5.1.2 Aula 2 - Simulando o OHS

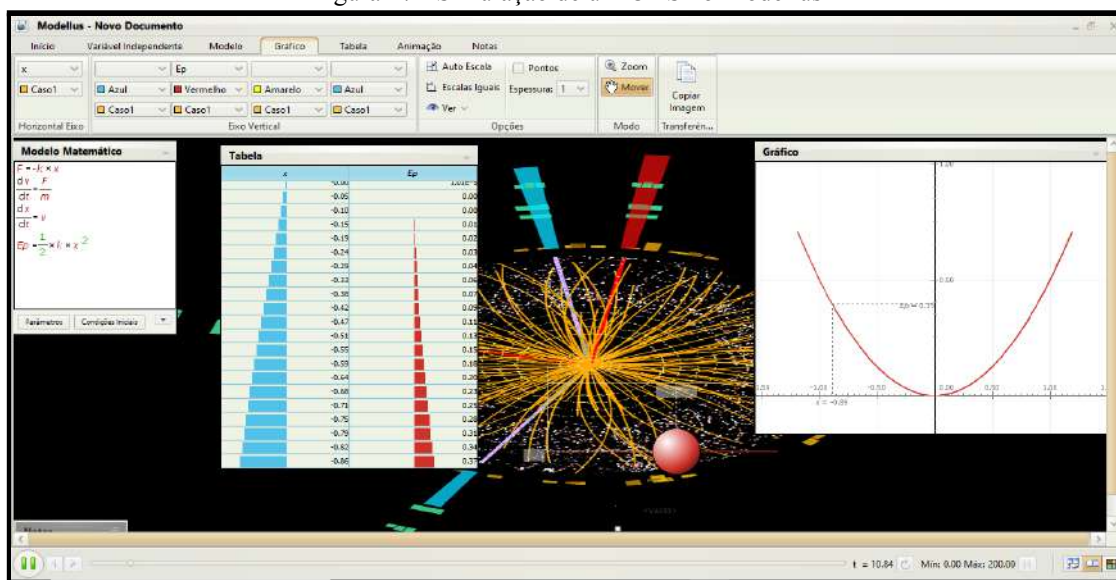
Principais conceitos trabalhados: Movimento harmônico simples

Objetivos: Possibilitar uma melhor visualização do comportamento do oscilador harmônico simples, e dessa forma melhorar a compreensão do aluno a respeito do tema.

Tempo Necessário: 50 minutos

Para o segundo encontro, os estudantes realizam, com a ajuda do professor, a simulação das equações trabalhadas. O software Modellus é o escolhido para realização dessa atividade, pois possui fácil manuseio e não necessita de linguagem avançada de programação, dessa maneira os alunos poderão reproduzir as equações trabalhadas em sala, exatamente da maneira como essas são escritas. O intuito é tornar mais palpável as informações que as equações nos mostram.

Figura 17 - Simulação de um OHS no Modellus



Fonte: Próprio autor

Resumindo, de posse das equações, das constantes do problema e das condições iniciais, obtemos várias informações com tratamento gráfico diferenciado através de um comando simples. Isso pode permitir uma série de discussões entre professor e aluno, bem como a exploração por parte do aluno de diferentes situações e modelos. É importante destacar alguns pontos. Primeiro, as variáveis que aparecem no gráfico e na tabela, bem como as cores que as representam, são definidas pelo estudante/professor nas abas Gráfico e Tabela. Segundo, que as constantes do movimento são inseridas na aba Parâmetros, por

exemplo, em nossa simulação escolhemos $k = 1,0 \text{ N/m}$ e $m = 1,0 \text{ Kg}$. Da mesma forma, as condições iniciais são inseridas na aba Condições iniciais, onde escolhemos $v(t = 0) = 1,0 \text{ m/s}$ e $x(t = 0) = 0 \text{ m}$. Também é importante dizer que o programa gera gráficos e tabela animadas (com movimento) para um dado intervalo de tempo de t_0 a t em segundos (s).

No final da aula foi proposta uma atividade para casa onde os alunos realizam simulações com outras variáveis e parâmetros, que conseqüentemente, irão culminar em resultados diferentes daquele encontrado em aula. Com esses resultados, se fará possível a próxima discussão, que será realizada na aula seguinte: a quebra de simetria no oscilador.

5.1.3. Aula 3 - A quebra de simetria a partir do Oscilador Anarmônico

Principais conceitos trabalhados: Movimento harmônico com quebra de simetria; Lei de Hooke; Energia Mecânica

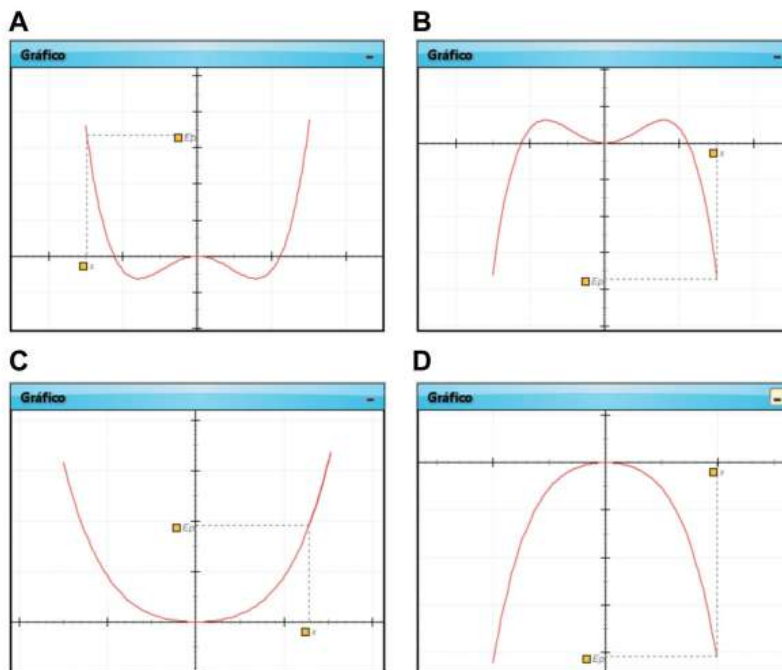
Objetivos: Compreender o movimento de um oscilador anarmônico que se diferencia da Lei de Hook pela adição de um termo x^3 e obter sua energia potencial.

Tempo Necessário: 50 minutos

Nessa aula os grupos apresentaram o resultado que obtiveram a partir da simulação da equação de energia potencial, dos osciladores harmônicos simples e deformado, conforme solicitado na atividade para casa que se encontra no Apêndice B.

A atividade solicita que o aluno insira determinados parâmetros e que escreva as equações no *Modellus*, de tal forma que serão encontrados quatro resultados possíveis para a energia potencial dos osciladores (Ep) em função do deslocamento (x), sendo um deles a energia de um oscilador anarmônico, como mostra a Figura 18.

Figura 18 - Simulações da Energia Potencial de Osciladores Harmônico e Anarmônico no Modellus



Fonte: Próprio autor

Na Figura 18, temos os resultados obtidos quando inseridos os seguintes parâmetros: A) $k = -2,0 \text{ N/m}$ e $g = 0,80 \text{ N/m}^3$; B) $k = 2,0 \text{ N/m}$ e $g = -0,80 \text{ N/m}^3$; C) $k = 2,0 \text{ N/m}$ e $g = 0,80 \text{ N/m}^3$; D) $k = -2,0 \text{ N/m}$ e $g = -0,80 \text{ N/m}^3$. O objetivo será instigar o aluno a identificar as diferenças entre os dois sistemas (harmônico e anarmônico) por meio desses resultados.

Cada aluno tem sua vez de mostrar os resultados encontrados. A discussão é realizada com toda a turma, em cima de todos os trabalhos. Em meio a conversa, é importante que o professor se atente sempre em conduzir os estudantes para nuances de cada simulação.

Realizada a discussão em torno das atividades, o professor apresenta o conceito de quebra de simetria, partindo da análise gráfica da energia dos osciladores. Essa é uma parte expositiva, onde o professor mostra para a classe que no oscilador anarmônico, assim como qualquer outro sistema físico, o sistema busca um ponto de mínima energia e dessa forma a simetria é quebrada, pois espontaneamente o sistema “escolhe” oscilar a direita ou esquerda. Isso é o que chamamos de quebra espontânea de simetria.

Como podemos ver a quebra de simetria só ocorre para valores de $k < 0$ e $g > 0$, Figura 18A. Para $k > 0$ e $g < 0$, Figura 18B, vemos que a força é repulsiva para valores grandes de x . Nos outros casos, (Figura 18C e D), não identificamos quebra de simetria.

5.1.4. Aula 4 - O mecanismo de Higgs

Principais conceitos trabalhados: Oscilador harmônico deformado; Mecanismo de Higgs; Campo de Higgs.

Objetivos: Conectar os conceitos do oscilador com o campo de Higgs

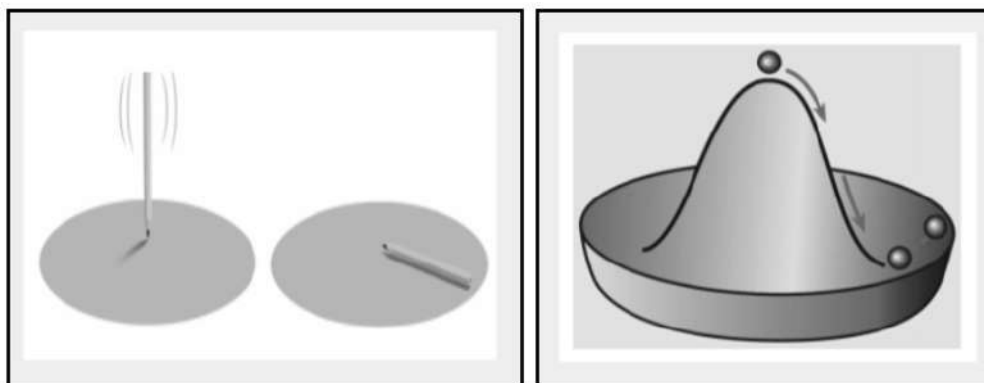
Tempo Necessário: 50 minutos

Nesse encontro, o professor dá continuidade à analogia entre o OHD e o Campo de Higgs, mostrando como o comportamento dos sistemas podem ser comparados. Essa é a aula para as dúvidas finais serem sanadas, e as últimas questões serem levantadas.

O objetivo é guiar os estudantes, para que eles sejam capazes de compreender como esse tipo de movimento estudado, nos possibilita entender a geração do campo de Higgs, o que por sua vez possibilita algumas partículas possuírem massa.

Fazendo comparações entre as diferentes simulações, o professor consegue mostrar como em alguns casos perdemos o que chamamos de estado ligado. Para outras situações a ligação é mantida mas a simetria não é quebrada. Por fim, em um caso onde temos variáveis com sinais específicos, ocorre a quebra de simetria e é estabelecido um novo ponto de equilíbrio, onde a simetria é obtida novamente. A exposição de algumas imagens (Figura 19) também auxiliam na explicação.

Figura 19 - Lápis e esfera tendendo ao estado de mínima energia.



Fontes: <http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/info.pdf>
<https://cerncourier.com/a/from-bcs-to-the-lhc/1/CChig5_01_08> (Compilado pelo Autor)

Assim como um lápis que quando é equilibrado em sua ponta, tende a cair para um dos lados, como se “escolhesse” espontaneamente esquerda ou direita, o mesmo ocorre com o oscilador anarmônico.

A também mostra uma esfera colocada no ponto máximo de um “chapéu mexicano”. Essa esfera está em um ponto instável e por isso tende a rolar para um dos lados, onde ficará oscilando em torno do ponto de mínima energia potencial. Esse exemplo elucidado como uma simetria é quebrada e logo após é restabelecida em torno de um novo ponto de equilíbrio, com frequência definida por novos parâmetros, como ocorre no OA. Agora o professor manipula as equações e troca os parâmetros para mostrar o campo de Higgs por meio do OA, como apresentado no final da seção 3.2.

Para finalizar a aula, o professor mostra como podemos relacionar: energia, frequência de oscilação de partículas e corpos e as suas respectivas massas. Para isso, o professor apresenta a seguinte equação,

$$\omega = \frac{2\pi c^2 m}{h},$$

encontrada no Apêndice C. Esse Apêndice contém a lista de atividades que os alunos devem fazer em casa, finalizando assim a sequência didática

5.2 Redesign

Após análise das narrativas encontradas no Capítulo 6, julgou-se necessárias algumas alterações na sequência de ensino para otimizar o produto educacional. Nessa etapa de redesign apresentamos essas modificações, que não foram mencionadas na seção 5.1. mas se encontram no Produto Educacional (Apêndice A).

Visando deixar a sequência mais clara para o professor, especificamos que existe a possibilidade de percorrer dois caminhos ao longo da sequência:

1. Abordagem em que apresentamos uma linha mais tradicional no que se refere ao desenvolvimento das equações de energia para o OHS. Ela tem a vantagem de ser mais conhecida pelo aluno. Para o OA apresentamos uma “Lei de Hooke” deformada por um termo adicional proporcional a x^3 e a energia potencial associada a um sistema

que oscila sujeito à essa força. Note que não há um desenvolvimento matemático algébrico ou geométrico para encontrar a energia partindo da força deformada.

Nesse produto apresentaremos a opção 1. O motivo é simples, a 2ª opção é igual a 1ª opção, com adição do Apêndice E;

2. Desenvolvimento das equações da energia a partir da Lei de Hooke através do método das variações, que é muito mais elegante e sutil. Ele permitirá que as equações de energia sejam desenvolvidas tanto para o OHS, quanto para o OA. O desenvolvimento completo para OHS e OA está no Apêndice E. É importante mencionar que, no caso de utilização dessa abordagem o tempo de aplicação do produto educacional deve ser acrescido em duas aulas. Uma para desenvolvimento das equações do OHS e outra para o OA. Também destacamos que esse produto foi elaborado pensando na opção 2, no entanto, em função da pandemia e do ensino remoto, a opção 1 se tornou necessária. Por isso, resolvemos manter as duas opções para o professor.

A segunda alteração diz respeito a adição do exercício 5, na Atividade 2 (Apêndice C). Notamos que faltava uma atividade para trabalhar o conhecimento dos estudantes no que se refere a associação entre a massa de Higgs, a massa das outras partículas massivas que compõem o modelo padrão e suas respectivas constantes de acoplamento, como demonstrado no capítulo 3.

Por fim, adicionamos uma aula (Aula 5) à sequência didática. Essa aula foi elaborada para que o professor possa corrigir e debater a Atividade 2 junto com a classe.

6. APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

Nesse capítulo apresentaremos a aplicação e avaliação do produto educacional. A avaliação será realizada com base em uma pesquisa qualitativa através da narrativa do professor-pesquisador. Nesse sentido, a narrativa do professor sobre a aplicação do produto servirá de parâmetro para avaliar a interação entre produto educacional, professor e alunos.

Para contribuir com essa análise, o professor gravou as aulas em formato de áudio, por meio da plataforma vocaroo. No término de cada aula o professor-pesquisador ouvia o áudio e transcrevia em um diário, única e exclusivamente para narrar com mais detalhes a aplicação do produto. Como afirma Zabalza (2004), o diário se apresenta como uma ferramenta eficiente para o processo de avaliação da sequência didática.

6.1. Narrativa da Aplicação

6.1.1. Primeira Aula

A aplicação da Sequência didática (sequência didática) teve início no dia 5 de julho de 2021 às 20:07 horas. É importante dizer que para resguardar a identidade dos estudantes, os mesmos serão identificados por letras: Estudante A, Estudante B, Estudante C, etc.

Como dito anteriormente, devido a pandemia causada pela COVID-19, as aulas foram ministradas de forma remota, via Google Meet. Cerca de 30 minutos antes do começo da aula, o professor-pesquisador enviou o link de acesso à plataforma virtual. Alguns minutos antes do link ser enviado, dois alunos se manifestaram via whatsapp, indagando o docente a respeito do link que ainda não havia sido disponibilizado. Alegaram “ter medo de não conseguir entrar na sala”. O professor informou que em instantes estaria disponível e se mostrou disposto a ajudar caso surgisse qualquer dificuldade referente ao acesso. No entanto, empecilhos não foram encontrados e às 20:00 horas (horário combinado), a maioria da classe estava presente. Apenas um estudante compareceu com 7 minutos de atraso, segundo o mesmo, provocado por problemas com a conexão da internet. Com a turma completa a aula foi iniciada. O professor-pesquisador deixou claro para turma que os alunos tinham total liberdade para interromper a aula a qualquer momento para dúvidas e questionamentos.

A primeira problematização foi feita: o que os alunos entendiam por “campo”. Os estudantes deram exemplos de campos estudados nas aulas de física, mais especificamente o gravitacional e o eletromagnético. Alguns disseram lembrar de futebol ou um lugar com flores e grama.

Para não fugir do tema proposto, o professor-pesquisador direcionou os estudantes para a discussão em torno de campos na física. Questionados, os discentes disseram que ocorria atração ou repulsão no eletromagnético, enquanto no gravitacional as coisas caíam, indo sempre para baixo. Esse último comentário foi importante para a abordagem do conceito de energia potencial. Através do qual foi possível direcionar a turma para o entendimento da busca de equilíbrio dos sistemas físicos, tendendo ao ponto de mínima energia.

Quando questionados sobre o conceito de energia potencial, a maioria dos alunos responderam que lembravam de ter estudado, mas alguns não se recordavam.

Professor-pesquisador: Quando colocamos uma partícula que possui uma massa “m”, em uma região que age o campo gravitacional da Terra, aparece uma energia, associada ao sistema Terra-massa, que chamamos de potencial gravitacional. Temos também uma força associada. Lembram?

Dessa vez nenhum dos alunos lembrou. O professor recorreu à equação da força gravitacional de Newton para mostrar como uma força pode estar associada a uma energia, que por sua vez está associada a um campo.

Indo além, expôs a partir do exemplo do campo gravitacional, essa tendência da busca pelo ponto de mínima energia nos sistemas físicos, e que o campo de Higgs, que seria estudado nas próximas aulas, não fugia à regra.

Nesse momento foram exibidos trechos de dois vídeos, para trabalhar por meio de analogias com objetivo de ter uma noção do conceito de um campo, mais especificamente, sobre o campo de Higgs. Após, iniciou-se o debate a respeito do que foi visto nos vídeos. Em especial um comentário chamou atenção.

Aluno G: Se o campo de Higgs da massa para as partículas, essa massa vai mudar de acordo com a posição da partícula?

Esse comentário é bem interessante e mostra como os discentes poderiam estar interpretando com base nos campos que eles conhecem, o eletromagnético e o gravitacional, assim a força que agia sobre os corpos variava de acordo com a posição dos mesmos.

O professor intervém tentando quebrar essa possível associação com relação a ganho de massa x espaço. Diz que nesse caso, o que vai mudar é a interação: algumas partículas interagem mais com o Campo de Higgs, portanto sua massa é maior, outras com menos massa interagem menos como o campo de Higgs.

Nessa parte da aula, o professor-pesquisador explicou que alguns conceitos e sistemas físicos seriam essenciais para o entendimento do campo de Higgs, e conduziu os alunos para o estudo de dois deles: primeiramente o conceito de simetria e depois o oscilador harmônico. São apresentadas duas imagens contidas no quinto slide, encontrado no Apêndice D. Os alunos entendem que os dois lados das figuras são iguais, ou seja, simétricos. O professor pede exemplos de outras simetrias. Os alunos não possuem dificuldades em encontrar alguns, como: campo de futebol, quadra de tênis e até mesmo os dois lados de um avião dividido ao meio.

O professor apresenta um slide (Apêndice D) com imagens animadas, contendo uma molécula de amônia onde três átomos de Hidrogênio oscilam em torno de um plano imaginário onde se encontra uma molécula de Nitrogênio, e um relógio de pêndulo. Questionados se aqueles sistemas apresentavam simetria, todos os alunos responderam que sim. Então, o professor-pesquisador mostra um sistema massa mola e associa-o aos exemplos anteriores, explicando conceitos como frequência oscilação e ponto de equilíbrio.

Outro ponto muito importante da aula, foi quando o professor-pesquisador questionou o sinal negativo da força elástica restauradora. Indagados em um primeiro momento, nenhum aluno conseguiu elaborar uma resposta. O professor-pesquisador solicita que os alunos olhem para a imagem na busca por uma relação entre a força restauradora da mola e o movimento do bloco. Com a dica, a classe compreende que a força era sempre contrária ao movimento.

Aluno B: Parece que a força tenta segurar o bloco em um lugar.

Por meio dessa análise o professor conecta essa busca pelo equilíbrio do sistema massa-mola com os exemplos dos campos citados anteriormente.

Prosseguindo a aula e fazendo uma ponte entre o comportamento da força, buscou-se uma análise a respeito da energia potencial do oscilador harmônico simples, obtida através do cálculo da área do gráfico onde o comportamento da força é apresentado no eixo vertical em função da deformação da mola no eixo "x", como mostra a Figura 16.

Para tornar a explicação ainda mais visual, foi passada uma animação de um sistema massa-mola, contida no Slide 10 do Apêndice D.

Os discentes relataram que com a animação, se tornou bem mais fácil entender a relação entre o movimento, a força e a energia do sistema. A respeito da equação da energia associada ao trabalho, encontrada por meio do cálculo no gráfico, não houve questionamentos. Segundo eles, o cálculo de área de figuras planas era constantemente trabalhado na disciplina de matemática. Apesar do cálculo de área ser comum para os estudantes, foi notório o entusiasmo deles ao conferir que era possível encontrar uma relação entre a força e a energia potencial.

Aluno G: É legal ver a ligação entre as coisas. Parece que tudo no universo “tá” conectado.

Aqui a aula é encerrada. Os estudantes estavam entusiasmados e aparentemente a maioria conseguiu compreender o que foi estudado até o momento.

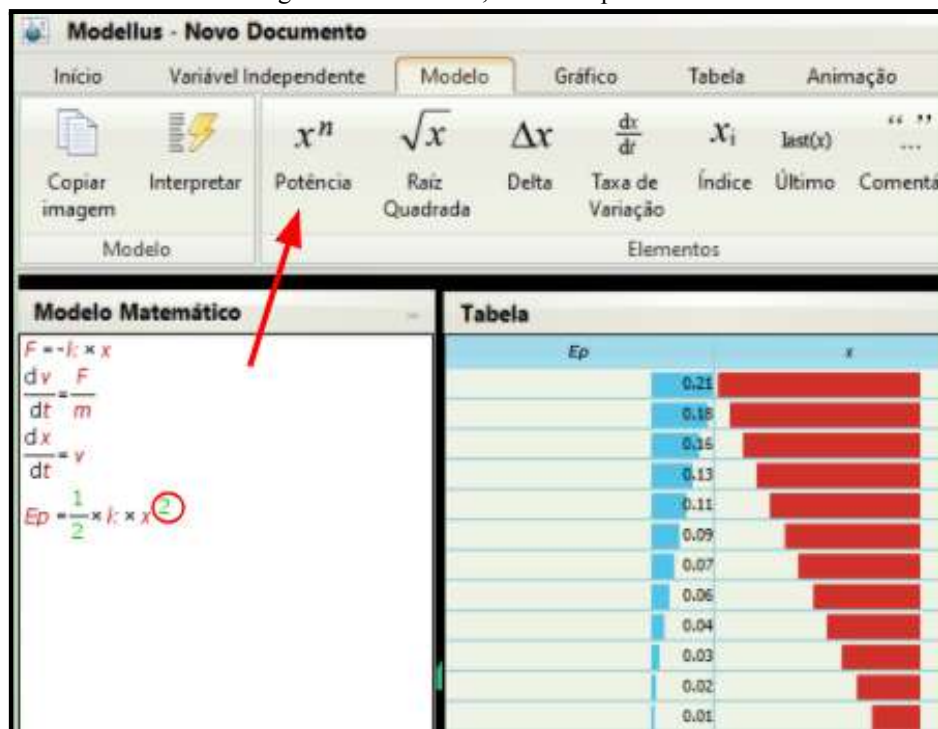
6.1.2. Segunda Aula

A segunda aula foi ministrada no dia 6 de julho de 2021. Dessa vez sem atraso ou perguntas prévias sobre o acesso a aula. *Dando continuidade aos estudos da última aula, o professor-pesquisador apresenta o software modellus como a ferramenta que seria utilizada para simular gráficos da energia potencial associada ao OHS.* Como combinado e conversado antes, todos instalaram com antecedência o programa em seus computadores. Mais uma vez foi notável o empenho dos estudantes que se preocuparam em deixar uma aba do software aberta, antes mesmo de começar a aula, mostrando preocupação em se anteciparem e evitar um possível evento negativo.

O trabalho foi iniciado com a descrição das equações na janela “modelo matemático”. Nessa etapa os alunos encontraram duas dificuldades. As únicas que houveram durante a aula.

A primeira dificuldade relatada foi um fator comum entre quatro alunos: colocar o expoente na equação de energia. Esses alunos não conseguiram digitar o expoente por meio do atalho “SHIFT + acento circunflexo”. É possível que esse problema esteja relacionado com o padrão de layout do teclado, já que todos que o questionaram, possuíam um computador com teclado de layout inglês. Contudo, o problema foi facilmente resolvido, por meio de orientação do professor-pesquisador, que mostrou aos alunos que a mesma função poderia ser acionada por meio do painel em “modelo” na seção “elementos”,

Figura 20 - Modellus, inserindo potência.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 20 mostra o comando que poderia ser acessado para inserir a potência no termo x da equação da energia potencial do OHS, resolvendo assim o problema relatado.

Só próximo ao final da aula, no momento de executar a simulação, surgiu o segundo erro. Apesar de consideravelmente simples de ser solucionado, o empecilho rendeu um bom intervalo de tempo, para que pudesse ser detectado. Um aluno relata que em sua simulação o gráfico e a tabela não apareciam na tela. O aluno compartilhou a tela para que o grupo pudesse averiguar o que ocorria. Depois de muita observação e tentativas frustradas de solução, um colega fez a observação que seria derradeira.

Aluno C: Professor, o x dele “tá” escrito em maiúsculo. Não tinha que ser minúsculo?

O professor-pesquisador então percebeu o “detalhe” que realmente era a causa do problema em questão. Assim que o Aluno D fez a alteração, deixando assim todos os termos x escritos em minúsculo, e executou a simulação, o gráfico e a tabela representaram o que se esperava.

Foi solicitado que todos os alunos refletissem a partir do gráfico, sobre os temas levantados na primeira aula, dando um olhar especial a: simetria, força restauradora, ponto de equilíbrio e energia potencial. Foram levantados pontos importantes. Os discentes levantaram questões como: onde se encontrava o ponto de equilíbrio, o aumento da energia potencial com o distanciamento do bloco em relação ao ponto de equilíbrio e a simetria do sistema.

Aluno G: Eu acho que o ponto de equilíbrio “tá” em cima do eixo da energia. No ponto zero. Ali a gente vê a mesma imagem de um lado e do outro.

Aluno D: É. A energia é igual dos dois lados.

Aluno A: E dá pra ver que quanto mais longe a partícula tá, mais a energia aumenta.

No fim da aula todos disseram ter entendido bem os conceitos físicos trabalhados. Quanto ao manuseio da simulação, o desenvolvimento ocorreu de maneira contínua, sem que os alunos encontrassem grandes dificuldades. O professor-pesquisador solicitou que realizassem uma lista de atividades. Os resultados encontrados seriam discutidos no início da próxima aula.

6.1.3. Terceira Aula

O terceiro encontro ocorreu na semana seguinte à aula dois, no dia 12 de julho de 2021 e teve início por volta de 20:30 horas. O atraso foi devido a problemas com a conexão da internet banda larga, que ocorreu tanto na casa dos alunos, como na casa do professor. O contato com a turma foi mantido via aplicativo Whatsapp e assim que o sinal foi restabelecido todos entraram na sala de aula virtual.

O professor-pesquisador abre para apresentação dos trabalhos. Em sequência, os alunos compartilham seus resultados. Alguns relatam que o movimento da partícula é diferente do que foi visto no primeiro caso (OHS). Eles parecem entender que ainda existe simetria, porém que algo mudou em relação ao ponto de equilíbrio.

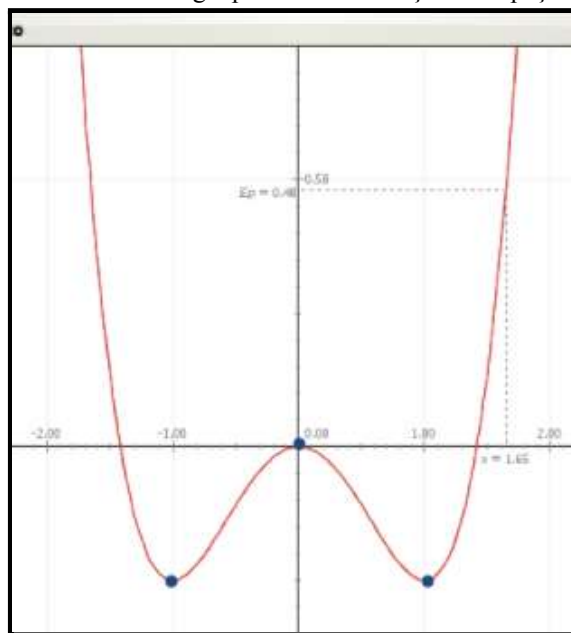
Aluno G: Mas o lado esquerdo do eixo é igual ao lado direito também. Mas parece que agora são três pontos de equilíbrio? Tem como isso?

A primeira questão da lista de exercícios solicitava que os estudantes comparassem as simulações da energia potencial dos osciladores (oscilador harmônico simples e oscilador anarmônico). Nas respostas enviadas e na conversa instaurada em aula, foi possível

identificar que a maioria dos estudantes fizeram apontamentos quanto à mudança do movimento devido à força.

A maior parte da turma também identificou três pontos de equilíbrio no gráfico da energia potencial do oscilador harmônico deformado, como constatado nas respostas referentes à questão 2.

Figura 21 - Gráfico da energia potencial em função do espaço de um OA.



Fonte: Próprio autor.

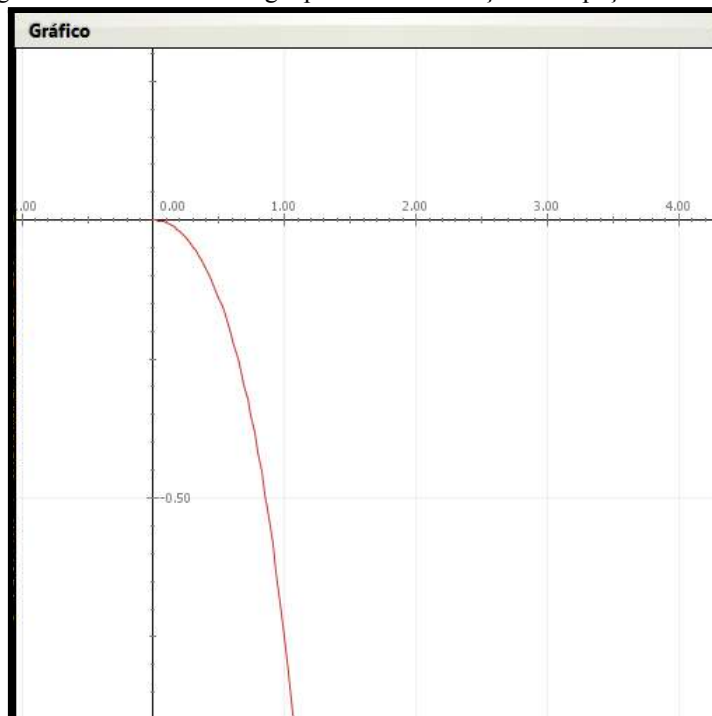
Na Figura 21, os pontos azuis marcam os pontos que os alunos julgaram como pontos de equilíbrio para o OA. Nenhum aluno conseguiu dizer se havia pontos de equilíbrio estável. Alguns alegaram não saber o que era “equilíbrio estável”. Com base nisso, o professor achou perspicaz uma breve explicação a respeito do tema. Após explicação, alguns alunos ficaram em silêncio e outros alegaram não conseguir identificar esse ponto no gráfico. Por questão de tempo, e sabendo que haveria outra situação conveniente, o professor-pesquisador deu continuidade a aula, deixando um outro momento futuro para discussão da questão.

O terceiro exercício da lista, pedia para que os parâmetros fossem alterados. A simulação passaria a ter parâmetros $k = 1N/m$ e $g = 1N/m^3$. Mais uma vez a classe comentou que não houve dificuldade para concluir a simulação. Todas as respostas foram iguais.

Dois alunos, que revelaram ter trocado informação enquanto faziam a atividade, disseram ter inserido vários valores no gráfico, para “ver o que acontecia”. Alguns casos de

erro de software encontrados por eles, foram também diagnosticados anteriormente pelo professor-pesquisador, como mostrado na Figura 22 .

Figura 22 - Gráfico da energia potencial em função do espaço de um OA.



Fonte: Próprio Autor

Quando é inserida uma constante g negativa, a energia assume uma ordem de grandeza na escala de 10^5 ou 10^6 , o que acreditamos ser o possível motivo pelo colapso da simulação, já que o teste foi realizado várias vezes em diferentes computadores, e em todos os casos o programa parou de funcionar.

Analisada a terceira questão, o professor-pesquisador convida a classe para a leitura do texto que iniciou a tarefa de casa. O texto trata de uma mola que passa por um processo de aquecimento, o que por vez resulta em mudança das suas características mecânicas. Dessa maneira, a mola passa a oscilar em torno de um ponto de equilíbrio distinto do que oscilava anteriormente. O professor-pesquisador executa a simulação do oscilador harmônico deformado e lança algumas provocações para a sala como: “A simetria se mantém instaurada nesse oscilador? Ele deixa de ser simétrico?”

Um grupo de alunos entra em um debate. A turma apresenta cisão de ideias. Quatro alunos acreditam que o oscilador ainda apresenta simetria e os outros cinco estudantes dizem que o sistema deixa de ser simétrico.

Aluno C: Acho que a simetria permanece em volta do ponto do meio. Ali no zero. Ou é possível ter mais de uma simetria?

Alguns dizem acreditar que a simetria se encontra no ponto x_0 . Talvez isso demonstre o errôneo padrão de que o ponto de equilíbrio estará sempre no meio da figura, pois tendo esse ponto como referencial, a imagem se torna igual dos dois lados.

O tempo reservado para a aula vai chegando ao fim. O professor-pesquisador deixa o fechamento de ideias para o quarto e último encontro.

6.1.4. Quarta Aula

Um dia após a terceira aula (13 de julho de 2021) foi lecionada a última aula da sequência didática aqui apresentada. Os Alunos se mostraram entusiasmados. Nessa ocasião, mais uma vez, não houve atraso por parte dos estudantes, tão pouco os problemas técnicos que afetaram o encontro anterior.

A simulação do oscilador harmônico deformado é novamente projetada na tela do computador, os estudantes acompanham enquanto o professor-pesquisador explica a quebra espontânea de simetria e fecha as questões levantadas na aula que antecedeu esse encontro. Algumas imagens são apresentadas durante a explicação, na tentativa de facilitar a compreensão. Os estudantes disseram que as imagens associadas à explanação do professor, contribuíram muito para o entendimento da quebra de simetria.

Aluno B: Sem a explicação, ia ser difícil imaginar isso.

Finalmente os estudos se encaminham para fechar a questão inicial o professor utiliza a quebra de simetria no oscilador harmônico deformado para explicar que esse fenômeno ocorre também na geração do campo de Higgs. As variáveis do oscilador são trocadas por aquelas que representam o campo de Higgs. Quanto a isso, a turma não faz questionamentos. Todos alegam ter compreendido a relação.

O professor mostra a relação entre a massa, energia e frequência do oscilador, dois alunos solicitam que a explicação seja realizada novamente de forma mais lenta, para melhor compreensão. Por fim, todos afirmam ter entendido.

A sequência didática é então finalizada com uma segunda lista de atividades que os estudantes farão em casa. O professor apresenta a lista, faz uma leitura dinâmica das

questões. Mais uma vez ninguém se manifesta. Dessa forma a sequência didática é fechada. A lista em questão foi entregue na segunda-feira seguinte (19/11/21) e todos os alunos fizeram todos os exercícios propostos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme o referencial teórico apresentado no capítulo 2, foi possível verificar que uma série de trabalhos relacionados a inserção de física moderna e contemporânea no ensino médio estão sendo desenvolvidos, acompanhando o que é indicado em algumas competências da base nacional comum curricular (BNCC) para o ensino de ciências. Esse não é um movimento tão novo, a pesquisa possibilitou encontrar diversos trabalhos de datas que remetem ao final do século passado, porém é inegável que um número de conteúdos maior vem sendo produzido nos últimos anos.

Seguindo essa linha, e indo talvez um pouco além, aqui apresentamos um trabalho desenvolvido para ensinar, por meio de uma sequência didática, o mecanismo de Higgs para estudantes do ensino médio, tendo como base os estudos de Osciladores Harmônico Simples e Anarmônico, que serviram como material para que pudesse ser realizada uma analogia com o campo de Higgs.

Em meio à nossa pesquisa, fomos surpreendidos pela pandemia do Covid-19 que infelizmente impossibilitou a realização de aulas presenciais, tanto no mestrado nacional profissional em ensino de física (MNPEF), quanto na educação básica. Isso afetou diretamente o desenvolvimento da pesquisa. O produto educacional teve que ser reformulado, o que gerou um tempo de pesquisa superior ao que esperávamos. Ao total, foram 3 anos de estudos que culminaram no que apresentamos nessa obra.

Dito isso, é possível afirmar que entender o que é uma sequência didática, o que ela deve conter e como pode ser estruturada de diferentes formas, foi de grande valia para a elaboração dessa sequência didática aqui apresentada, pois isso possibilitou a elaborar um material, sem ficar amarrado dentro de uma ideia inicial, podendo assim fazer modificações julgadas necessárias durante o processo de criação, sem perder de vista o objetivo principal. O número de aulas que compõem a sequência didática foi reduzido de quatro para seis encontros. As aulas presenciais, foram adaptadas para o formato remoto, como dito anteriormente. Deixamos de lado uma parte das equações que desenvolveríamos, por entender que as aulas no formato virtual não seriam muito adequadas para lecionar alguns desses pontos, podendo dificultar a aprendizagem dos alunos e prejudicar o processo de ensino-aprendizagem. Todas essas modificações foram feitas, mantendo uma organização, capaz de criar um conjunto de aulas que se unem, sem que a sequência didática perdesse sua

essência que é propiciar a aprendizagem da quebra de simetria e o mecanismo de Higgs, por meio de analogias com os Osciladores Harmônico e Anarmônico.

Para isso a Pesquisa Baseada em Design se mostrou muito útil, já que essa linha de pesquisa tem como base o aprimoramento de pontos identificados como não adequados em um processo anterior. Sem falar que para esse trabalho era fundamental a inserção do pesquisador em seu ambiente de pesquisa, interagindo com os alunos, aplicando o produto e acompanhando de perto todo processo de evolução da pesquisa. Isso é justamente um dos pontos que integram uma DBR. Por isso essa prática se encaixou bem ao nosso trabalho, possibilitando a criação de uma ponte entre o conhecimento teórico e prático.

Um ponto importante a se destacar, foi a utilização do software Modellus. Essa ferramenta foi utilizada nas aulas remotas, da mesma forma que seria utilizada em aulas presenciais, permitindo assim, mantermos um pilar da obra inicial. Sua praticidade permitiu que todos os alunos conseguissem desenvolver as atividades sem encontrarem maiores dificuldades, como eles mesmos relataram. Mais uma argumentação interessante realizada por vários alunos, foi o fato da simulação tornar o processo mais visual e dessa maneira contribuir para compreensão dos fenômenos estudados. Além de ser mais um ponto em que a sequência didática se mostra alinhada a BNCC, já que o documento recomenda fortemente a inserção das Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDICs).

Quanto ao estudo dos osciladores, os estudantes não demonstram dificuldades no que diz respeito ao Oscilador harmônico Simples. Como já havia estudado em algum momento o movimento harmônico simples, uma breve revisão dos conceitos foi suficiente para recordar o conteúdo. Já o Oscilador Anarmônico foi novidade para a classe. Os alunos se mostraram surpresos com o comportamento daquele sistema. Porém na aula seguinte, com a explicação do professor, fazendo uma ponte com o estudo do OHS, os estudantes puderam compreender o OA sem maiores problemas.

No capítulo 4 mostramos como estruturamos nossa pesquisa. Optamos por uma análise quantitativa, feita por meio de narrativas, o que foi bastante conveniente, já que as aulas foram online e por meio da ferramenta vocaroo foi possível gravar o áudio das aulas, permitindo uma análise minuciosa de cada ponto das aulas. A sequência didática foi dividida em quatro aulas e duas atividades para casa, sendo uma após a segunda aula e uma após o último encontro. Essas atividades também contribuíram muito para encontrar os pontos fortes e as dificuldades dos discentes.

Na aula 1 onde foi realizado uma demonstração introdutória do assunto a ser estudado e após apresentado o OHS, a classe se saiu bem, mostrando maior dificuldade apenas na compreensão do conceito de campo. Contudo, os vídeos apresentados trouxeram analogias que se mostraram eficientes, ajudando os alunos no entendimento desse conceito.

A aula 2 foi a que mais nos surpreendeu. Era esperado alguns gargalos, já que os alunos nunca havia utilizado o Modellus, porém eles praticamente não tiveram dificuldades para manusear o software. A aula fluiu tranquilamente e o professor não teve problemas para guiar os estudantes na realização da simulação.

No terceiro encontro, o professor detectou alguns problemas técnicos. Em dois casos solicitados, o Modellus “travou”, não conseguindo executar a simulação por completo. Depois de alguns dias, descobrimos que o problema estava ligado aos parâmetros escolhidos, que faziam o software reproduzir a simulação em ordens muito grandes, o que ocasionava o travamento do sistema. Esse foi um problema encontrado por todos os alunos da classe. Tirando esse empecilho, a turma conseguiu executar bem as demais simulações solicitadas. Como uma das simulações era referente ao OA, que eles ainda não tinham estudado, detectamos a surpresa dos alunos com o resultado alcançado. As principais dúvidas eram a respeito do ponto de equilíbrio do sistema. Mas no decorrer do encontro, com a ajuda do professor levantando e explicando algumas questões, conseguimos elucidar melhor o que acontecia naquele sistema.

Finalizando a última aula com a analogia entre o OA e o Campo de Higgs e aplicando a segunda lista de exercícios para casa, consideramos que a sequência didática atendeu bem ao que se propôs. Os estudantes se mostraram interessados na maior parte do tempo, todos responderam as listas de exercícios por completo. Durante as aulas foram levantados questionamentos interessantes, que mostravam o engajamento dos alunos e a busca pelo conhecimento dos mesmos.

Trabalhar com analogias foi fundamental para compreensão da quebra de simetria, que é um tema de abstração maior. De sequência didática e os vídeos apresentados na aula 1, passando pelas imagens apresentadas em slides, até a analogia feita entre o OA e o Campo de Higgs na aula 4, o relato de que as analogias contribuíram muito para o entendimento do mecanismo de Higgs foi praticamente unânime. Outro ponto positivo foi a utilização do Modellus, segundo os estudantes, foi impossível enxergar melhor o comportamento dos osciladores, além do entusiasmo demonstrado em programar as simulações.

Penso que alguns pontos podem ser aprimorados, como definir parâmetros que possibilitem o Modellus executar as duas simulações que infelizmente não conseguimos trabalhar dessa vez.

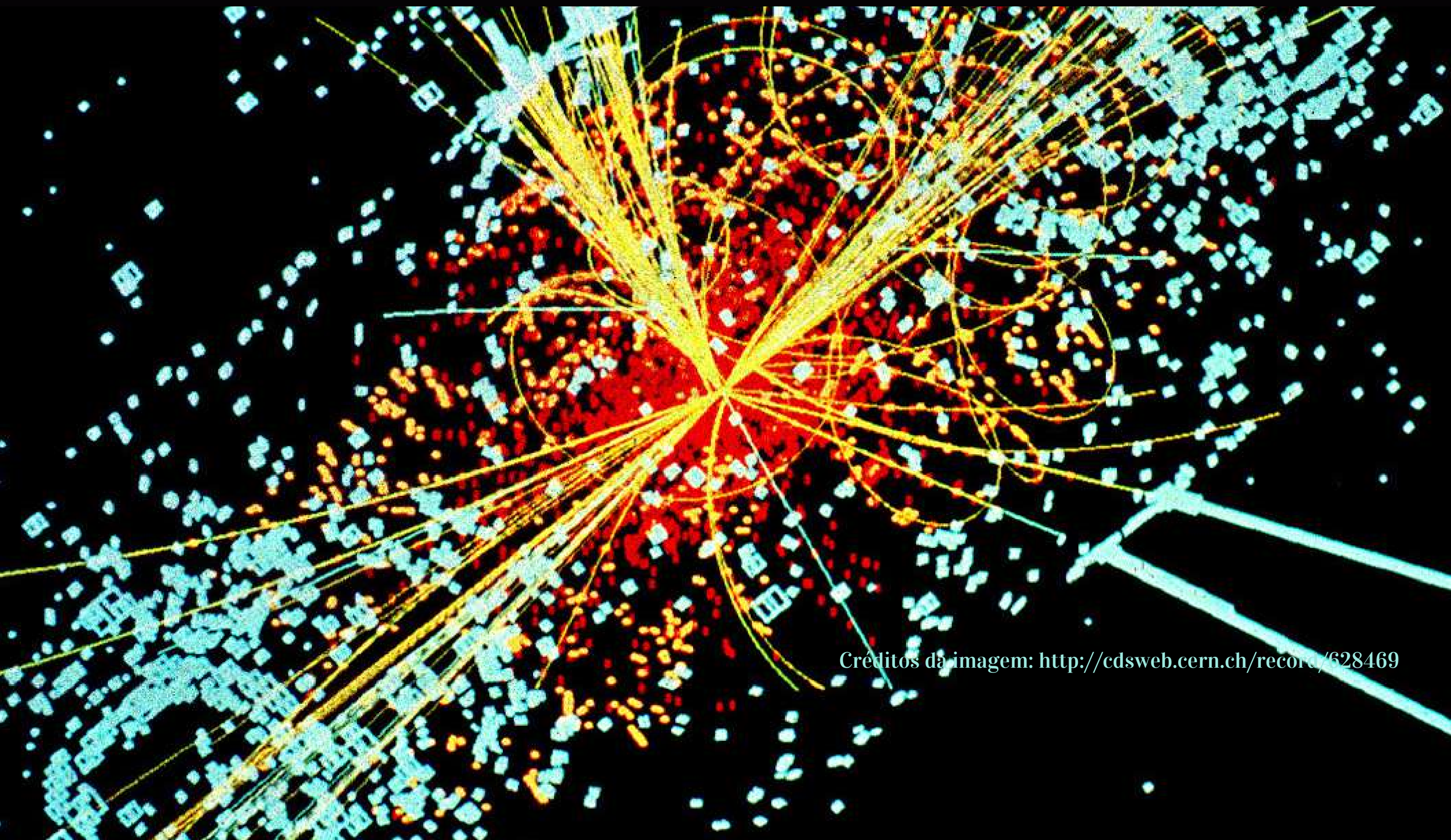
O tempo da primeira aula foi um pouco apertado, talvez seja necessário reduzir alguns pequenos detalhes. Uma aula também deve ser acrescentada no final da sequência didática, para que possamos corrigir e discutir a Atividade 2 junto com os alunos. Analisando essa atividade, identificamos que os estudantes apresentavam certa dificuldade para formular uma resposta para a questão 4. Talvez precisaremos reformular a pergunta.

Para pesquisas futuras, podemos aprimorar os pontos sugeridos acima, e dar prosseguimento aos estudos desse tema, talvez estudando como a massa das partículas surgem via acoplamento a massa do bóson de Higgs.

APÊNDICE A - ORIENTAÇÃO PARA O PROFESSOR

Produto Educacional

**Quebra espontânea de simetria e
mecanismo de Higgs:
Uma abordagem a partir dos Osciladores
Harmônico Simples e Anarmônico**



Créditos da imagem: <http://cdsweb.cern.ch/record/628469>

Adriano de Sousa Sá

Orientador: Wagner Franklin Balthazar
Coorientador: José Abdalla Helayël Neto

Olá, caro professor!

Aqui você encontrará um Produto Educacional, que é resultado de uma Pesquisa Baseada em Design (Design-based research - DBR), onde propomos uma sequência didática, para discutir um tema atual de grande relevância, que é o mecanismo de Higgs e como ele é importante para compreensão do campo de Higgs e conseqüentemente o surgimento da massa de algumas partículas. Salientamos que entendemos por Sequência Didática uma série de atividades ordenadas e articuladas, onde o professor organiza sistematicamente atividades que possam levar os alunos a compreensão dos conteúdos.

Sabemos da ousadia do tema, por se tratar de um tópico bastante atual na física, que geralmente não é apresentado no currículo do Ensino Médio. No entanto acreditamos que trazer uma física mais atual para esses alunos ou pelo menos permitir que eles tenham acesso a esse tipo de conteúdo, mesmo que seja em atividades extras, é uma tarefa fundamental para que possamos democratizar a ciência também para nossos alunos do Ensino Médio.

Foi uma preocupação nossa, desenvolver o tema, com um formalismo matemático que fosse adequado à realidade do Ensino Médio. Para isso, partimos dos estudos dos Osciladores Harmônico Simples e Anarmônico. Acreditamos que conseguimos isso, dentro do que é aqui proposto.

Também adicionamos no intuito de facilitar a compreensão do tema, uma parte que envolve a simulação dos potenciais de Higgs. Entendemos que a simulação tem um papel fundamental, para que o aluno possa visualizar como ocorrem a simetria e a quebra simetria no modelo matemático que descreve o fenômeno.

Nesse sentido, estruturamos essa sequência didática envolvendo uma introdução geral, o formalismo matemático e as simulações. Em todos os resultados, conseguimos uma boa adesão por parte dos alunos, especialmente no que diz respeito às simulações. Além disso, apresentamos alguns Slides, vídeos e questionários, com o objetivo de tornar a aula ainda mais viável ao Ensino Médio.

Acredito que alcançamos nossos objetivos. Esperamos que você goste e que esse material chegue aos professores e alunos do Ensino Médio em nosso Brasil. Agradecemos mais uma vez à leitura e desejamos um bom uso do material.

Caso tenha alguma dúvida, estarei à disposição para ajudar, através do e-mail que segue:
adriano.sa.professor@gmail.com

No mais, muito obrigado e até breve!

Sumário

Fluxograma da Sequência Didática3

Aula 14

Aula 210

Aula 316

Aula 421

Aula 526

Referências.....27

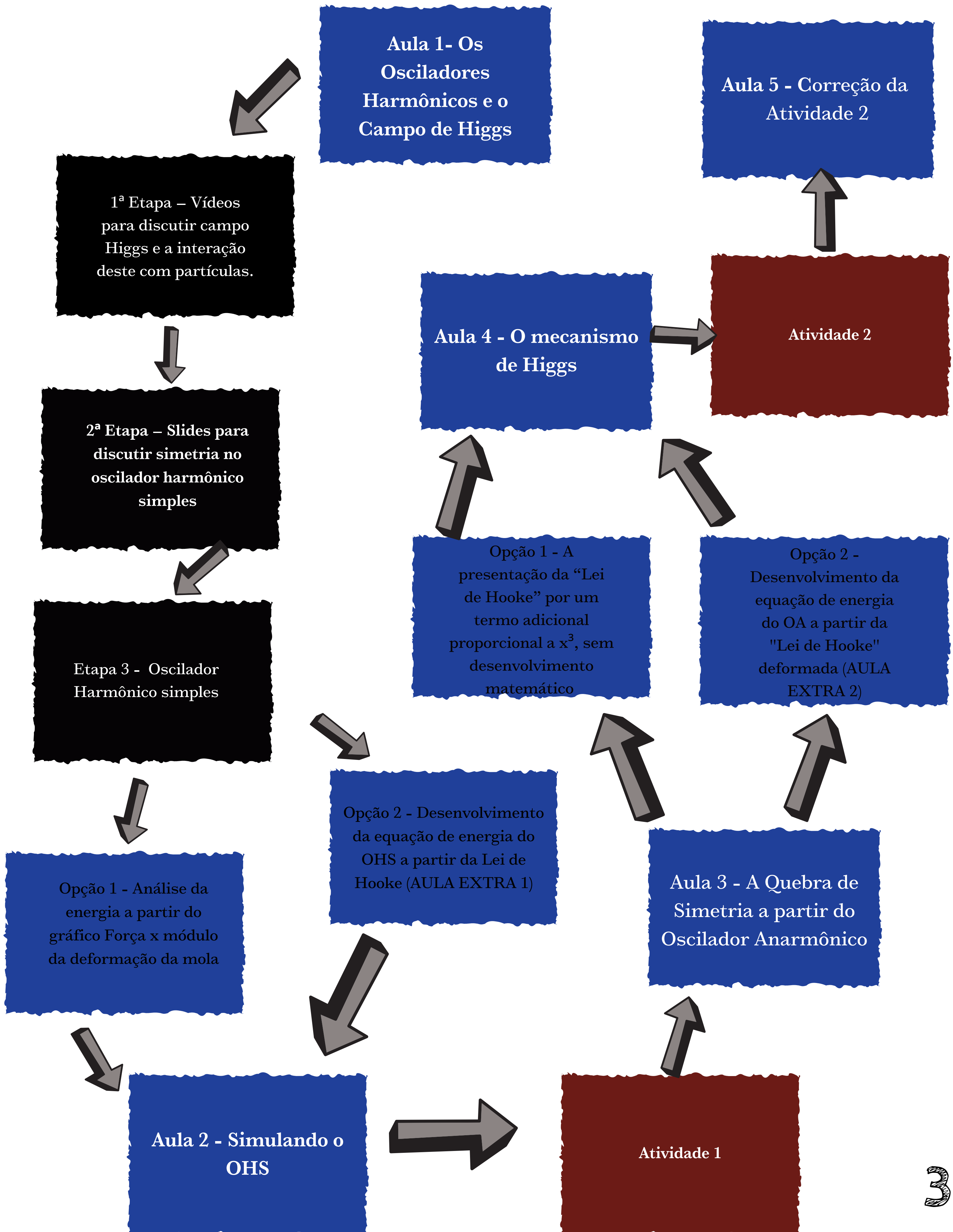
Apêndice B - Atividade 1.....28

Apêndice C- Atividade 2.....30

Apêndice D - Slides.....32

Apêndice E - Equações OHS e OA40

Fluxograma da Sequência Didática



A SEQUÊNCIA DIDÁTICA - AULA 1

Aula 1 - Os osciladores harmônicos e o campo de Higgs

Principais conceitos trabalhados: Oscilador harmônico simples; Oscilador harmônico deformado; Campo de Higgs

Objetivo: Dar uma visão geral a respeito do conceito de Campo, Simetria, Quebra de Simetria e a interação das partículas com o Campo de Higgs. Além de lembrar os estudos acerca do OHS.

Tempo Necessário: 50 minutos

Nessa aula o professor apresenta uma visão geral do que será estudado, mostrando de forma leve e introdutória o conceito de campo, simetria, quebra de simetria e o problema da geração de massa de algumas partículas.

Essa apresentação geral do tema, visa problematizar as questões que serão discutidas ao longo do que se propõe a sequência didática, buscando motivar o aluno e o informar brevemente o que estudaremos.

Para facilitar a compreensão, dividimos o encontro em três etapas, como mostramos a seguir:

OBS.: TODOS OS SLIDES QUE SERÃO CITADOS, ENCONTRAM-SE NO APÊNDICE D

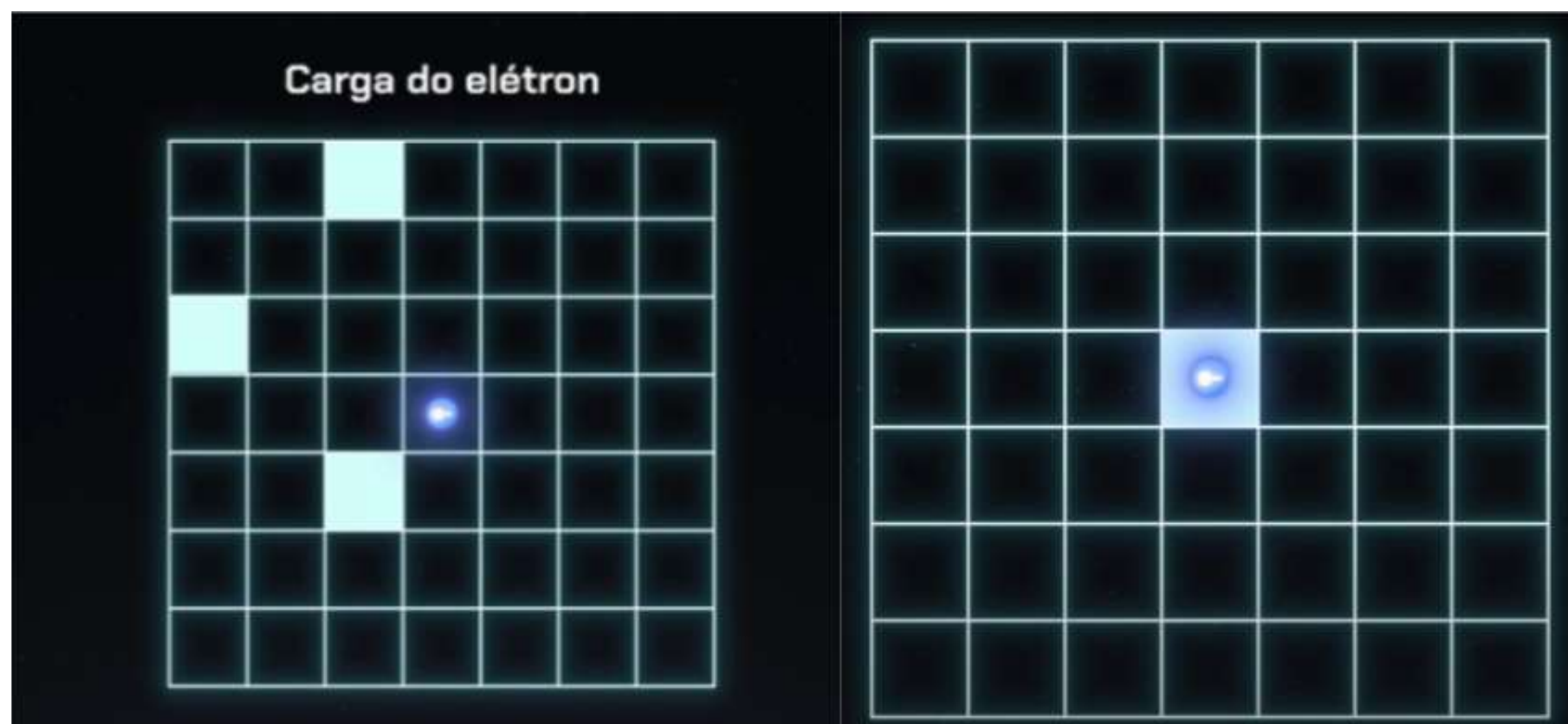
1ª Etapa – Vídeos para discutir campo Higgs e a interação deste com partículas

Nessa parte, o professor pretende passar ao aluno o que entende-se na física por “campo”. Em especial, estudaremos o campo de Higgs e sua interação com algumas partículas, que explica o problema da geração da massa.

Para realização dessa breve introdução ao tema, são utilizados dois vídeos de apoio, contendo animações que podem facilitar a compreensão dos alunos. Esses vídeos se encontram no Slide 2.

O vídeo 1, denominado “O bóson de Higgs Explicado” (<https://www.youtube.com/watch?v=gCaTJYhA4Ik>), apresenta de maneira simples e bastante ilustrativa o que são os campos no entendimento da física, como exemplo o autor utiliza o campo de elétrons, como mostra a Figura 1.

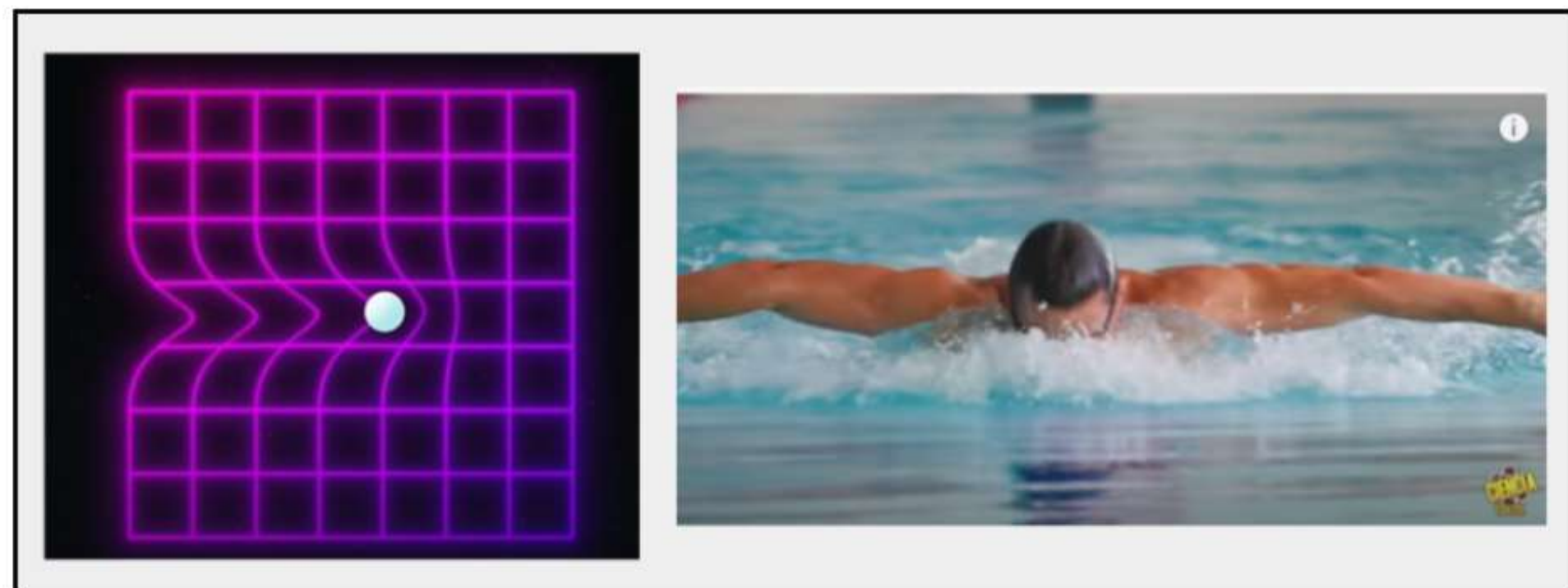
Figura 1 - O Campo de Higgs e o Nadador



Autor: Loos, 2021 (editado)

Em seguida, o autor apresenta o campo de Higgs. Nesse sentido o vídeo explora uma analogia Água-Nadador e Campo de Higgs-Partícula, mostrada na Figura 2, onde o autor mostra que quanto maior a interação, mais dificuldade teria a partícula para se deslocar, o que por sua vez, representa que a partícula possui mais massa.

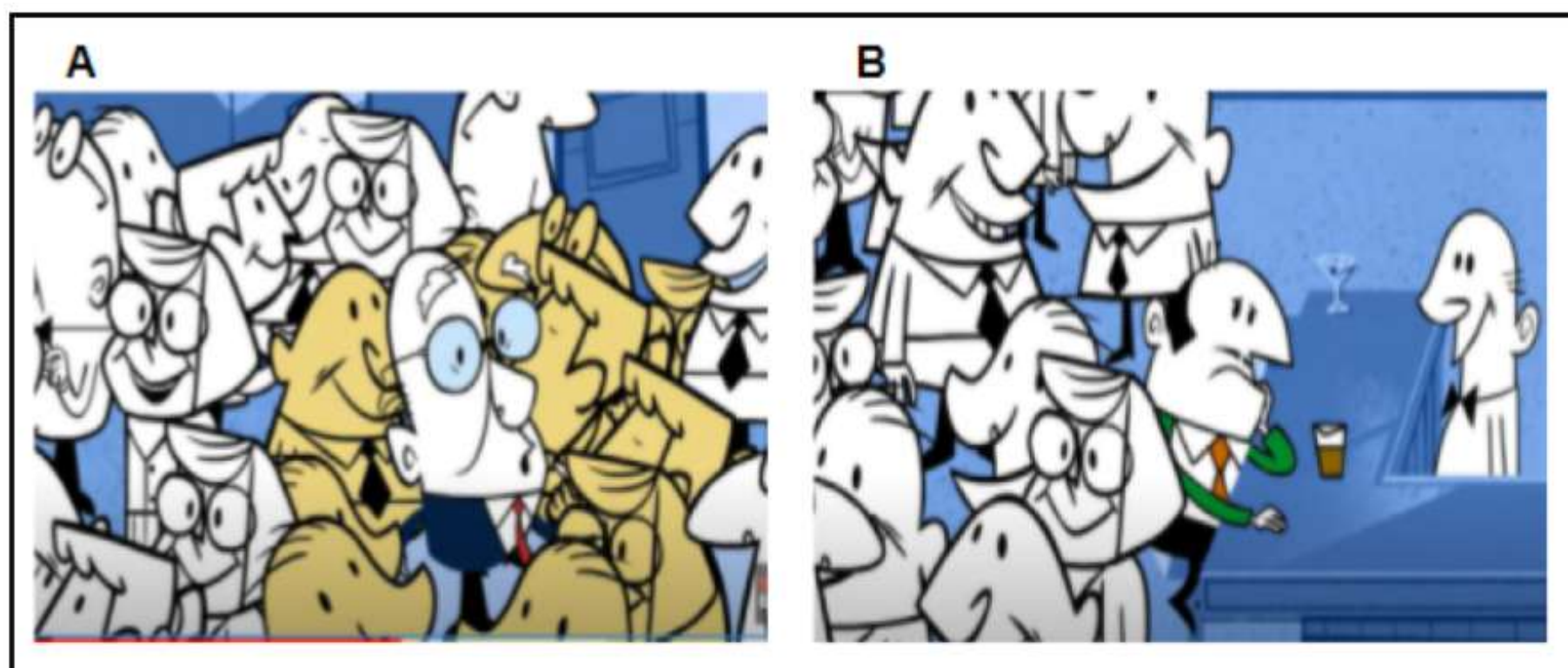
Figura 2 - O Campo de Higgs e o Nadador



Autor: Loos, 2021 (editado)

Na Figura 3 mostramos um quadro do vídeo 2, intitulado “Explicando o Campo de Higgs - Don Lincoln” (<https://www.youtube.com/watch?v=joTKd5j3mzk>). O autor também trabalha com analogia para explicar a interação das partículas com o campo de Higgs e mostra que algumas partículas não massivas se quer interagem com o campo.

Figura 3 - Uma analogia para o Campo de Higgs



Fonte: Powerhouse Animation Studios Inc, 2013 (editado)

Na Figura 3 A, vemos um personagem que representa uma partícula que interage com campo de Higgs, tendo “resistência” a se locomover devido as pessoas (que representam o campo de Higgs), que ficam aglomeradas ao seu redor. Na Figura 3 B, temos o personagem de blusa verde que simboliza uma partícula que não interage com o campo de Higgs. Como vemos, nesse caso, as pessoas não se reúnem ao redor do personagem, o que ocasiona em uma facilidade de locomoção do mesmo.

Após isso é aberta uma discussão com a classe e os alunos apontam suas dúvidas e conclusões acerca do que viram. O professor deve guiar os estudantes de forma que o assunto não saia da esfera do que a sequência didática propõe, ou seja, da discussão a respeito do campo de Higgs.

2ª Etapa – Slides para discutir simetria no oscilador harmônico simples

Agora, o professor postula que para entender o campo de Higgs, será necessário a compreensão do conceito de simetria, e problematiza levantando a questão: olhando para a natureza, o que você entende como simetria? Alguns minutos são dados para os estudantes levantarem exemplos de sistemas simétricos. Em seguida, o professor explica o que é simetria utilizando o slide 4, apresentado pela Figura 4.

Figura 4 - A Simetria na Natureza



Fonte: Próprio Autor

A partir dessa imagem, são levantadas questões: “As imagens são simétricas?” “Se sim, por que?” “Se não, por que?” “O que elas apresentam em comum?” “O que caracteriza simetria?”

Após discussão, o professor explica o conceito de simetria, como característica de um sistema que possui características preservadas sob alguma transformação. Isso pode ser elucidado visualmente, analisando a imagem 3, tendo como referencial a linha vermelha que representa os eixos simétricos.

3ª Etapa – Oscilador Harmônico simples

Aqui o professor apresenta como exemplos de sistemas simétricos os osciladores harmônicos (Slide 5), e como exemplo cita um relógio de pêndulo (Slide 6) e um sistema massa-mola (Slide 7), que será o exemplo a ser estudado nesse produto educacional.

O objetivo dessa etapa é apresentar o OHS e suas equações, com foco na energia potencial dos osciladores. Temos duas opções para o desenvolvimento desse conteúdo em sala de aula:



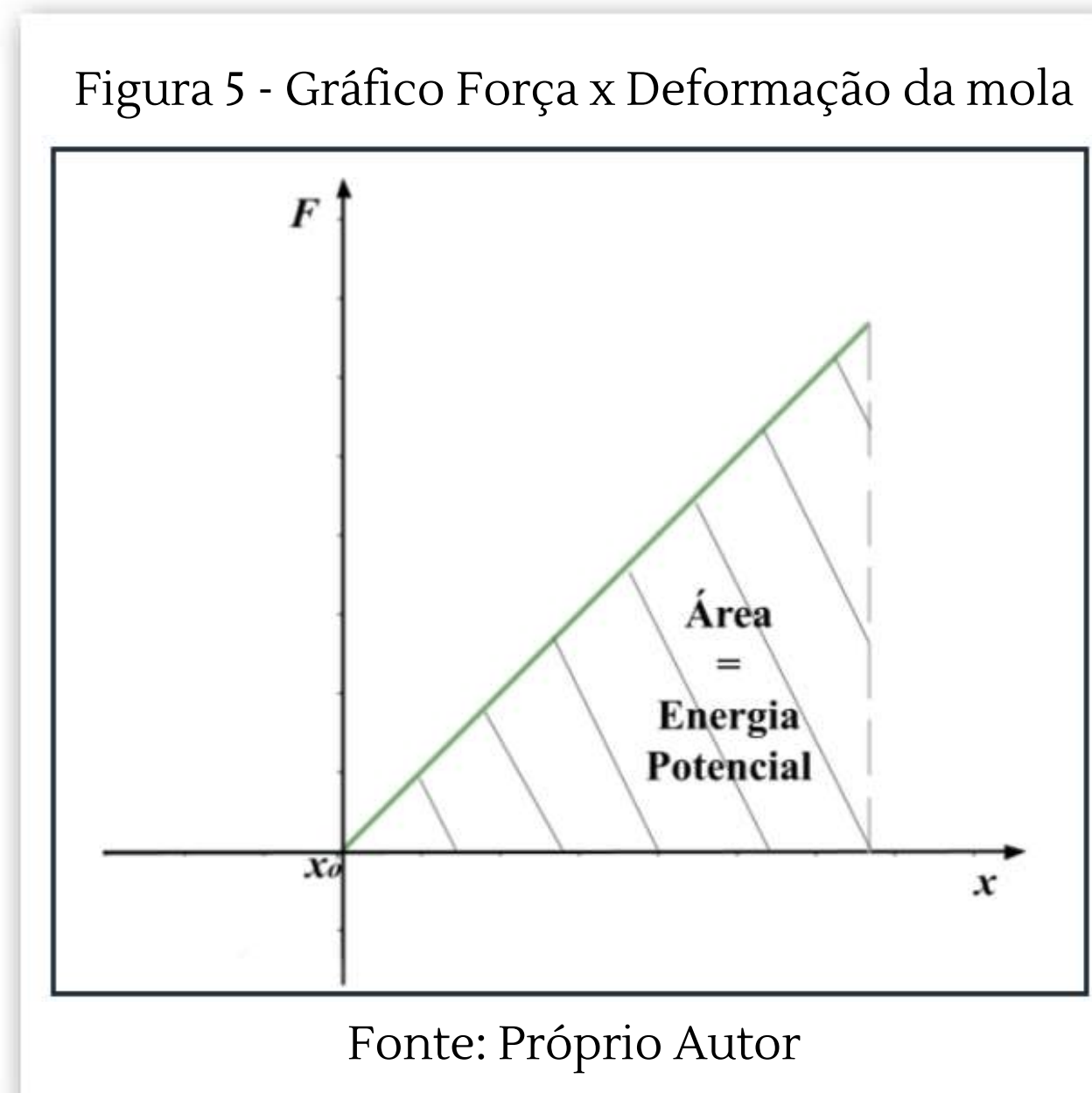
1º opção - Segue uma linha mais tradicional no que se refere ao desenvolvimento das equações de energia para o OHS. Ela tem a vantagem de ser mais conhecida pelo aluno, mas por outro lado essa abordagem não será útil na descrição do OA, que veremos na aula 2. Nesse produto apresentaremos a opção 1. O motivo é simples a 2º opção é igual a 1º opção, com adição do Apêndice E.



2º opção - A segunda é o desenvolvimento das equações da energia a partir da Lei de Hooke através do método das variações, que é muito mais elegante e sutil. Ele permitirá que as equações de energia sejam desenvolvidas tanto para o OHS, quanto para o OA. O desenvolvimento completo para OHS e OA está no Apêndice E.

É importante mencionar que, no caso de utilização dessa abordagem o tempo de aplicação do produto educacional deve ser acrescido em 1 aula. Também destacamos que esse produto foi elaborado pensando na opção 2, no entanto, em função da pandemia e do ensino remoto, a opção 1 se tornou necessária. Por isso, resolvemos manter as duas opções para o professor.

Pensando em termos opção 1 (para a opção 2 basta adicionar o desenvolvimento através do método das variações) apresentamos somente a equação da energia potencial do OHS, relacionando-a com a Física do sistema, obtendo a equação a partir do cálculo da área do gráfico mostrado na Figura 5.



O ponto x_0 indica a coordenada em que a deformação da mola é zero. A área tracejada tem a forma de um triângulo retângulo. Sendo essa área igual a energia potencial elástica, a base do triângulo igual o módulo da deformação da mola e a altura igual a força elástica, podemos deduzir que,

$$E_p = \frac{xF}{2} = \frac{x(xk)}{2} = \frac{1}{2}kx^2$$

O estudo é feito analisando o comportamento da energia potencial,

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2$$

seu ponto de equilíbrio $x_0 = 0$ e a frequência de oscilação, dada por,

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Ainda, recomenda-se a apresentação dos slides 8 ao 10.

A SEQUÊNCIA DIDÁTICA - AULA 2

Aula 2 - Simulando o OHS

Principais conceitos trabalhados: Movimento harmônico simples

Objetivos: Capacitar os estudantes para realizarem a simulação de um OHS por meio do Modellus e possibilitar uma melhor visualização do comportamento do oscilador harmônico simples, e dessa forma melhorar a compreensão do aluno a respeito do tema.

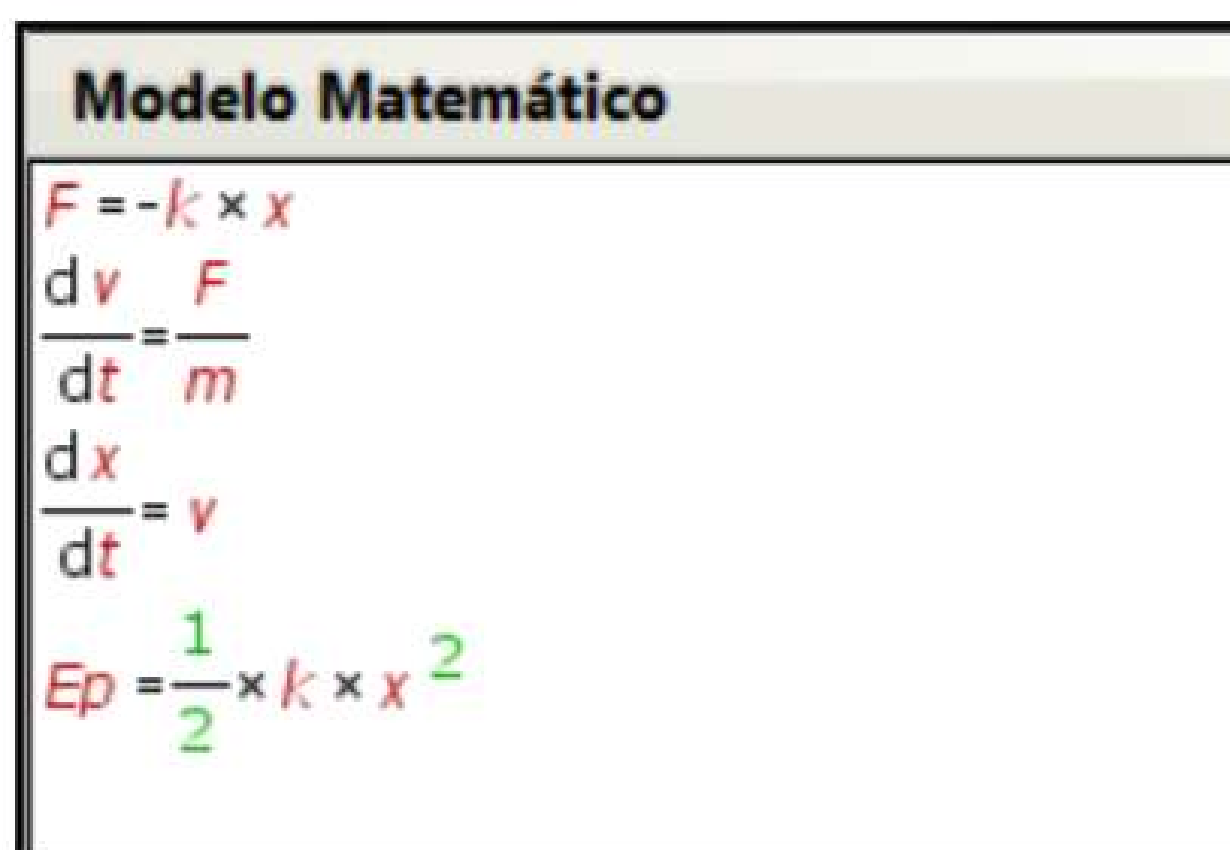
Tempo Necessário: 50 minutos

Para o segundo encontro, os estudantes realizam, com a ajuda do professor, a simulação das equações trabalhadas. O software Modellus é o escolhido para realização dessa atividade, pois possui fácil manuseio e não necessita de linguagem avançada de programação, dessa maneira os alunos poderão reproduzir as equações trabalhadas em sala, exatamente da maneira como essas são escritas. O intuito é tornar mais palpável as informações que as equações nos mostram.

Caixa Modelo Matemático

Primeiro vamos inserir as equações no quadro “Modelo Matemático”, conforme Figura 6.

Figura 6 - Modelo Matemático

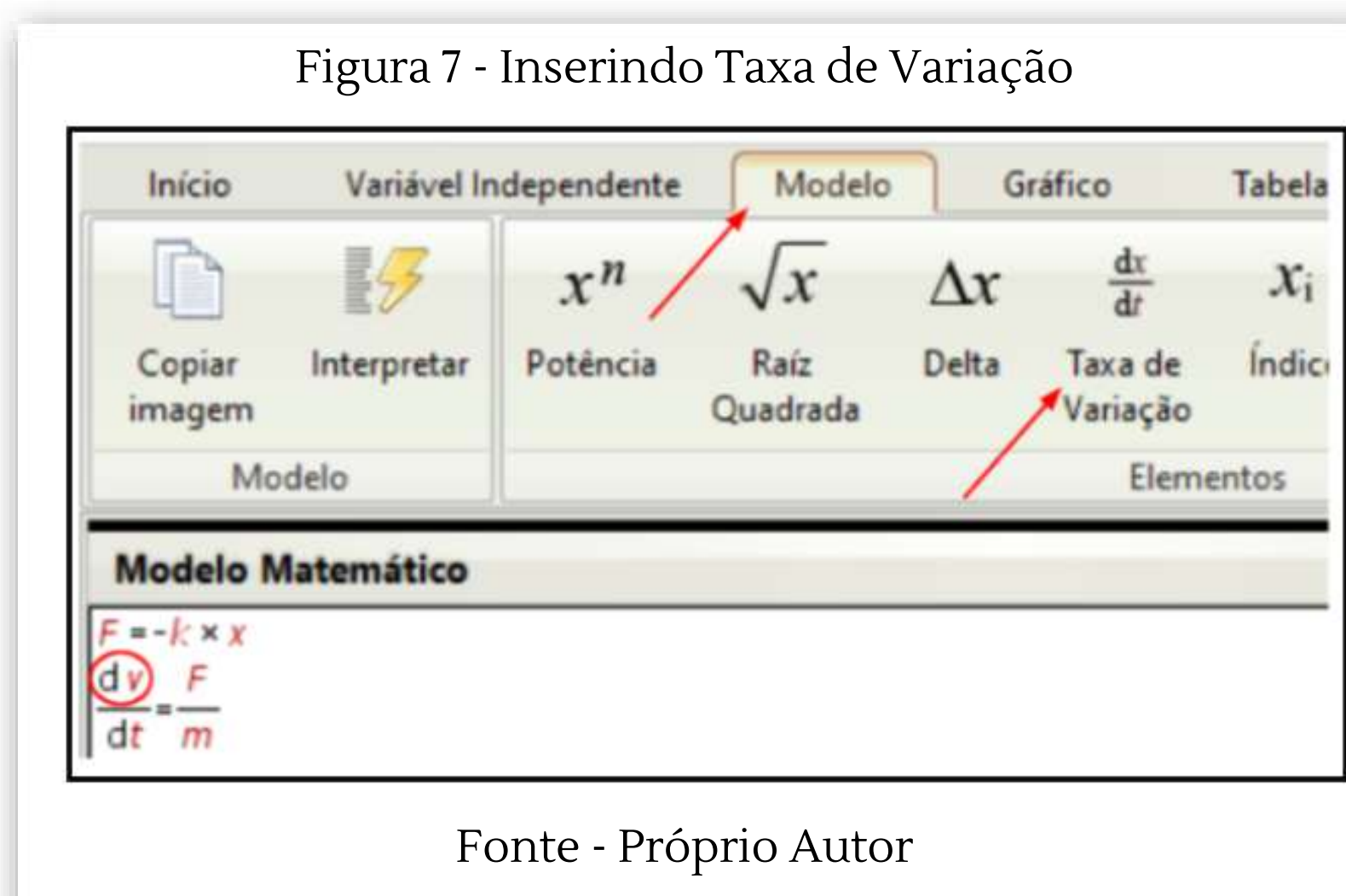


The image shows a screenshot of a software window titled "Modelo Matemático". Inside the window, the following equations are displayed:

$$F = -k \times x$$
$$\frac{dv}{dt} = \frac{F}{m}$$
$$\frac{dx}{dt} = v$$
$$E_p = \frac{1}{2} \times k \times x^2$$

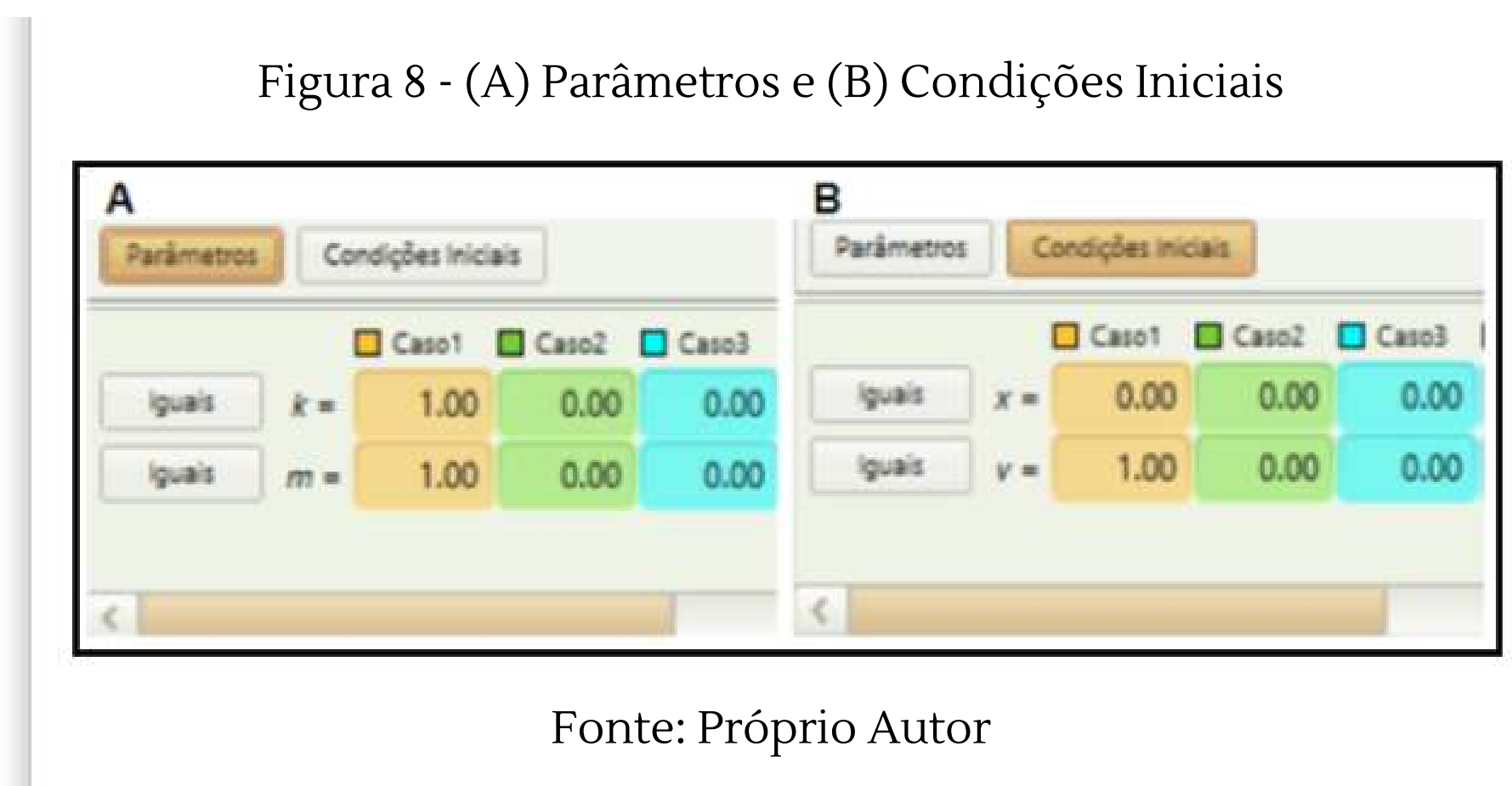
Fonte: Próprio Autor

Para inserir dv/dt clique na aba “modelo” e selecione “taxa de variação”. Agora basta inserir o termo “v” no quadro em quadro em branco no numerador da fração. Na Figura 7, as setas vermelhas indicam as operações que devem ser realizadas. Um círculo vermelho mostra na equação, onde é inserido o termo “dv”.



Condições iniciais

Agora são escolhidos os parâmetros massa "m=1Kg" e constante elástica da mola "k=1 N/m". Também são definidas as condições iniciais x=0m e v=1 m/s, como mostra a Figura 8



Gráfico

Clicando na aba “gráfico”, solicitamos as informações que desejamos que o gráfico plotado contemple. Nessa atividade é interessante selecionarmos as variáveis "x" no eixo horizontal e para o eixo vertical, a Energia Potencial "Ep", como apontado na Figura 9.

Figura 9 - Variáveis do Gráfico de Energia Potencial

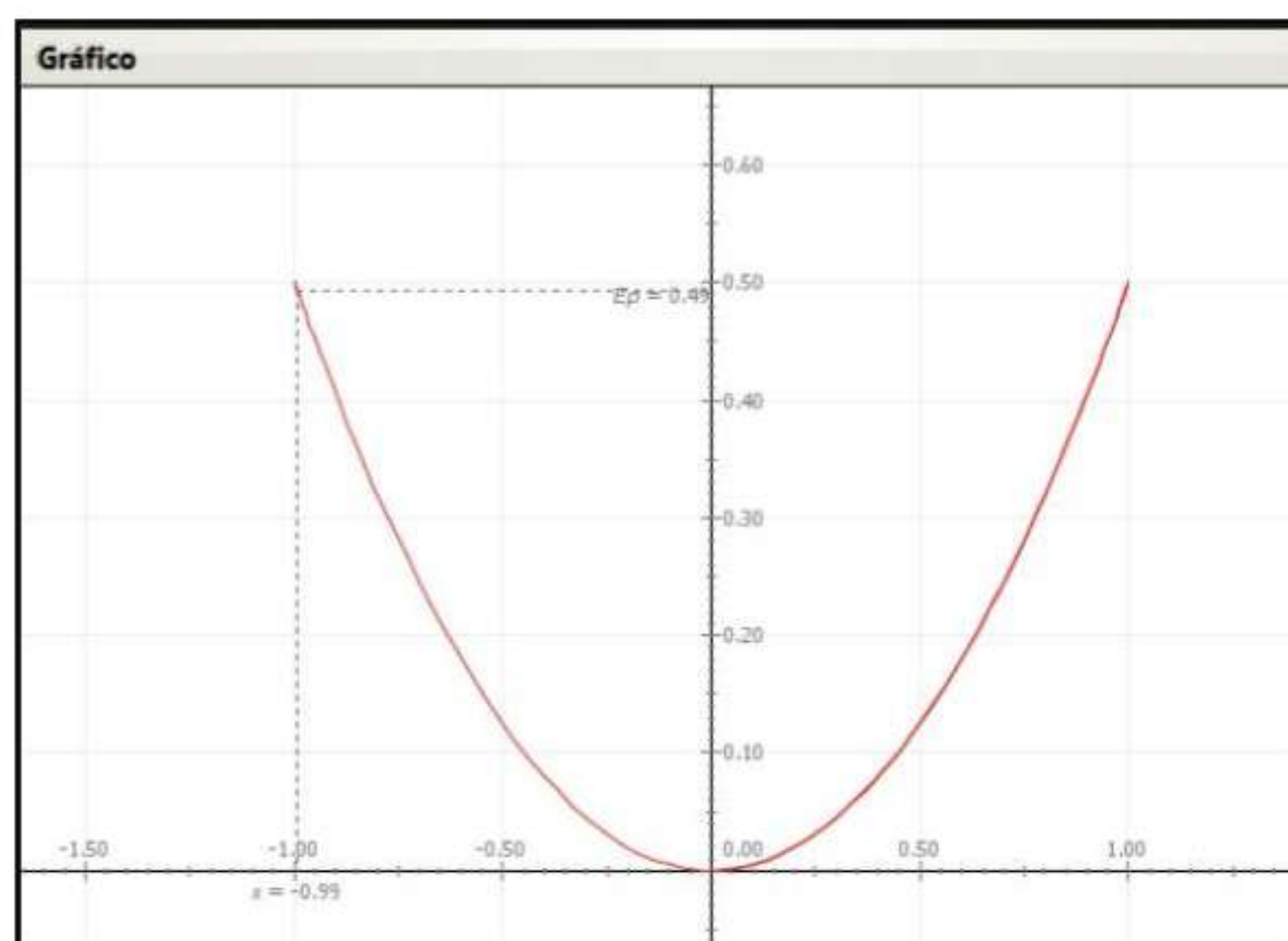


Fonte: Próprio Autor

Note que em todos os casos, deve-se selecionar “Caso 1”, pois nesse exercício, tratamos de apenas um único caso: o Oscilador Harmônico Simples.

A escolha das cores que aparecerão no gráfico é livre. Nesse exemplo escolhemos a cor azul para representar a curva que descreve o comportamento da Energia Potencial do Oscilador Harmônico Simples, como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Gráfico da Energia Potencial do OHS



Fonte: Próprio Autor

Tabela

Agora vamos criar a tabela. Na aba "Tabela", em "Opções", selecione a caixa "barras" e coloque 1.0 para "mostrar cada (passos)". Coloque as variáveis "x" e "Ep", para que essas grandezas sejam demonstradas na tabela. Você também pode escolher a cor de cada barra. A Figura 11 mostra um exemplo em que a barra azul representa a coordenada "x" e a cor vermelha diz respeito a Energia Potencial.

Figura 11 - Tabela Ep e deslocamento em "x" do OHS

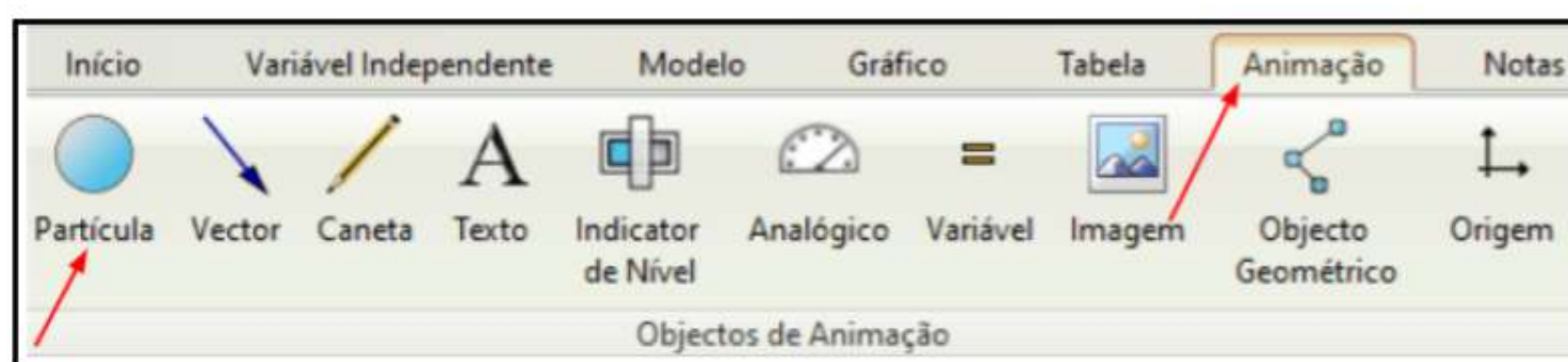
x	Ep
0.23	0.03
0.19	0.02
0.15	0.01
0.11	0.01
0.07	0.00
0.03	5.89E-4
-0.01	1.60E-5
-0.05	0.00
-0.09	0.00
-0.13	0.01
-0.16	0.01
-0.20	0.02
-0.24	0.03
-0.28	0.04
-0.32	0.05
-0.36	0.06
-0.39	0.08
-0.43	0.09
-0.47	0.11
-0.50	0.13
-0.54	0.14
-0.57	0.16
-0.60	0.18
-0.63	0.20

Fonte: Próprio Autor

Animação

Agora basta inserir o objeto que irá realizar o Movimento Harmônico simples. Vá na aba animação e clique em partícula, como indicado na Figura 12.

Figura 12 - Inserindo Animação



Fonte: Próprio Autor

Após esses comandos, clique em qualquer região da tela para adicionar a partícula.

Propriedades

Na aba "Propriedades", optamos por seleccionar as coordenadas e escalas indicadas na Figura 13.

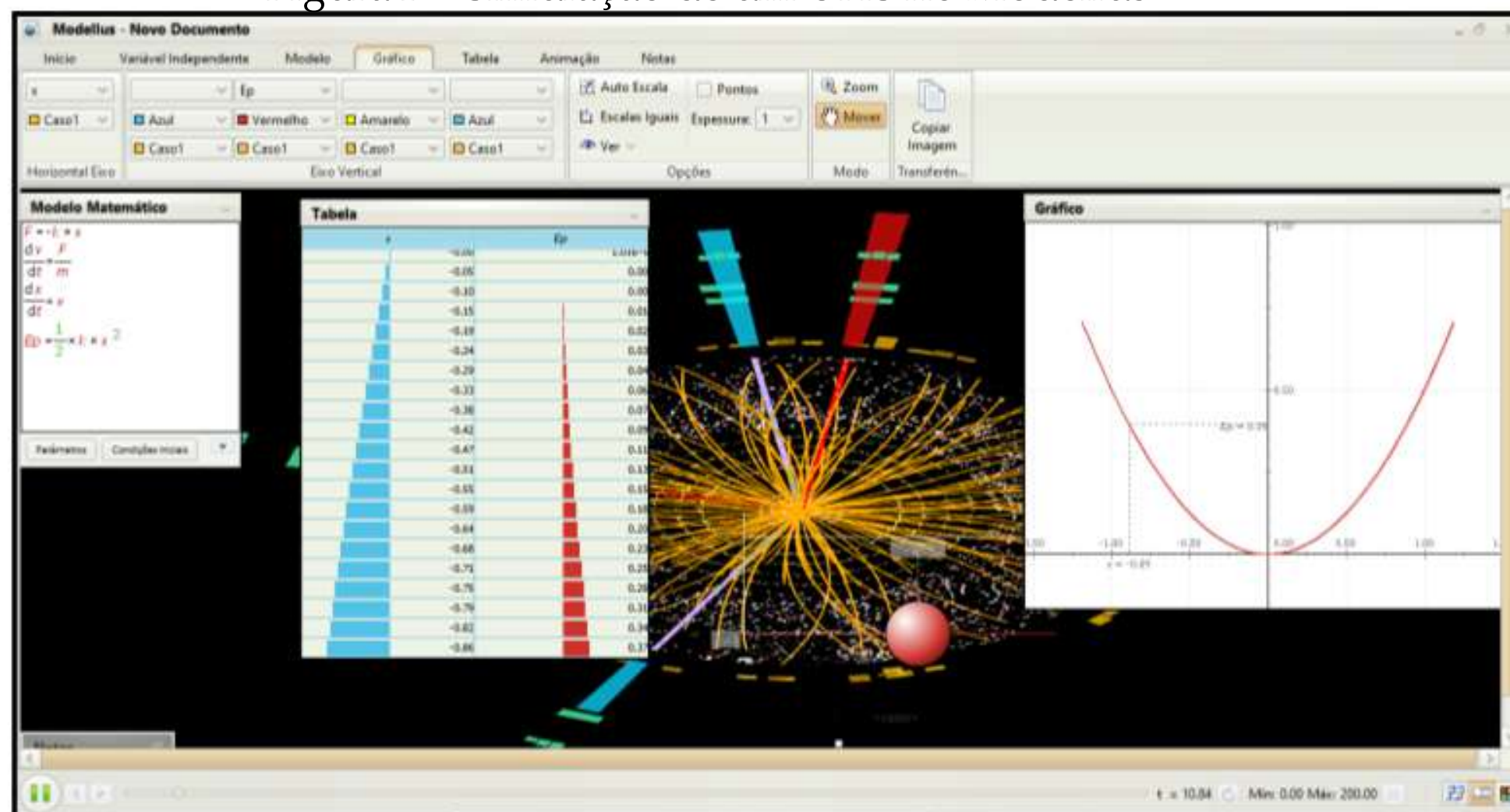
Figura 13- Propriedades da Animação



Fonte: Autor Próprio

Pronto! É hora de executar a simulação. Espera-se que seja obtido um resultado parecido com o que nos mostra algo na Figura 14.

Figura 14- Simulação de um OHS no Modellus



Fonte: Próprio autor

Atividade 1

Após a simulação, propomos que os alunos façam em casa a Atividade 1 (Apêndice A), onde os estudantes realizam simulações utilizando a equação,

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2 - \frac{1}{4}\lambda x^4$$

A ideia é que eles utilizem o software Modellus, discutido nessa aula e identifiquem diferenças e similaridades entre essa energia e a do OHS. As condições iniciais do problema estão detalhadas no (Apêndice A). Com esses resultados, se fará possível a próxima discussão, que será realizada na aula seguinte: a quebra de simetria no oscilador.

A SEQUÊNCIA DIDÁTICA - AULA 3

Aula 3- A quebra de simetria a partir do Oscilador Anarmônico

Principais conceitos trabalhados: Movimento Anarmônico; Lei de Hooke; Energia Mecânica

Objetivos: Compreender o movimento de um oscilador anarmônico e a quebra de simetria a partir da sua energia potencial.

Tempo Necessário: 50 minutos

Nessa aula apresentamos o OA. Temos duas opções para abordar o problema:

✓ 1ª opção: Na primeira opção apresentamos uma “Lei de Hooke” deformada por um termo adicional proporcional a x^3 e a energia potencial associada a um sistema que oscila sujeito à essa força. Note que não há um desenvolvimento matemático algébrico ou geométrico para encontrar a energia partindo da força deformada.

✓ 2ª opção: Partimos de uma “Lei de Hooke” deformada (por um termo adicional proporcional a x^3) e utilizamos o método das variações para encontrar a energia potencial desse sistema. Uma descrição desse método, numa linguagem adequada ao ensino médio, está detalhada no Apêndice E.

É importante mencionar que para essa opção será necessário mais 1 aula de 50 min. Nesse caso, nossa sugestão é que a demonstração seja realizada para encontrar a Equação 2, apresentada no final da aula anterior.

Seguindo a opção 1, a aula começa com o professor fazendo a leitura do texto inicial que compõe a atividade “para casa” (Apêndice B), onde se cria um cenário em que uma mola é deformada, dessa forma as equações da força e da energia potencial do oscilador passam a ser descritas, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$F_e = -kx - \lambda x^3$$

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2 - \frac{1}{4}\lambda x^4$$

onde λ é uma constante associada à deformação. Observa-se que, quando $\lambda = 0$, recuperamos a Lei de Hooke. Naturalmente, a posição de equilíbrio para um sistema sujeito à lei deformada pode ser encontrado fazendo $F = 0$, na equação demonstrada acima. Desta forma, obtemos três posições de equilíbrio:

$$x = 0; \quad x = \pm \sqrt{-\frac{k}{\lambda}}$$

No caso de escolhermos a opção 2, basta iniciarmos pelo método apresentado no Apêndice E

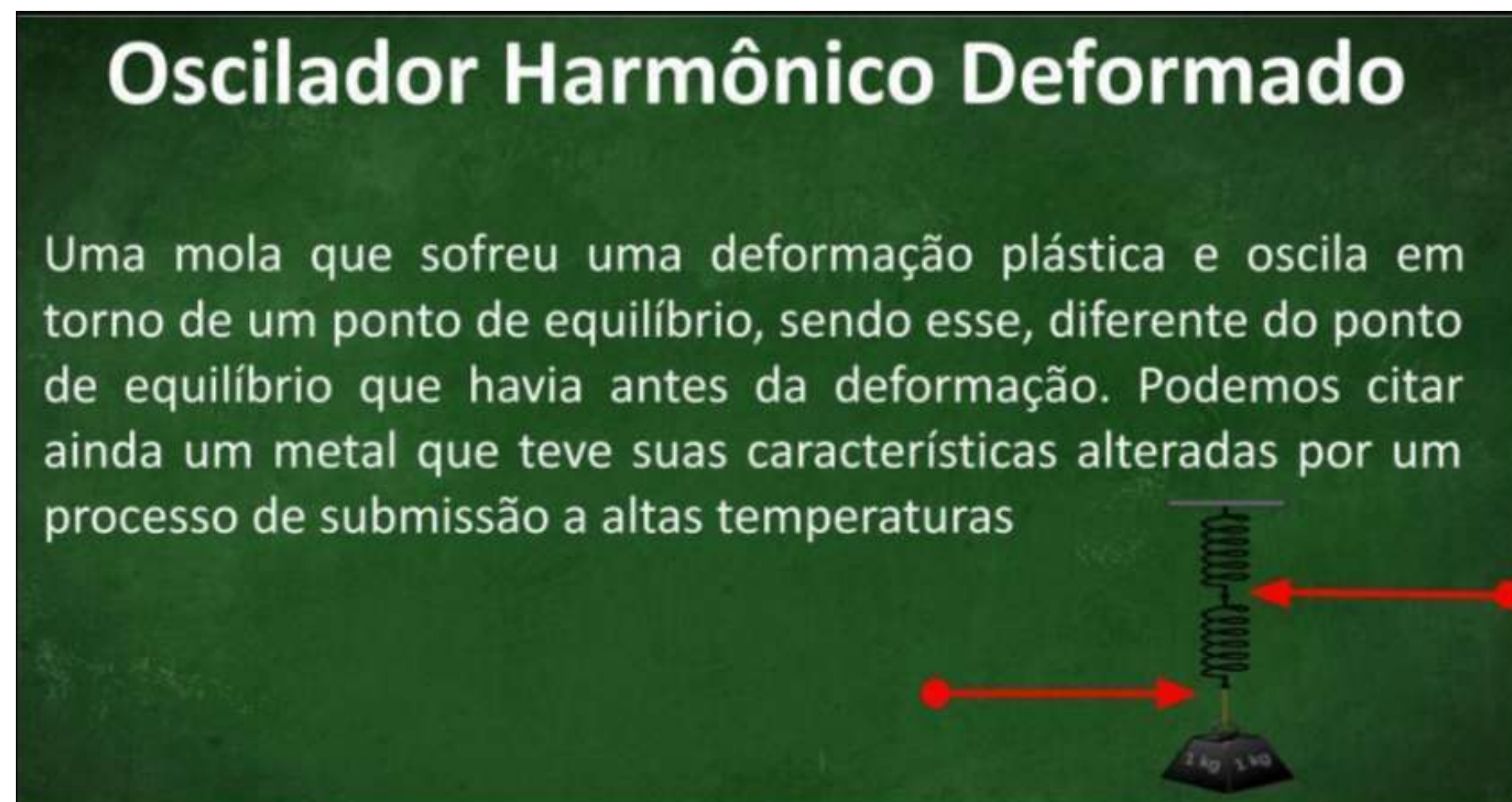
Este resultado nos leva a duas situações físicas para $x \in \mathbb{R}$, $k < 0$ e $\lambda > 0$ ou $k > 0$ e $\lambda < 0$. É importante notar que, quando $k > 0$ e $\lambda < 0$, a força F se torna repulsiva a grandes distâncias.

Se $k < 0$ e $\lambda > 0$, teremos estados ligados com oscilações estáveis em torno de posições de equilíbrio fora da origem, o que, por sua vez, configura o que denominamos como quebra espontânea de simetria.

A função energia potencial é uma função par, isto é, simétrica sob reflexões em torno da origem. No entanto, nesta fase do sistema, caracterizada pelos parâmetros $k < 0$ e $\lambda > 0$, a posição de equilíbrio não se mantém invariante sob reflexões, contrariamente ao que ocorre na fase com $k > 0$ e $\lambda < 0$, na qual a posição de equilíbrio, $x = 0$, é invariante sob reflexão. É exatamente esta característica que constitui a quebra espontânea de simetria: as configurações de equilíbrio não exibem as simetrias da função energia potencial

Como exemplo de um OA, sugere-se o slide 12 do Anexo C, apresentado na Figura 15.

Figura 15- Mola deformada, obtendo um novo ponto de equilíbrio



Fonte: Próprio Autor

Em seguida, os grupos apresentam os resultados obtidos em cada uma das questões que integram essa atividade. As questões 1 e 3 tratam das simulações com diferentes parâmetros. Na atividade 1 é solicitado que a simulação seja realizada com os parâmetros e condições iniciais que seguem:

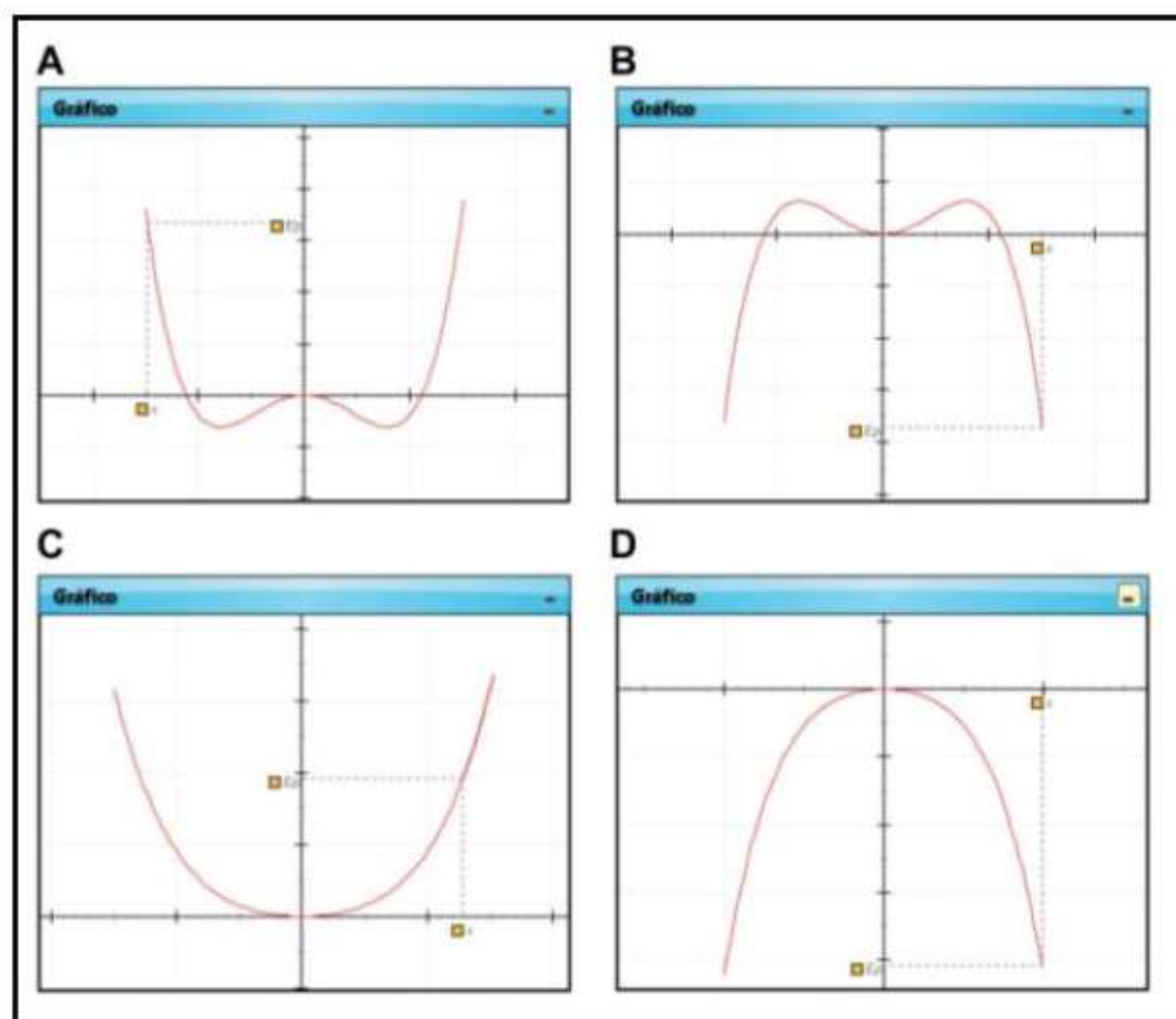
$$k = -2,0 \text{ N/m}; \lambda = 0,80 \text{ N/m}^3; v = 1 \text{ m/s}; x = 0 \text{ m e } m = 1 \text{ kg}$$

No exercício 3 da atividade 1, as simulações apresentam as seguintes condições iniciais e parâmetros:

- $k = 2,0 \text{ N/m}; \lambda = -0,80 \text{ N/m}^3; v = 1 \text{ m/s e } x = 0 \text{ m}.$
- $k = 2,0 \text{ N/m}; \lambda = 0,80 \text{ N/m}^3; v = 1 \text{ m/s e } x = 0 \text{ m}.$
- $k = -2,0 \text{ N/m}; \lambda = -0,80 \text{ N/m}^3; v = 1 \text{ m/s e } x = 0 \text{ m}.$

É esperado que os resultados encontrados pelos estudantes, para a energia potencial dos osciladores (E_p) em função do deslocamento (x), sejam os apresentados na Figura 16.

Figura 16: Simulações Para Casa



Fonte: Próprio autor

A- corresponde a simulação feita na atividade 1, para o caso em que $k < 0$ e $\lambda > 0$; B - corresponde a simulação feita na atividade 3a), para o caso em que $k > 0$ e $\lambda < 0$; C - corresponde a simulação realizada na atividade 3b), para o caso em que $k > 0$ e $\lambda > 0$; D - corresponde ao simulação feita na atividade 3c), onde $k < 0$ e $\lambda < 0$

Cada aluno tem sua vez de mostrar os resultados encontrados. A discussão é realizada com toda a turma, em cima de todos os trabalhos. Em meio a conversa, é importante que o professor se atente sempre em conduzir os estudantes para nuances de cada simulação.

Realizada a discussão em torno das atividades, lê e resolve a lista de exercícios com os alunos. Explicando a problematização inicial da atividade. Aqui é apresentado o conceito de quebra de simetria, partindo da análise gráfica da energia dos osciladores. Essa é uma parte expositiva, onde o professor mostra para a classe que no oscilador anarmônico, assim como qualquer outro sistema físico, o sistema busca um ponto de mínima energia e dessa forma a simetria é quebrada, pois espontaneamente o sistema “escolhe” oscilar a direita ou esquerda. Dessa forma uma nova simetria é estabelecida, ao redor de um novo ponto de equilíbrio. Isso é o que chamamos de quebra espontânea de simetria. O professor explica que nos casos apresentados pela Figura 16 (3B) e 16 (3C) fica claro que não ocorre a quebra de simetria.

Na figura 16 (3A) onde $k > 0$ e $\lambda < 0$ a força se torna repulsiva para,

$$x < -\sqrt{-\frac{k}{\lambda}} \text{ e } x > +\sqrt{-\frac{k}{\lambda}}.$$

Portanto, em termos de energia potencial, isso significa que para uma dada energia total do sistema a partícula escaparia do estado ligado e $x \rightarrow \pm\infty$. Logo esse potencial não corresponde ao sistema com quebra de simetria.

Sendo assim, a única situação que demonstro um sistema em que a simetria é quebrada, se encontra na Figura 16 (1), onde $k < 0$ e $\lambda > 0$. Temos, nesse exemplo, estados ligados correspondentes às oscilações em torno das duas posições de equilíbrio, que por sua vez correspondem aos pontos de mínimo da função energia potencial. Esse é o sistema que nos interessa!

A SEQUÊNCIA DIDÁTICA - AULA 4

Aula 4- O mecanismo de Higgs

Principais conceitos trabalhados: Oscilador Anarmônico; Mecanismo de Higgs; Campo de Higgs

Objetivos: Conectar os conceitos do OA com o campo de Higgs.

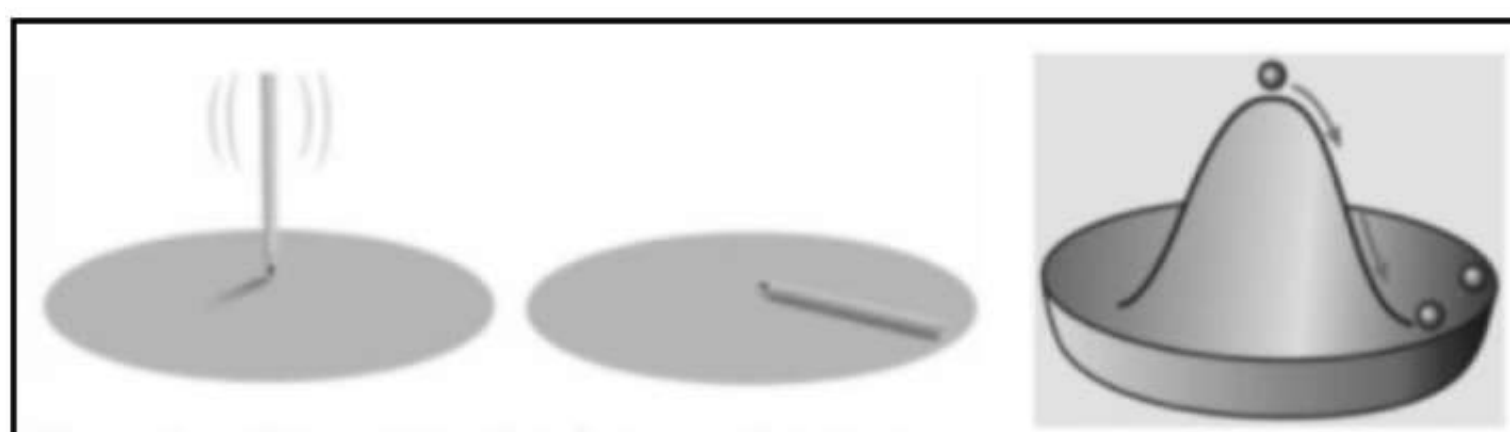
Tempo Necessário: 50 minutos

Nesse encontro, o professor dá continuidade à analogia entre o OHD e o Campo de Higgs, mostrando como o comportamento dos sistemas podem ser comparados. Essa é a aula para as dúvidas finais serem sanadas, e as últimas questões serem levantadas.

O objetivo é guiar os estudantes, para que eles sejam capazes de compreender como esse tipo de sistema estudado, e entender o campo de Higgs e sua relação com a massa.

A exposição da Figura 17, contida no slide 23, também auxilia na explicação.

Figura 17 - Quebra de Simetria por Analogias



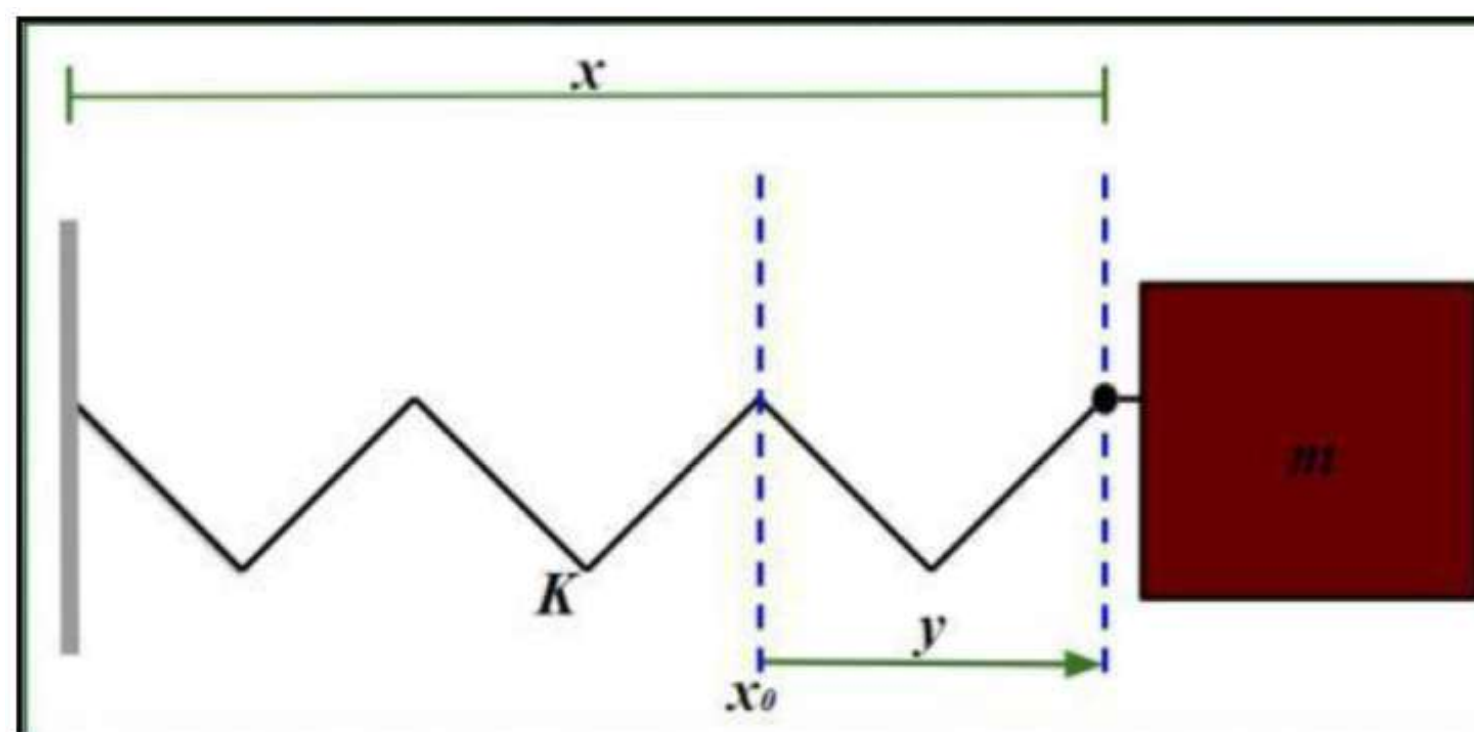
Fontes: <[http://nobelprize.org/nobel prizes/physics/laureates/2008/info.pdf](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/info.pdf)>
<https://cerncourier.com/a/from-bcs-to-the-lhc/1/CChig5_01_08> (Compilado pelo Autor)

Uma analogia interessante é um lápis que quando equilibrado em sua ponta, tende a cair para um dos lados, como se “escolhesse” espontaneamente esquerda ou direita, o mesmo ocorre com o oscilador anarmônico. O mesmo ocorre quando uma esfera é colocada no ponto máximo de um “chapéu mexicano”. Essa esfera está em um ponto instável e por isso tende a rolar para um dos lados, onde ficará oscilando em torno do ponto de mínima energia potencial. Esse exemplo elucida como uma simetria é quebrada e logo após é restabelecida em torno de um novo ponto de equilíbrio, com frequência definida por novos parâmetros, como ocorre no OA.

Agora o professor manipula as equações e troca as coordenadas para mostrar o campo de Higgs por meio do OA, como apresentado no slide 17. Neste caso, é importante definir uma coordenada física, que designaremos por y , que descreve as oscilações em torno de x_0 (Figura 18). De forma que,

$$x = x_0 + y.$$

Figura 18 - Mudança de coordenada para o ponto de equilíbrio do OA



Fonte: Próprio Autor

A mudança de ponto de equilíbrio corresponde ao que denominamos uma transição de fase do sistema, isso significa que só para determinados valores de k e λ , teremos quebra de simetria. O sistema é essencialmente o mesmo: a massa e a mola, mas com os parâmetros em outra região de valores, de forma que o sistema apresenta uma física diferente daquela correspondente a situação em que a oscilação se dá unicamente em torno da origem (OHS), quando não ocorre quebra de simetria.

Dessa forma, precisamos reinterpretar o resultado para o caso em que a oscilação não está unicamente em torno da origem, como mostrado na Figura 16A. Dessa forma, o problema requer a introdução de uma nova coordenada física "H". Assim sendo, a equação:

$$x = x_0 + y$$

passa a ser descrita por,

$$\phi = \phi_0 + H.$$

É importante destacar que, nesta situação, H representa o campo que corresponde às flutuações (oscilações) em torno da configuração de equilíbrio, ϕ_0 ; é ao campo H que nos referimos como campo de Higgs e a partícula a este associada é o bóson de Higgs. O ponto central na analogia oscilador anarmônico- campo de Higgs consiste em substituir a coordenada oscilatória, y, em torno da posição de equilíbrio, x_0 , pelo campo de Higgs, H flutua em torno da configuração de mínima energia ϕ_0 .

Da mesma forma, analogias também podem ser feitas com as equações da Força (F_H) e Energia Potencial do campo de Higgs (E_H),

$$F = -kx - \lambda x^3$$

$$F_H = -k\phi - \lambda\phi^3$$

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2 - \frac{1}{4}\lambda x^4$$

$$E_H = \frac{1}{2}k\phi^2 - \frac{1}{4}\lambda\phi^4$$

Feito isso, inicia-se uma abordagem a respeito da massa de Higgs e como essa está associada a ϕ_0 , como propõe a equação apresentada,

$$m_H^2 = 2\lambda - \phi_0^2 = -2k$$

Note que a demonstração dessa equação só pode ser apresentada na opção 2, contida no Apêndice E.

Por essa equação, nota-se que a massa de Higgs vem da oscilação em torno de ϕ_0 .

As demais partículas do Modelo-Padrão: léptons carregados (elétron, múon, tau e suas correspondentes antipartículas), os quarks (u,d,c,s,t,b) e os correspondentes antiquarks e os bósons W^+ , W^- , Z^0 , todos adquirem massa através do mecanismo de Higgs, ou seja, as suas respectivas massas são geradas através do mecanismo de Higgs e são todas proporcionais a ϕ_0 .

E como, ϕ_0 pela relação acima, é proporcional à massa do bóson de Higgs, resulta que todas as partículas massivas do Modelo-Padrão têm suas massas parametrizadas pela massa do bóson de Higgs. Assim, designando a massa de uma partícula genérica por m_p e a constante de acoplamento desta partícula ao bóson de Higgs por g_{pH} , podemos escrever que

$$m_p = g_{pH} m_H$$

Na questão 5 da Atividade 2 (Apêndice C) os alunos calculam a massa de algumas partículas por meio dessa equação.

Para finalizar a aula, o professor mostra como podemos relacionar: energia, frequência de oscilação de partículas e corpos e as suas respectivas massas. Para isso, o professor utiliza as equações,

$$E = \frac{h\omega}{\pi},$$

$$E = mc^2,$$

para apresentar a equação,

$$\omega = \frac{2\pi c^2 m}{h},$$

encontrada na questão 5, da segunda lista de exercícios, contida no Apêndice C. Esse Apêndice contém a lista de atividades que os alunos devem fazer em casa, finalizando assim a sequência didática.

A SEQUÊNCIA DIDÁTICA - AULA 5

Aula 5- Correção da Atividade 2

Principais conceitos trabalhados: Mecânismo de Higgs

Objetivos: Aprimorar o conhecimento por meio do debate sobre as questões .

Tempo Necessário: 50 minutos

Nessa aula o professor corrige a Atividade 2 encontrada no Apêndice C. Por meio do debate, analisando as respostas de cada questão, o professor guia os estudantes para compreensão dos possíveis pontos ainda não compreendidos.

É importante que o professor corrija em casa, antes dessa aula, a atividade de cada aluno. Isso permitirá identificar as dificuldades e pontos fortes de cada estudante.

REFERÊNCIAS

KNEUBI, Fabiana; PIETROCOLA, Maurício. A Pesquisa Baseada em Design: visão geral e contribuições para o ensino de ciências. *Investigações em Ensino de Ciências*, São Paulo-SP, ano 2017, v. 22, n. 2, p. 01-16. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22600/1518-8795.ienci2017v22n2p01>. Acesso em: 26 jan. 2021.

O BÓSON de Higgs EXPLICADO. Gravação de Pedro Loss. Youtube: Ciência Todo Dia, 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=gCaTJYhA4Ik>. Acesso em: 13 jun. 2021.

PLEITEZ, V. A física de partículas elementares e o Prêmio Nobel de Física 2008. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, p. 4301.1-4301.5, 2008.

SÁ, A.; BALTHAZAR, W. F.; HELAYËL-NETO, J. A. Quebra espontânea de simetria e mecanismo de Higgs: uma abordagem a partir dos osciladores harmônico simples e anarmônico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 43, 2021.

TED-ED: Lincoln Don Higgs Boson. Gravação de Don Lincoln. Youtube: Powerhouse Animation Studios, ca. 2013. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=gCaTJYhA4Ik>. Acesso em: 13 jun. 2021.

Apêndice B - Atividade 1

Atividade 1

Aluno:

Data:

Realizamos a simulação do oscilador harmônico simples (OHS), no qual avaliamos o comportamento da energia potencial e cinética sistema bloco-mola.

Agora, vamos analisar um problema parecido, um oscilador harmônico deformado (OHD). Para este caso, a força exercida pela mola não obedece mais a Lei de Hooke, como podemos ver na equação abaixo

$$F = - kx - \lambda x^3$$

Para criarmos um significado físico para essa força, suponha que temos uma mola constituída por um determinado metal que oscila em torno de . No entanto, quando submetida a altas temperaturas, algumas de suas características mecânicas são alteradas. Isso faz com que a mola comece a oscilar em torno de um ponto diferente de . Sendo assim, baseado na equação da força acima descrita, encontramos uma nova equação para descrever a energia potencial desse oscilador;

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2 - \frac{1}{4}\lambda x^4$$

Considerando $k = -1\text{N/m}$; $\lambda = 1\text{N/m}$; $v = 1\text{m/s}$; $x = 0$ e $m = 1\text{Kg}$. Utilize o *Modellus* para estudar esse novo oscilador, seguindo o que foi estudado na aula anterior.

Observações:

- As constantes são inseridas na aba “*Parâmetros*” e os termos são inseridos na aba “*condições iniciais*”.
- Não esqueça de substituir as equações de energia potencial e força que utilizamos na aula anterior, pelas novas equações que foram encontradas no enunciado acima.

Após simular, observe atentamente o resultado encontrado e responda às seguintes questões:

1- Compare o gráfico da energia potencial em função da posição para o OHD com o gráfico da energia potencial para o OHS, que foi discutido em sala de aula. Faça um print da tela e coloque no espaço abaixo.

2- Quais são os pontos de equilíbrio desse oscilador? Ele poderia oscilar em torno de $x=0$? Você poderia identificar pontos de equilíbrio estável nesse oscilador?

3-Agora simule e cole print dos resultados obtidos para os casos em que temos os seguintes parâmetros:

- a) $k = 1\text{N/m}$; $\lambda = 1\text{N/m}$; $v = 1\text{m/s}$ e $x = 0\text{m}$.
- b) $k = -1\text{N/m}$; $\lambda = -1\text{N/m}$; $v = 1\text{m/s}$ e $x = 0\text{m}$.
- c) $k = 1\text{N/m}$; $\lambda = -1\text{N/m}$; $v = 1\text{m/s}$ e $x = 0\text{m}$.

obs.: Após realizar as simulações utilizando os parâmetros acima, fique à vontade para realizar novas simulações com outros parâmetros à sua escolha.

4- Com relação a simulação, você teve alguma dificuldade?

5- Quais foram os pontos positivos da utilização do *Modellus* para aprender física?

Apêndice C - Atividade 2

Atividade 2

Aluno:

Data:

1- Como vimos em nossas aulas, a ideia de simetria é muito importante na física. Utilizando o que aprendeu nas aulas, diga com suas palavras o que você compreendeu sobre simetria e quebra de simetria. Você poderia dar outros exemplos de simetria que ocorrem na descrição que a física faz da natureza?

2- Compare e descreva o comportamento da energia potencial do oscilador harmônico antes e depois de sofrer a quebra espontânea de simetria. O que muda no sistema, antes e depois de ocorrer a quebra de simetria?

3- Olhando para o Oscilador Anarmônico, descreva com suas palavras, como estão associados: o ponto de equilíbrio, a frequência de oscilação, a energia e a massa da partícula associada ao sistema.

4- Utilize a equação $\omega = \frac{2\pi c^2 m}{h}$, para encontrar a frequência de vibração associada a:

- a) Massa do elétron
- b) Massa do próton
- c) Sua massa
- d) Massa do seu amigo/amiga

Considerando que:

$$\pi = 3,14$$

$$c = 299792458 \text{ m/s}$$

$$h = 6.62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$\text{massa do elétron} = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$$

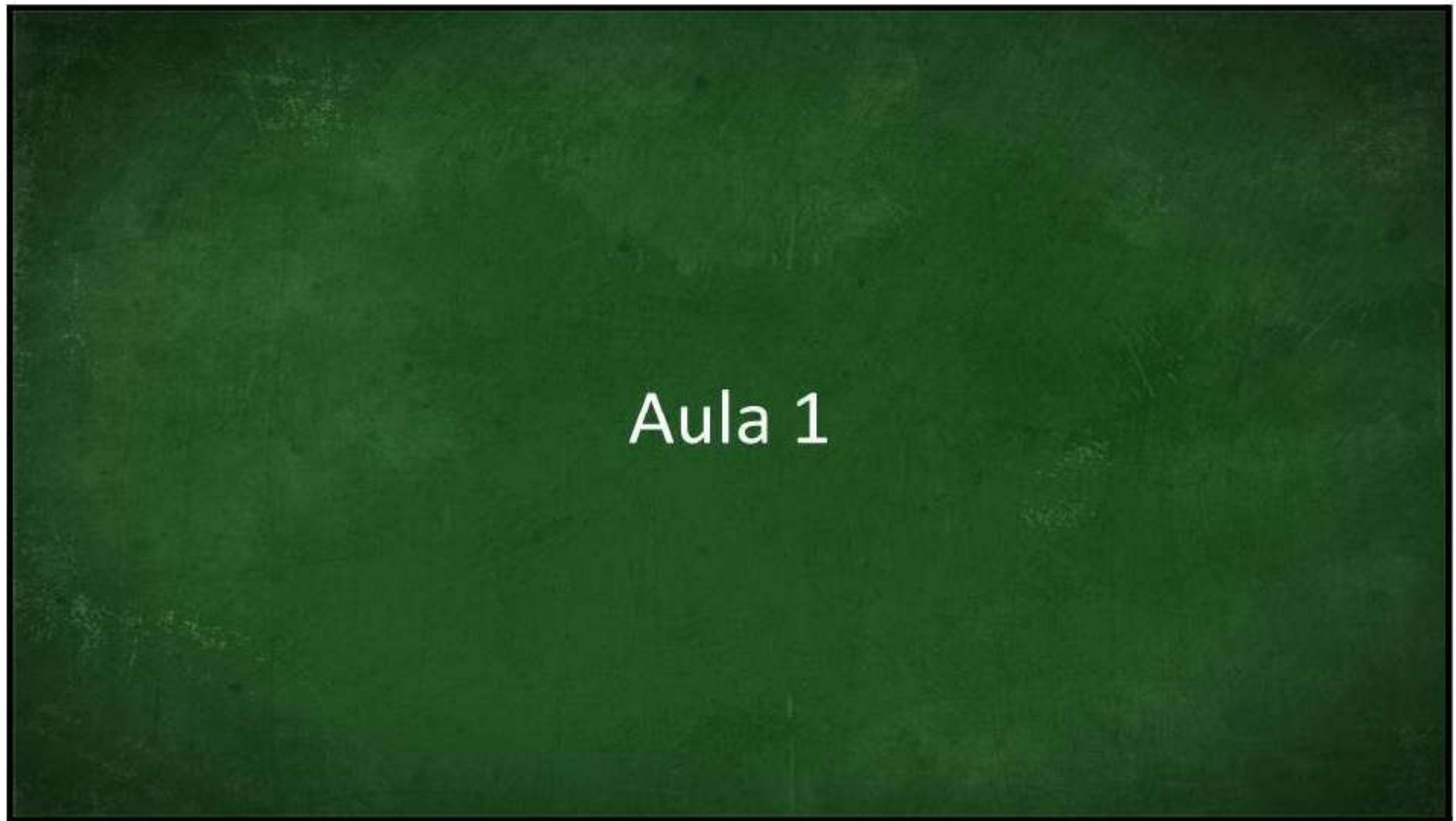
$$\text{massa do próton} = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$$

5- Considere a lei encontrada em aula, que nos diz que a massa de qualquer partícula massiva do modelo padrão é proporcional a massa de Higgs, como mostra a equação

$$m_p = g_{pH} m_H .$$

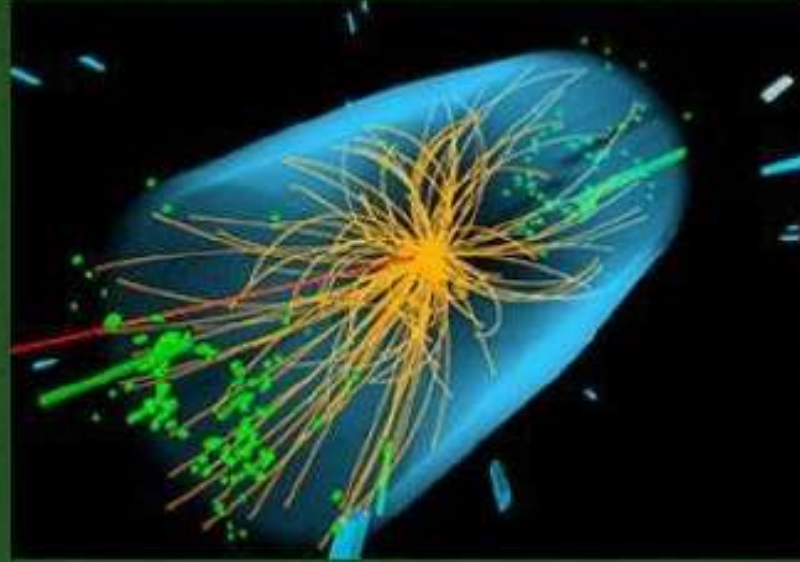
Sabendo que $m_H = 125.3 \pm 0.6 \text{ GeV}/c^2$, encontre a constante de acoplamento g_{pH} seguintes partículas.

- a) Elétron ($m = 0,000511 \text{ GeV}/c^2$)
- b) Múon ($m = 0,106 \text{ GeV}/c^2$)
- c) Quark Up ($m = 0,005 \text{ GeV}/c^2$)
- d) Quark Top ($m = 174,2 \text{ GeV}/c^2$)
- e) Bóson Z0 ($m = 91,2 \text{ GeV}/c^2$)



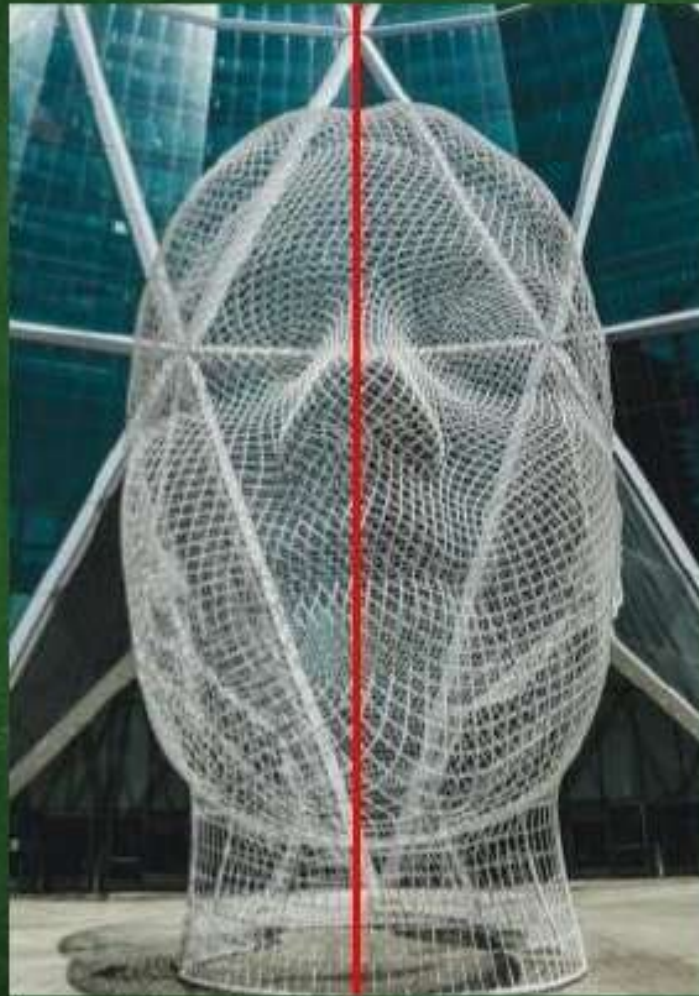
Mecanismo de Higgs

O mecanismo de Higgs trata do surgimento da massa de algumas partículas por meio da quebra de simetria em um campo.



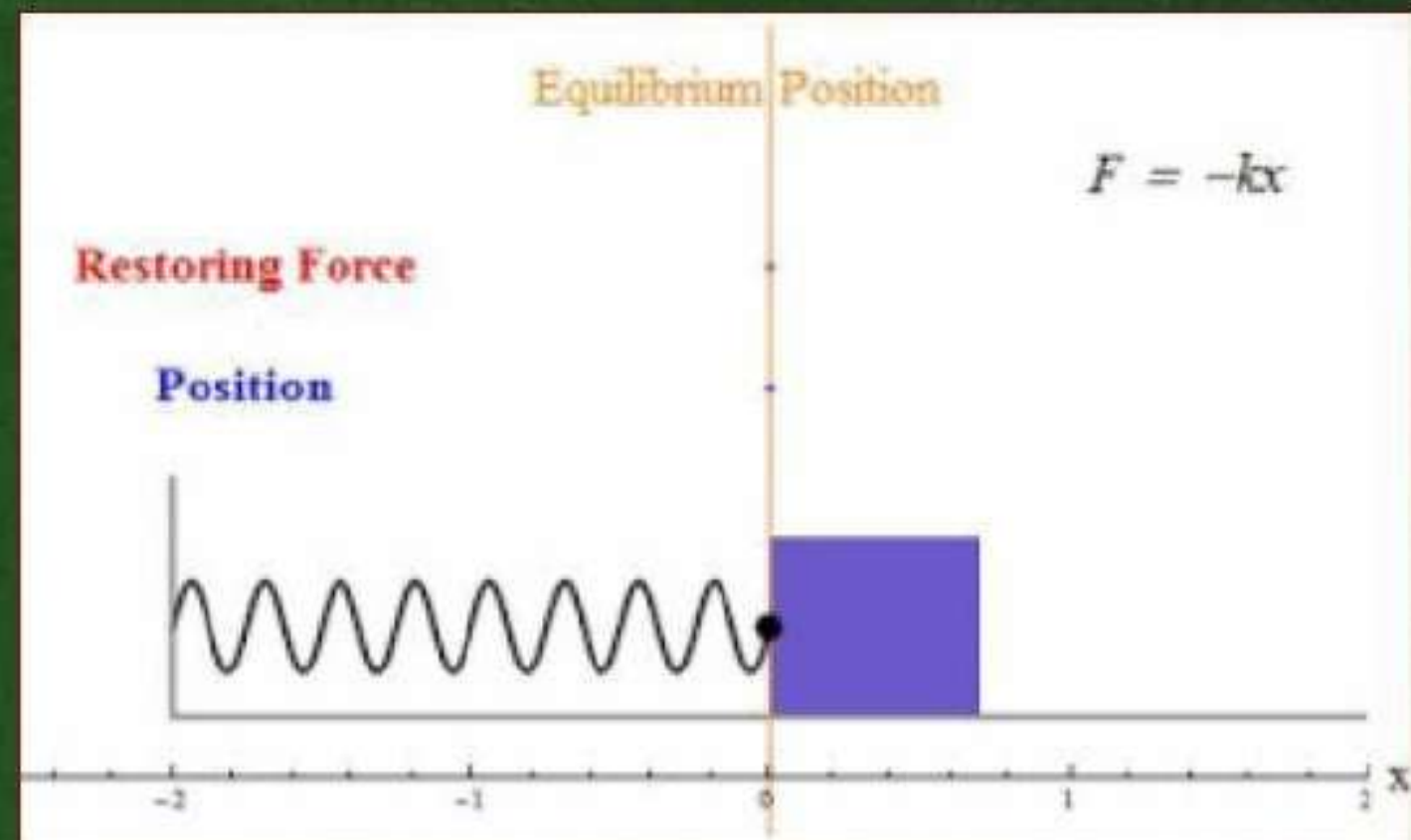
Referências: <https://societificacom.br/o-misterio-intrigante-da-origem-da-massa/>
<http://agencia.fapesp.br/experimento-demonstra-decaimento-do-boson-de-higgs-em-componentes-da-materia/19354/>

Mas afinal: o que é simetria?



Oscilador Harmônico Simples (OHS)

Oscilador Harmônico Simples é um sistema que oscila com uma frequência constante.



Referências: <https://makephyeasier.blogspot.com/2016/12/simple-harmonic-motion.html>

Que energia potencial, podemos associar a força restauradora da mola?

Oscilador Harmônico Simples (OHS)

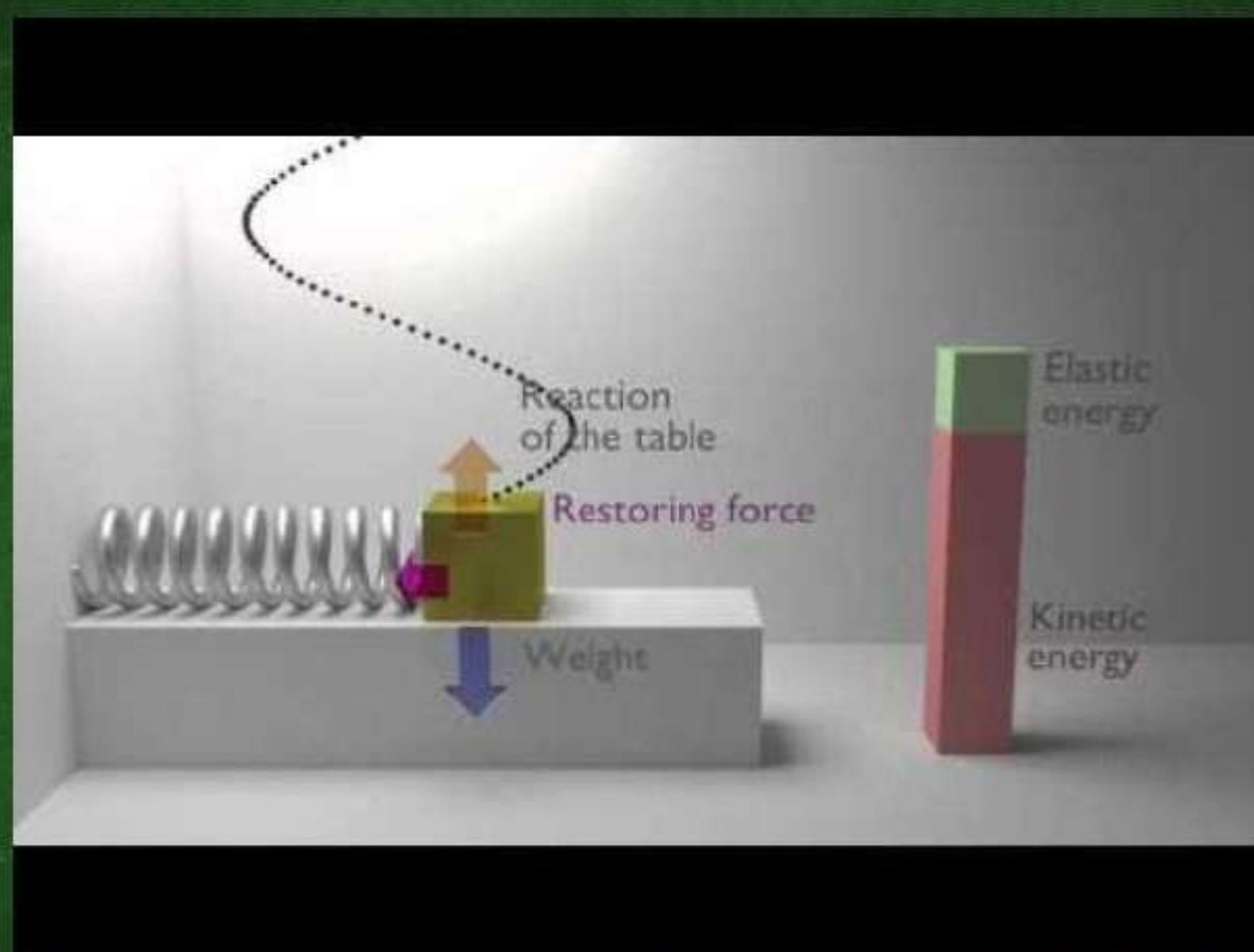
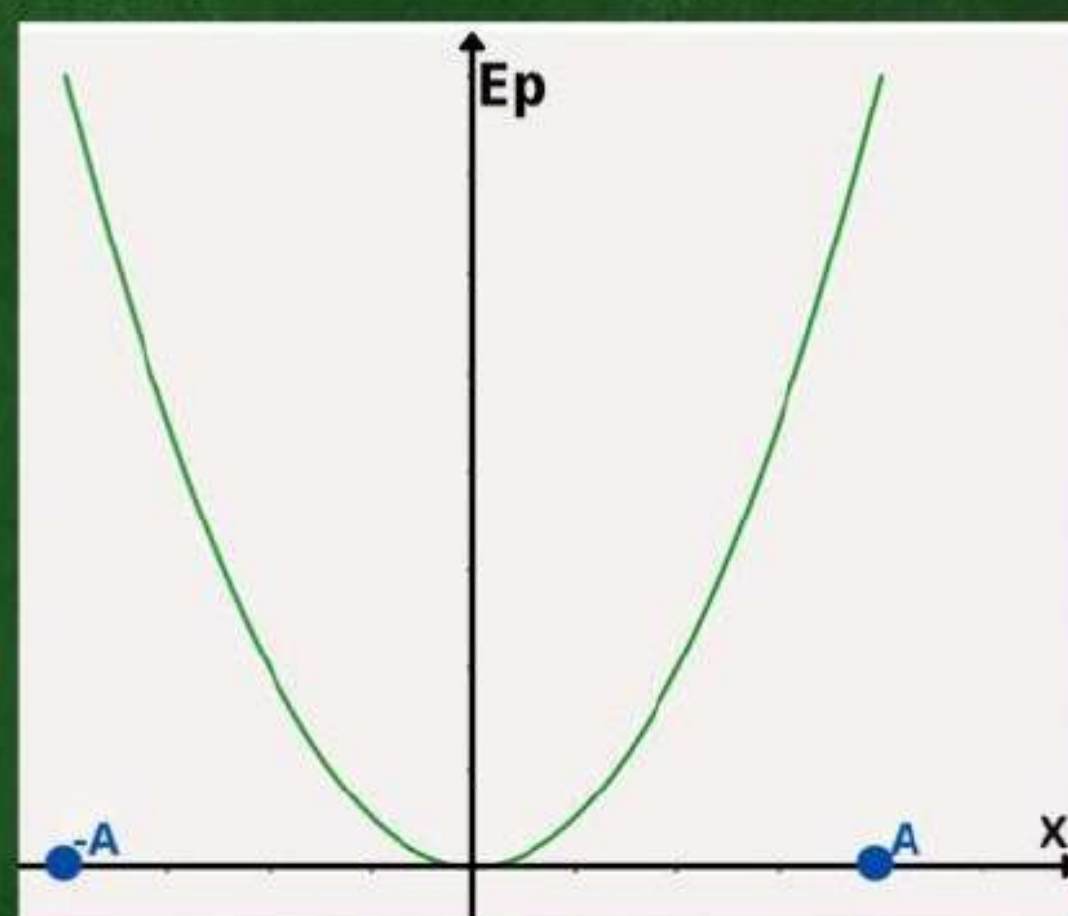
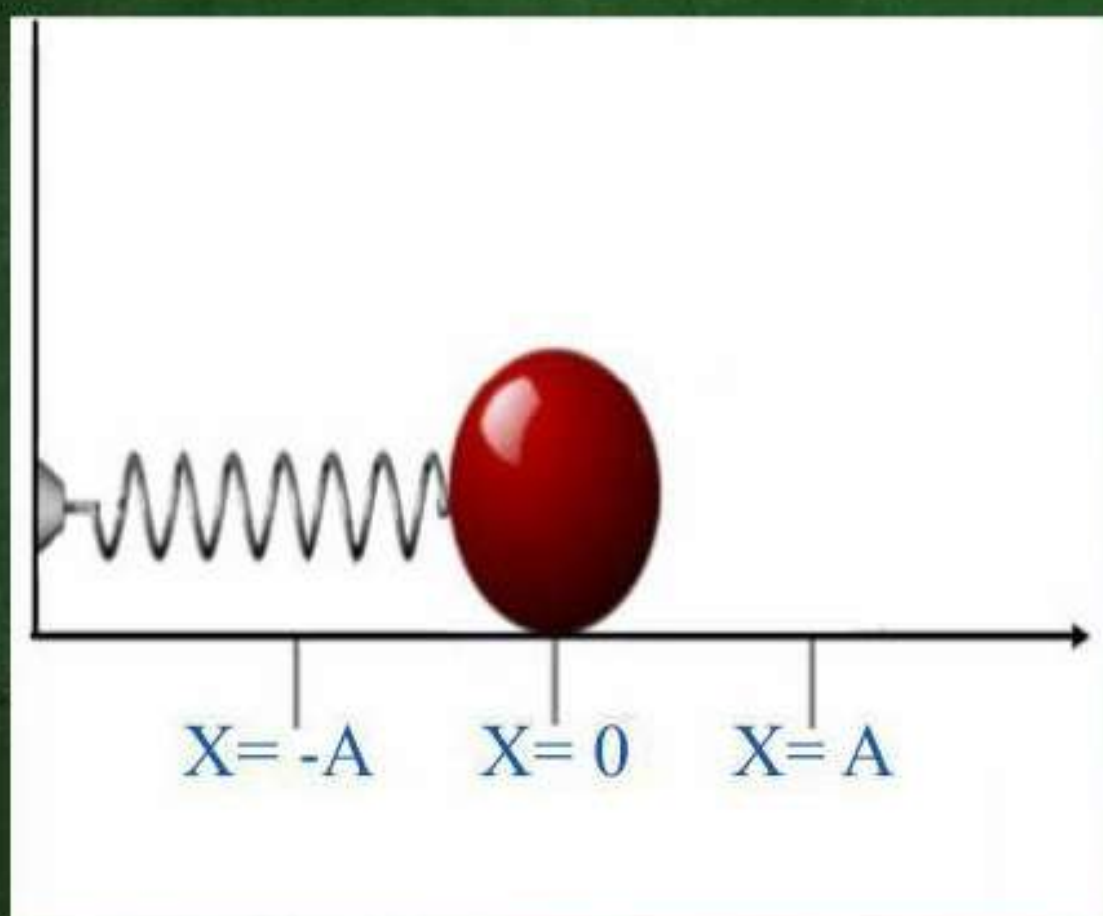
O oscilador harmônico simples (OHS), representa um sistema físico que oscila com uma frequência constante em torno de um ponto de equilíbrio (FEYNMAN, 2008).



Referências: VIBRATION of an ammonia molecule. Kyroskichannel. Youtube, acessado em 11 de dezembro de 2020.

$$F = -K.x$$

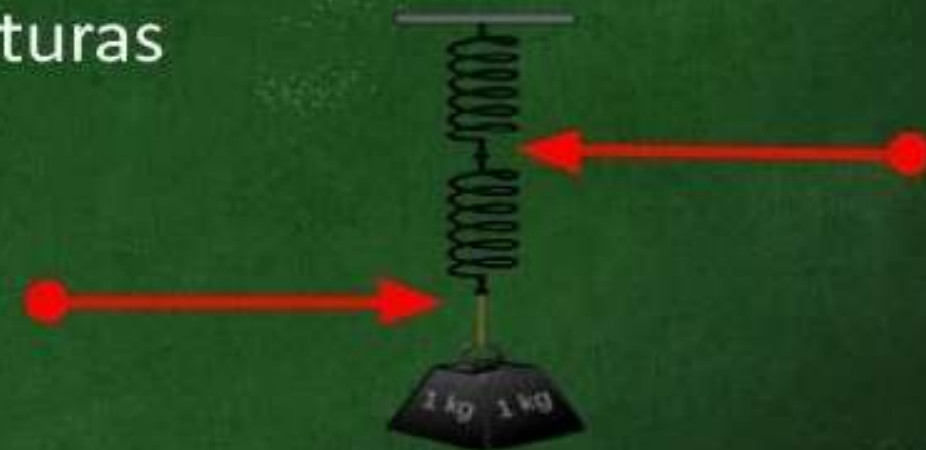
$$E_P = \frac{1}{2}.K.x^2$$



Aula 3

Oscilador Harmônico Deformado

Uma mola que sofreu uma deformação plástica e oscila em torno de um ponto de equilíbrio, sendo esse, diferente do ponto de equilíbrio que havia antes da deformação. Podemos citar ainda um metal que teve suas características alteradas por um processo de submissão a altas temperaturas



Referências: Referência: <https://pt.khanacademy.org/science/physics/work-and-energy/hookes-law/a/what-is-hookes-law>

Aula 4

Quebrando a Simetria!

Por exemplo, suponhamos uma mesa de jantar preparada de modo que há um copo de água entre cada dois lugares nessa mesa. Há uma simetria, mas cada participante pode usar o copo que está a sua direita ou a sua esquerda. A simetria esquerda-direita existe até que alguém toma um desses copos. Nesse momento, a simetria esquerda-direita é espontaneamente quebrada. Mas essa simetria continua por trás da quebra. Ou seja, fica camuflada (ibid.) (MOREIRA, 2019).

A quebra de simetria na Natureza

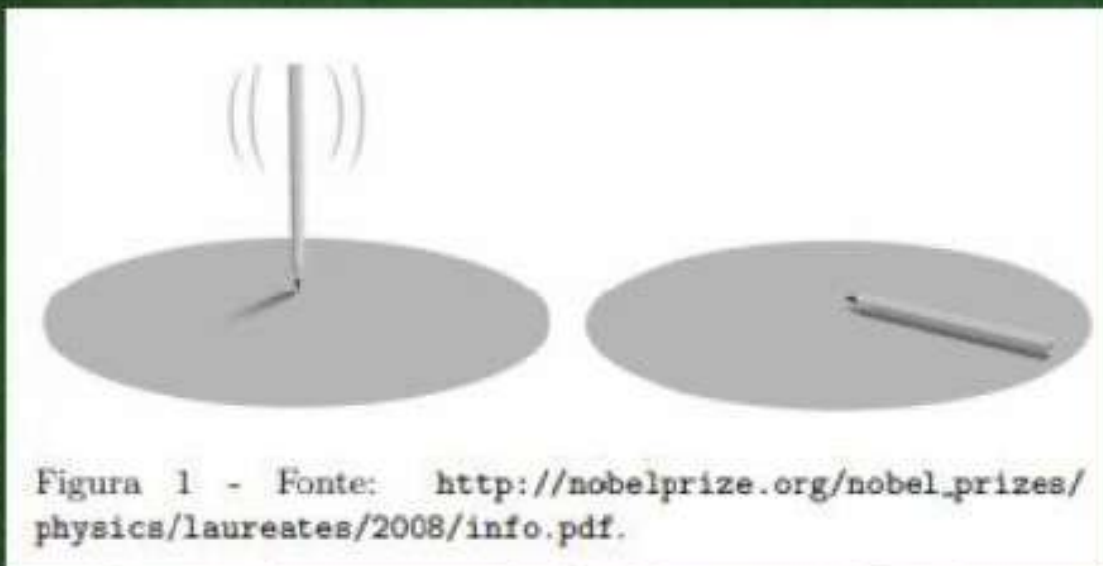


Figura 1 - Fonte: http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/info.pdf.

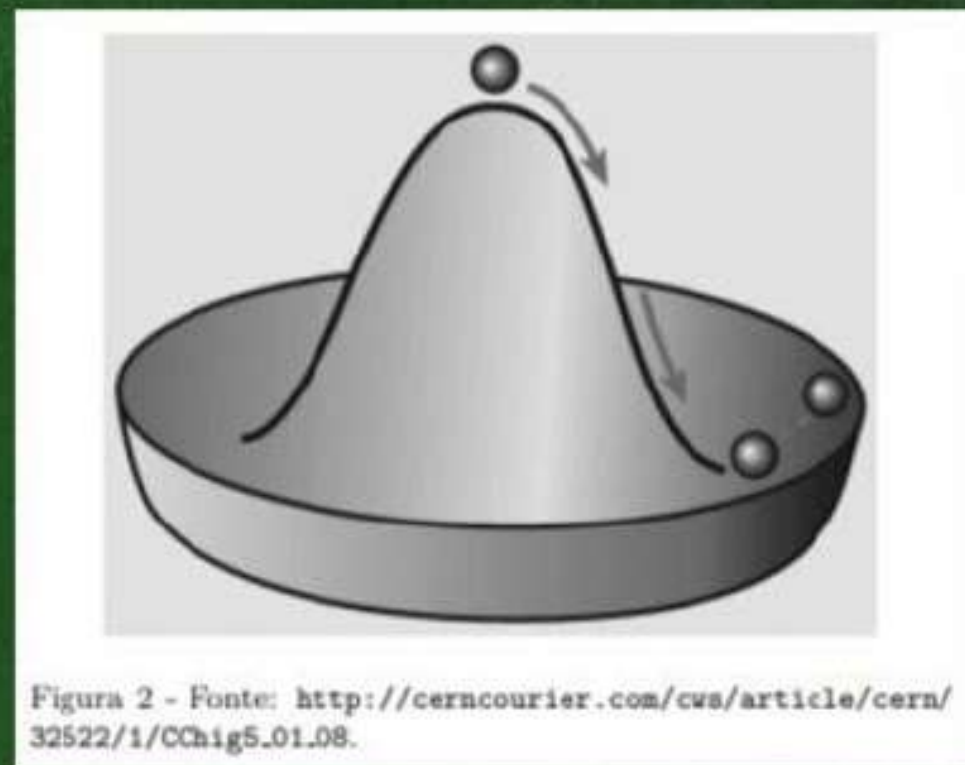
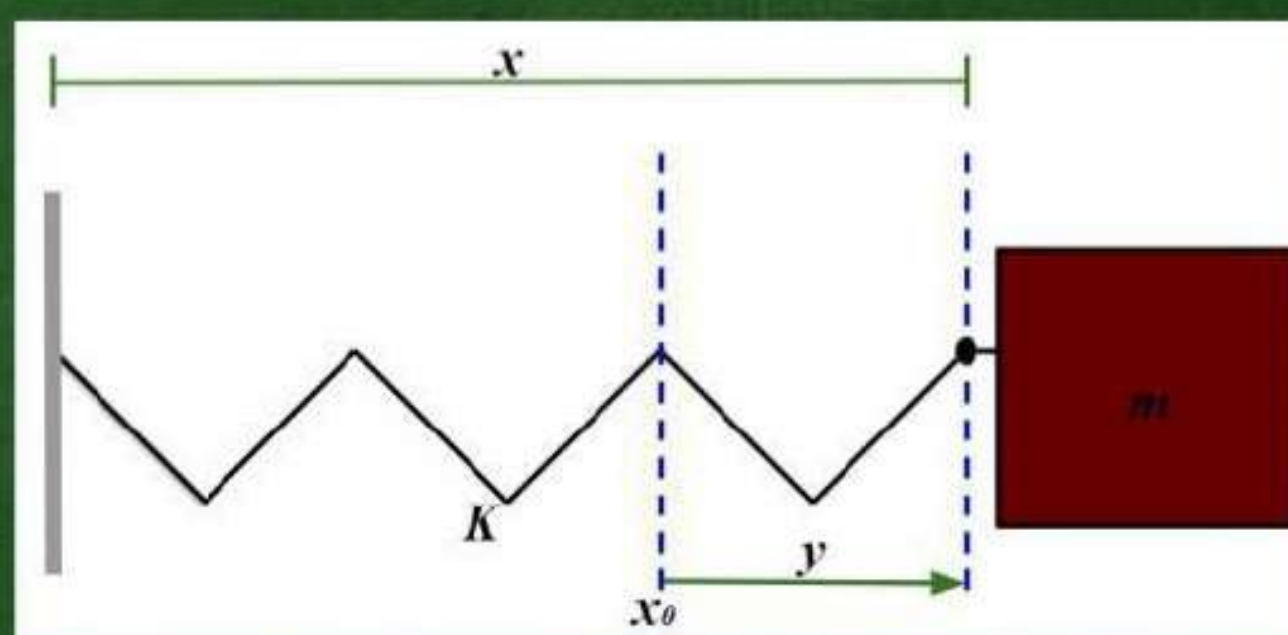


Figura 2 - Fonte: <http://cerncourier.com/cws/article/cern/32522/1/CChig5.01.08>.

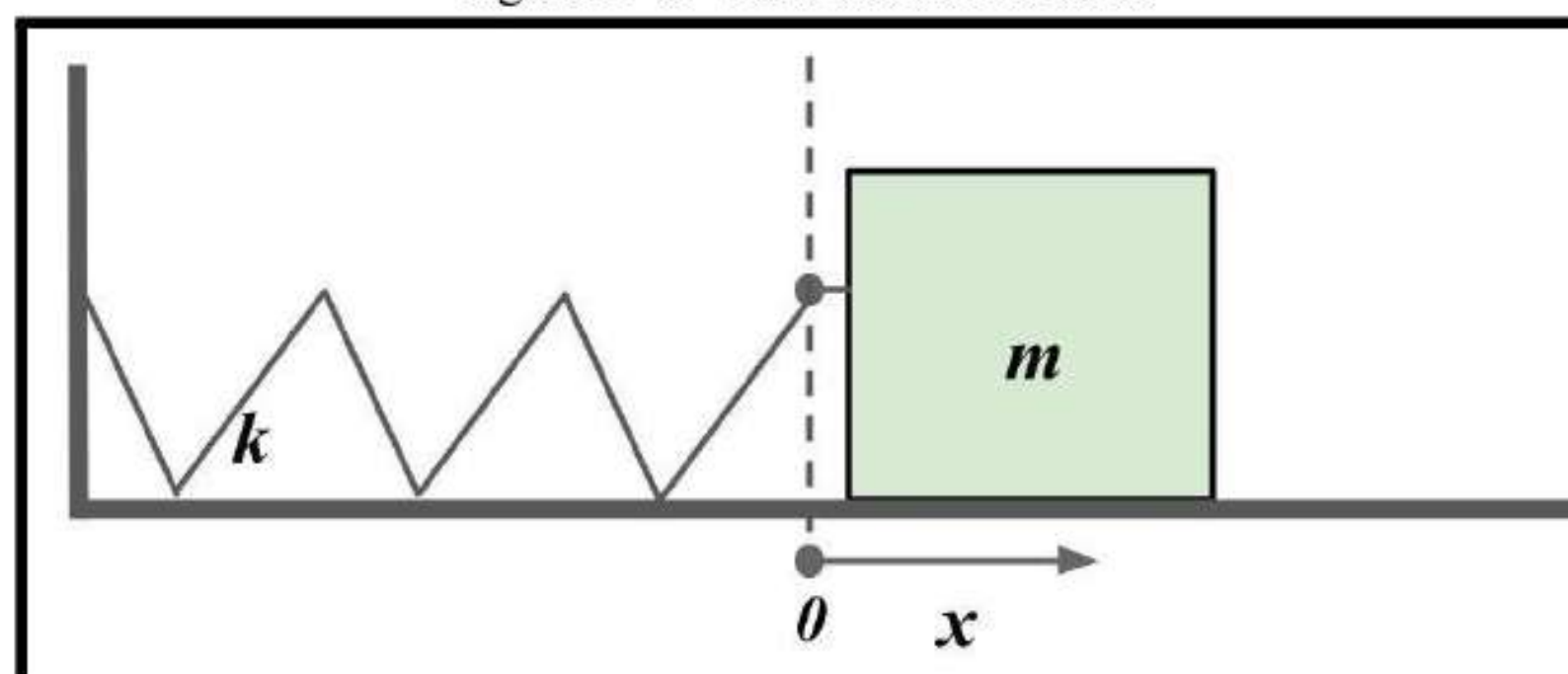
Oscilador Harmônico Deformado (OHD)



Apêndice E - Equações OHS e OA

Um exemplo de oscilador harmônico simples (OHS), recorrente em livros didáticos, é o sistema massa-mola. Imaginemos um corpo de massa “ m ”, preso a uma mola que possui constante elástica “ k ” e está fixada de forma que fique presa na posição horizontal, oscilando no eixo x , numa superfície sem atrito, como mostra a figura D-1.

Figura D-1 - Sistema massa-mola



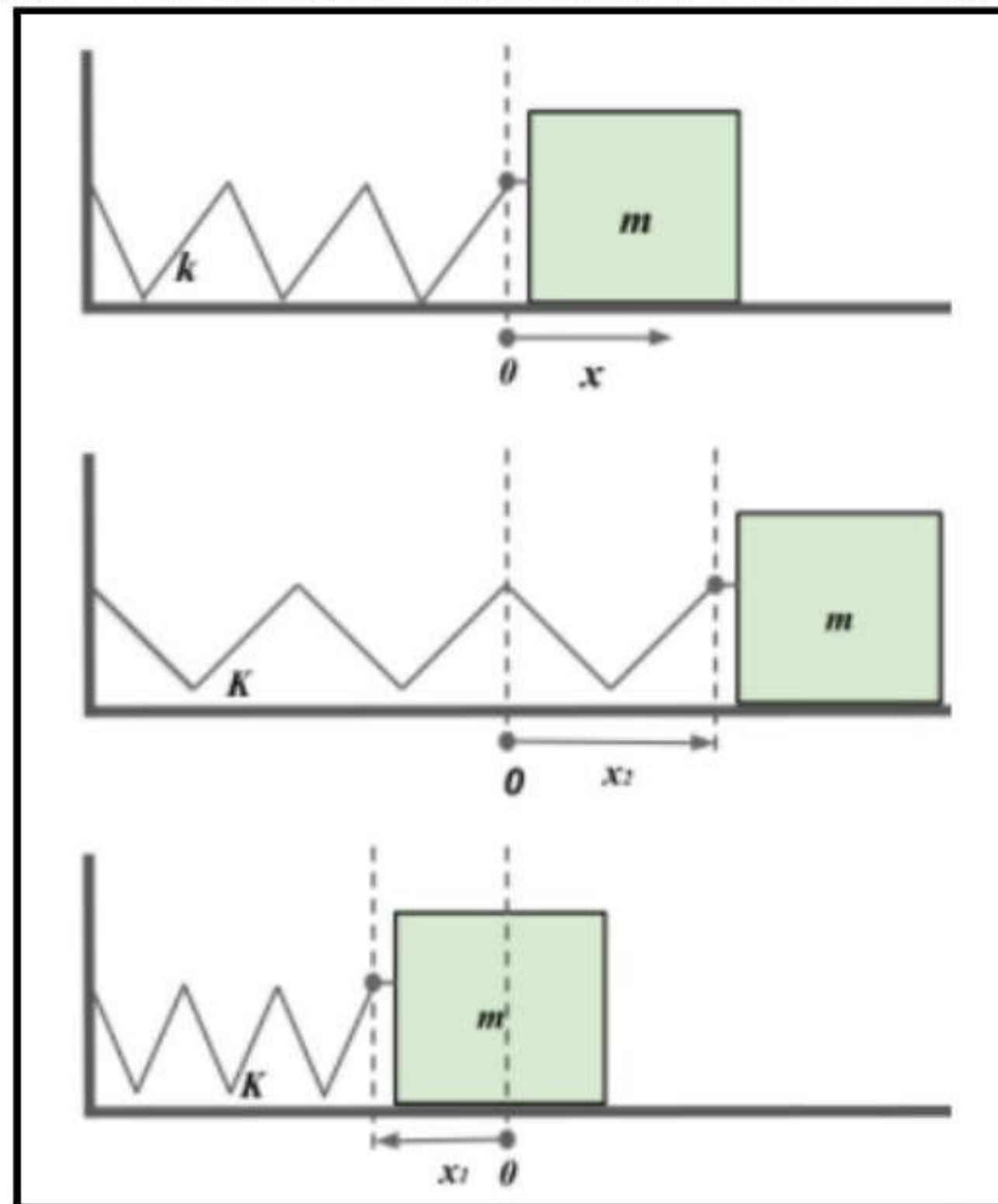
Fonte: Próprio autor

Após ser tirado de sua situação de equilíbrio (podendo a mola ser comprimida ou esticada), o corpo oscila com frequência constante f em torno do ponto de equilíbrio $x = 0$. A oscilação é provocada pela força elástica restauradora F , conhecida como Lei de Hooke,

$$F = -kx \quad (1)$$

responsável por fazer o corpo de massa m oscilar. Na ausência de atrito o corpo oscila em duas posições máximas $\pm x_m$ em relação à origem, conhecidas com amplitude do movimento harmônico. É importante mencionar que no sistema bloco-mola, toda a massa está contida no bloco, a mola é responsável pela força restauradora e sua massa é desprezada. A Figura D-2 mostra o movimento do bloco em diferentes posições.

Figura D-2 - Sistema massa-mola: em equilíbrio, esticado e comprimido



Fonte: Próprio autor

Com base na figura, podemos ver que $F > 0$ ($F < 0$) para qualquer posição $x < 0$ ($x > 0$). Assim para $x < 0$ o bloco desacelera ($a > 0$) quando se move para esquerda ($v < 0$) e acelera quando se move para direita ($a < 0$, $v > 0$). Naturalmente, a dinâmica do sistema bloco-mola é descrita pela segunda lei de Newton,

$$F = ma, \quad (2)$$

onde m é a massa do bloco e a é a aceleração do bloco. Partindo da segunda Lei de Newton podemos escrever equações que descrevem o oscilador harmônico simples, considerando (1) e (2) obtemos

$$m \cdot a = -kx, \quad (3)$$

consequentemente,

$$a = -\frac{k}{m}x. \quad (4)$$

Da equação (4) vemos que a aceleração é uma função da posição $a(x)$. Cabe agora avaliar o termo $-\frac{k}{m}$, para isso faremos uma análise dimensional. Considerando que k tem unidades de medida em $\frac{N}{m}$ e m em kg .

$$k \rightarrow \frac{N}{m} \rightarrow \frac{Kg.m}{s^2.m} \rightarrow \frac{Kg}{s^2}$$

Assim, temos que

$$\begin{aligned} \frac{K}{m} &= \frac{Kg}{Kg.s^2} \\ \frac{K}{m} &= \frac{1}{s^2} \\ \sqrt{\frac{K}{m}} &= \sqrt{\frac{1}{s^2}} = \frac{1}{s} \end{aligned}$$

Note que ω tem dimensão de frequência (s^{-1}), por isso, está associado ao número de oscilações que o sistema realiza por segundo. É importante destacar que a frequência depende exclusivamente de k e m , sendo, portanto, uma característica de cada sistema físico bloco-mola. Podemos, portanto, dizer que o termo $\sqrt{\frac{K}{m}}$ equivale a frequência angular ω do oscilador,

$$\sqrt{\frac{K}{m}} = \omega,$$

assim podemos considerar

$$\omega^2 = \frac{K}{m}. \quad (5)$$

Associando a Eq. (3) e (4) obtemos,

$$a = -\omega^2 x \quad (6)$$

Sabemos que a aceleração é a derivada segunda da posição, portanto

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega^2 x. \quad (7)$$

Esta equação diferencial tem solução conhecida

$$x(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t). \quad (8)$$

Sem perda de generalidade, podemos considerar a função posição da oscilador bloco mola, como segue

$$x(t) = A \cos(\omega t). \quad (9)$$

Se derivarmos a Eq. (5), obtemos a velocidade da partícula

$$v(t) = -\omega A \sin(\omega t). \quad (10)$$

Em um OHS podemos analisar também a energia potencial que o sistema apresenta. Sendo a energia potencial, uma energia dissociada da velocidade, mas associada à localização do objeto em uma região onde existe uma força, podemos concluir que, nesse exemplo específico, a energia potencial será associada a força elástica de restauração. Ao soltar o corpo e permitir que ele entre em movimento, a energia potencial do sistema começa a se transformar em energia cinética, essa sim, associada à velocidade do corpo. A seguir serão deduzidas as equações da energia potencial e energia cinética a partir da Eq (1) que enuncia a lei de Hook e da Eq (2) que descreve o princípio fundamental da dinâmica.,

Sabendo que,

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}, \quad (11)$$

substituindo a Eq (11) na Eq (2),

$$\begin{aligned} m \frac{\Delta v}{\Delta t} &= -Kx \\ m \Delta v &= -Kx \Delta t \end{aligned}$$

multiplicando os dois lados da equação por v ,

$$\begin{aligned} m \Delta v v &= -Kx \Delta t v \\ m \Delta v v &= -Kx \Delta t \frac{\Delta x}{\Delta t} \\ m \Delta v v &= -Kx \Delta x \end{aligned} \quad (12)$$

Agora, trabalhamos matematicamente a variação da velocidade do corpo (Δv).

É conveniente dizer que:

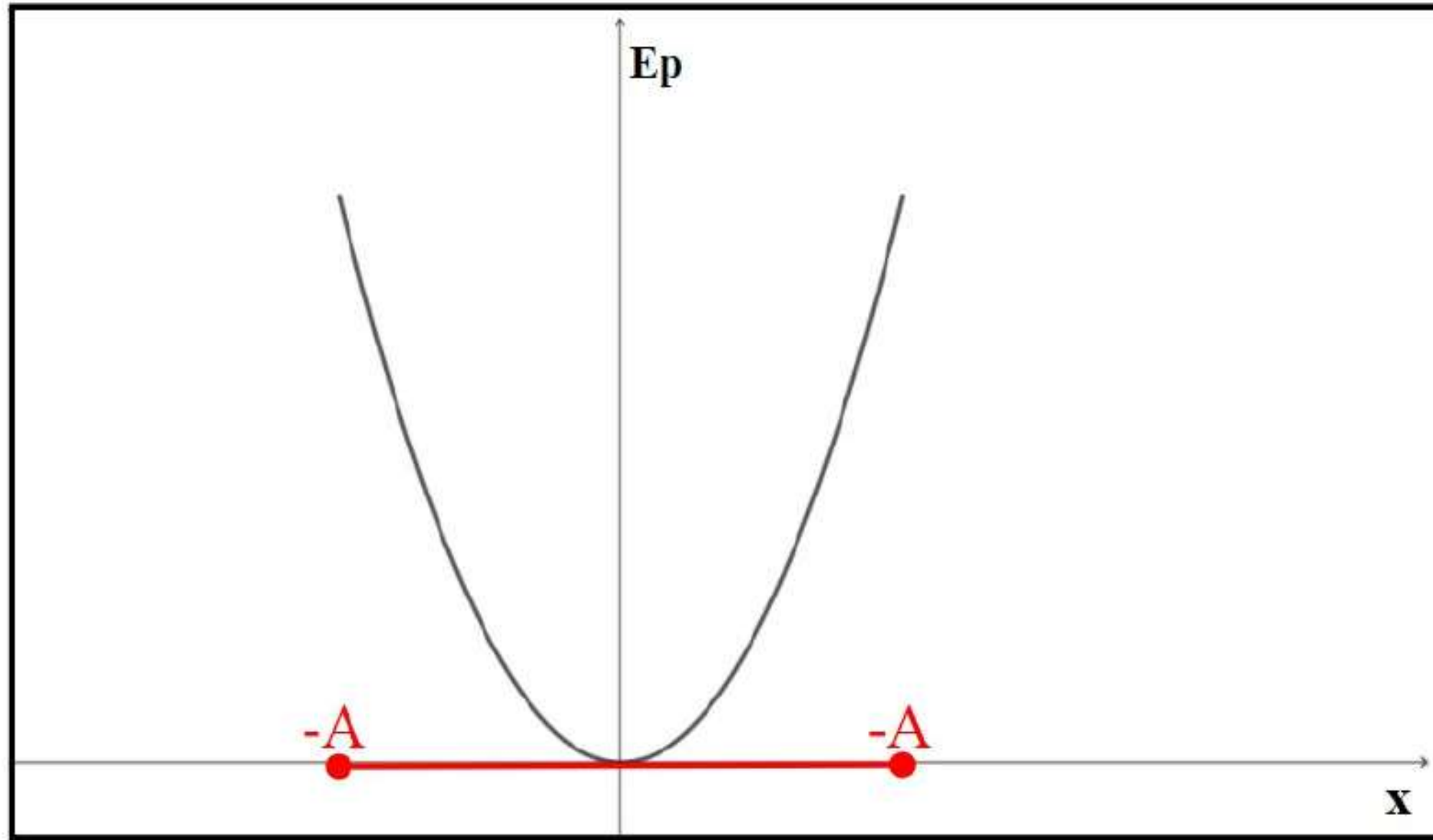
$$\begin{aligned} \Delta v &= (v + \Delta v) - v \\ \Delta v^2 &= (v + \Delta v)^2 - v^2 \\ \Delta v^2 &= (v^2 + 2v\Delta v + (\Delta v)^2) - v^2 \\ \Delta v^2 &= 2v\Delta v + (\Delta v)^2 \end{aligned}$$

Como (Δv) é um termo muito pequeno, $(\Delta v)^2$ poderá ser desprezado, assim:

$$\Delta v^2 \cong 2v\Delta v$$

onde E_t é a energia total, E_c a energia cinética e E_p a energia potencial do sistema em questão.

Figura D-3 - Função energia potencial do OHS



Fonte: Próprio autor

A Figura D-3 apresenta o gráfico da energia potencial de um OHS. Para traçar o gráfico da energia, foi utilizado o exemplo de um corpo preso em uma mola, que tem seu ponto de equilíbrio em $x = 0$ e é esticada até o ponto $+A$. Ao soltar o corpo, a mola oscila entre os pontos $-A$ e $+A$. Esse sistema pode ser descrito pela equação

$$\frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2, \quad (19)$$

onde a energia potencial é máxima em $-A$ e $+A$, e a energia cinética tem seu maior valor em $x = 0$.

Até o momento foram demonstrados exemplos de casos em que um corpo oscila de forma harmônica simples, onde é possível observar a harmonia das medidas, ou seja, a simetria. É verdadeiro por tanto que ao substituir x por $-x$ (dois pontos equivalentes, simétricos) na equação de energia potencial, nada iria mudar. Agora pensamos: o que ocorreria então se a simetria desse sistema fosse quebrada?

$$\frac{1}{2}\Delta v^2 \cong v\Delta v \quad (13)$$

O mesmo pode ser feito com a variação do deslocamento (Δx)

$$\begin{aligned} \Delta x &= (x + \Delta x) - x \\ \Delta x^2 &= (x + \Delta x)^2 - x^2 \\ \Delta x^2 &= (x^2 + 2x\Delta x + (\Delta x)^2) - x^2 \\ \Delta x^2 &= 2x\Delta x + (\Delta x)^2 \\ \Delta x^2 &\cong 2x\Delta x \\ \frac{1}{2}\Delta x^2 &\cong x\Delta x \end{aligned} \quad (14)$$

Substituindo as Eqs (13) e (14), na Eq (12), vamos obter,

$$\begin{aligned} m\frac{1}{2}\Delta v^2 &= -K\frac{1}{2}\Delta x^2 \\ m\frac{1}{2}(v^2 - v_0^2) &= -K\frac{1}{2}(x^2 - x_0^2) \\ (m\frac{1}{2}v^2 - m\frac{1}{2}v_0^2) &= -(m\frac{1}{2}x^2 - m\frac{1}{2}x_0^2) \\ \Delta(\frac{1}{2}mv^2) &= -\Delta(\frac{1}{2}kx^2) \\ \Delta(\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2) &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Vemos que a lei de conservação da energia é respeitada e que a energia total do sistema é

$$(\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2),$$

onde a energia cinética é descrita por

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2, \quad (16)$$

e a energia potencial

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2. \quad (17)$$

A energia total do sistema será o somatório da energia potencial e da energia cinética. Lembrando que a primeira aumenta, conforme a segunda diminui, e vice-versa, ou seja, a energia total do sistema é conservada.

$$E_t = E_c + E_p, \quad (18)$$

Energia Potencial do OA

Começamos agora a saga para tentar responder a questão que fechou o capítulo anterior. Para isso, tomamos como objeto de estudo uma mola deformada, constituída de um material com propriedade elástica não linear, que não satisfaz a lei de Hook. Aqui a mola irá seguir a lei de Hook deformada

$$F = -Kx - \lambda x^3, \quad (20)$$

onde a deformação é representada por “ $-\lambda x^3$ ”. Note que nesse caso, a deformação não será linear. Considerando $F = 0$, para estudar as posições de equilíbrio instantâneo, temos

$$\begin{aligned} (0 = -Kx - \lambda x^3)(-1), \\ Kx + \lambda x^3 = 0, \\ (K + \lambda x^2)x = 0, \end{aligned}$$

assim $x = 0$ ou

$$\begin{aligned} K + \lambda x^2 &= 0 \\ \lambda x^2 &= -K \\ x &= \sqrt{\frac{-K}{\lambda}}, \end{aligned} \quad (21)$$

$\frac{-K}{\lambda} \in \mathbb{R}$, logo $K < 0$ e $\lambda > 0$.

Como foi feito anteriormente partiremos da Eq 20, porém agora o objetivo é encontrarmos a equação da energia do sistema.

$$\begin{aligned} ma &= -Kx - \lambda x^3 \\ m \frac{\Delta v}{\Delta t} &= -Kx - \lambda x^3 \\ m\Delta v &= -Kx\Delta t - \lambda x^3\Delta t \\ mv\Delta v &= -Kxv\Delta t - \lambda x^3v\Delta t \\ mv\Delta v &= -Kx \frac{\Delta x}{\Delta t} \Delta t - \lambda x^3 \frac{\Delta x}{\Delta t} \Delta t \\ mv\Delta v &= -Kx\Delta x - \lambda x^3\Delta x. \end{aligned} \quad (22)$$

Já conhecemos os termos $v\Delta v$ e $x\Delta x$, como demonstrado nas Eqs (13) e (14), mas ainda é preciso desenvolvermos o termo x^3 , como segue,

$$\Delta x^4 = (x + \Delta x)^4 - x^4, \quad (23)$$

$$\Delta x^4 = x^4 + 4x^3\Delta x + 6x^2(\Delta x)^2 + 4x(\Delta x)^3 + (\Delta x)^4 - x^4.$$

Por serem muito pequenos, aqui podemos por conveniência descartamos os termos x^4 , $(\Delta x)^3$, $(\Delta x)^2$ e x^2 , restando

$$\begin{aligned} \Delta x^4 &\cong 4x^3\Delta x, \\ \frac{1}{4}\Delta x^4 &\cong x^3\Delta x. \end{aligned} \quad (24)$$

Substituindo na Eq (22) os termos encontrados em (13), (14) e (24), obtemos,

$$\frac{1}{2}m\Delta v^2 = -K\frac{1}{2}\Delta x^2 - \lambda\frac{1}{4}\Delta x^4. \quad (25)$$

Temos então a energia cinética do sistema

$$\Delta E_c = -K\frac{1}{2}\Delta x^2 - \lambda\frac{1}{4}\Delta x^4 \quad (26)$$

$$\Delta E_c + \Delta\left(\frac{1}{2}Kx^2 + \frac{1}{4}\lambda x^4\right) = 0.$$

A variação da energia é zero, respeitando a conservação da energia.

A energia total (E_t) será, portanto,

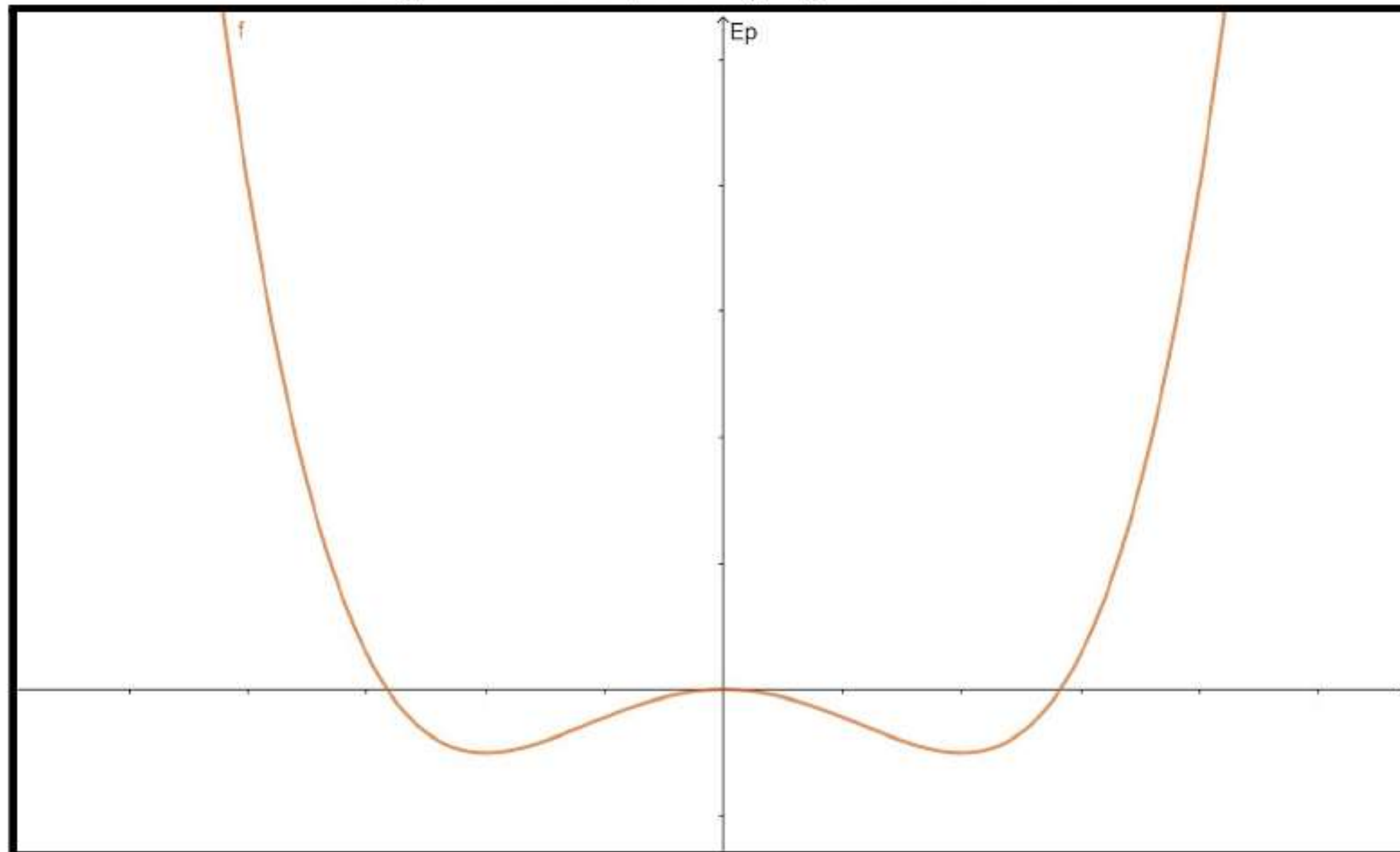
$$E_t = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}Kx^2 + \frac{1}{4}\lambda x^4, \quad (27)$$

onde a energia potencial (E_p)

$$E_p = \frac{1}{2}Kx^2 + \frac{1}{4}\lambda x^4 \quad [K < 0 \text{ e } \lambda > 0] \quad (28)$$

Com essa equação de energia potencial, encontramos um gráfico (Figura D-4) que revela simetria, porém, com uma análise mais rigorosa, podemos extrair dele, informações valiosas para respondermos a questão que está aberta.

Figura D-4 - Função energia potencial do OA

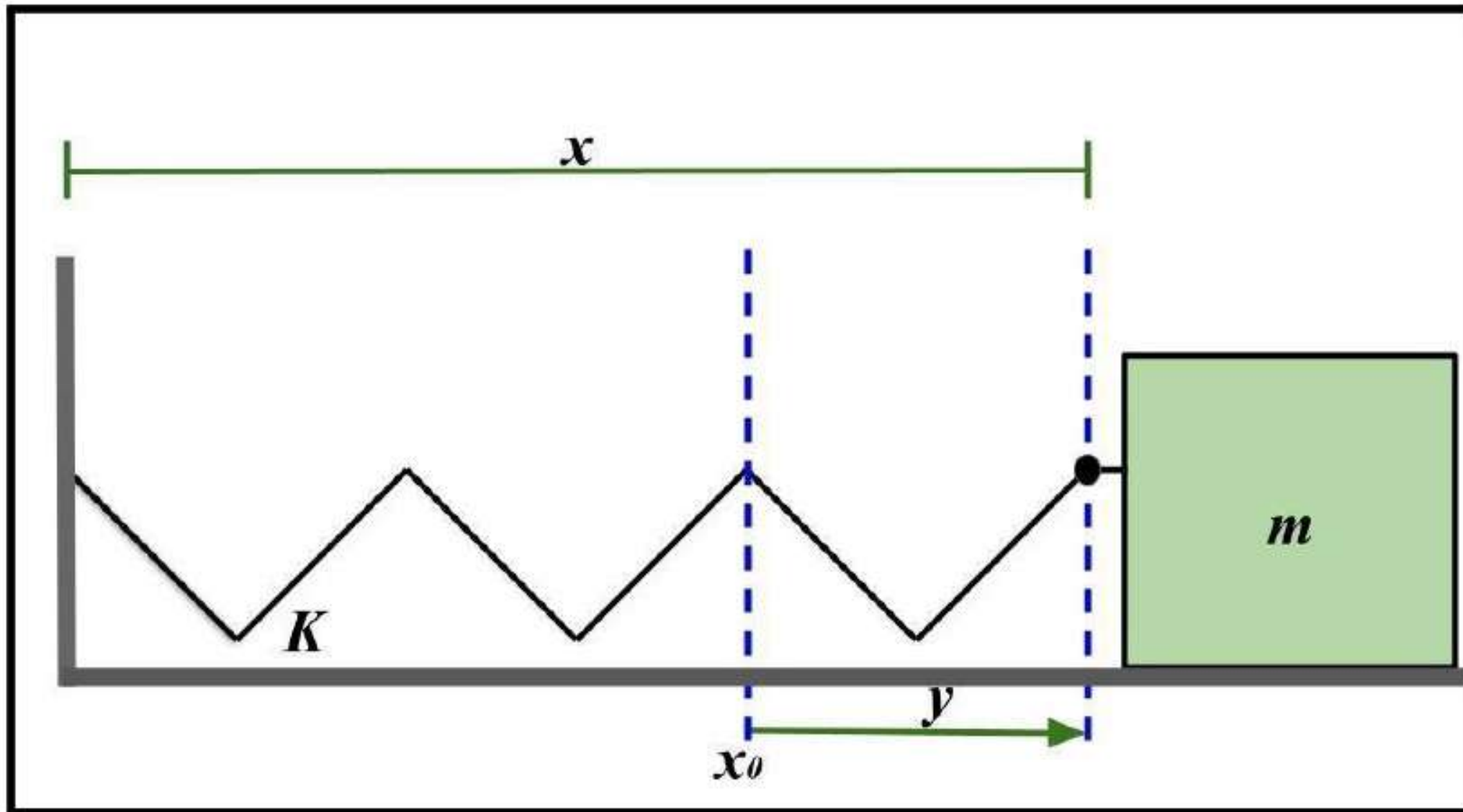


Fonte: Próprio autor

Um corpo oscila de forma estável, quando essa oscilação ocorre em torno do ponto de equilíbrio, sendo esse, o ponto de mínima energia do sistema, onde a força é zero. Assim, podemos concluir que, a origem do gráfico, não é o ponto de equilíbrio, já que temos ali, energia máxima local. Continuando o raciocínio, teremos nos pontos mínimos do gráfico, o ponto de equilíbrio, dessa maneira, o próprio sistema, ou quem o controla, terá que escolher um dos dois pontos mínimos, para oscilar em torno do mesmo, “esquecendo” o lado não adotado. Dessa forma a simetria é quebrada.

Para exemplificar, tomemos o ponto $x_0 = \sqrt{\frac{-K}{g}}$, como posição de equilíbrio, onde o sistema oscilará em torno. Sendo “ x ” a distância da massa até a origem, encontramos um y como coordenada que mede a diferença entre a posição da massa em um determinado instante e a posição da massa em estado de equilíbrio. Em outras palavras, as oscilações em torno de x_0 serão descritas por y .

Figura D-5 - Sistema bloco-mola com novo ponto de equilíbrio



Fonte: Próprio autor

Aqui partimos para encontrar a nova equação que descreve esse sistema apresentado na Figura D-5. Para isso, será necessário a inclusão da coordenada oscilatória, que nesse ponto, já não é x , mas sim x_0 . Isolando " x ",

$$y = x - x_0$$

$$x = x_0 + y, \quad (29)$$

e aplicando (29) na equação da energia total desse sistema, teremos:

$$\begin{aligned} E_t &= \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}K(x_0 + y)^2 + \frac{1}{4}\lambda(x_0 + y)^4 \\ E_t &= \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}K(x_0^2 + 2x_0y + y^2) + \frac{1}{4}\lambda(x_0^4 + x_0^3y + 6x_0^2y^2 + x_0y^3 + y^4) \\ E_t &= \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}Kx_0^2 + Kx_0y + \frac{1}{2}Ky^2 + \frac{1}{4}\lambda x_0^4 \end{aligned} \quad (30)$$

A energia será definida em relação a um nível de referência e, para descrevê-la, será importante tudo que a mede em função da posição. Sendo assim, o próximo passo será separar as constantes.

$$\begin{aligned} E_t &= \frac{1}{2}Kx_0^2 - \frac{1}{4}\lambda x_0^4 = \frac{1}{2}mv^2 + Kx_0y + \frac{1}{2}Ky^2 + \lambda x_0^3y + \frac{3}{2}\lambda x_0^2y^2 + \\ &\quad \frac{1}{4}\lambda x_0y^3 + \frac{1}{4}\lambda y^4 \\ E_t &= \frac{1}{2}Kx_0^2 - \frac{1}{4}\lambda x_0^4 = \frac{1}{2}mv^2 + x_0y(K + \lambda x_0^2) + \left(\frac{1}{2}K + \frac{3}{2}\lambda x_0^2\right)y^2 + \\ &\quad \frac{1}{4}\lambda x_0y^3 + \frac{1}{4}\lambda y^4, \end{aligned} \quad (31)$$

podemos simplificar um pouco mais, já que:

$$x_0 = \sqrt{\frac{-K}{\lambda}},$$

$$K + \lambda x_0^2 = K - \lambda \frac{K}{\lambda} = 1,$$

e ainda

$$\frac{1}{2}K + \frac{3}{2}\lambda x_0^2 = \frac{1}{2}K + \frac{3}{2}\lambda \frac{-K}{\lambda} = -K,$$

A nova energia total do sistema (E_{t2}), será descrita por

$$E_{t2} = E_t - \frac{1}{2}Kx_0^2 - \frac{1}{4}\lambda x_0^4 \quad (32)$$

substituindo na Eq. (31) temos a nova equação da energia total do sistema.

$$E_{t2} = \frac{1}{2}mv^2 + x_0 y - Ky^2 + \frac{1}{4}g\lambda y^3 + \frac{1}{4}\lambda y^4 \quad (33)$$

Note que, quando a oscilação ocorre em torno de $\frac{-k}{\lambda}$, podemos definir uma nova constante elástica: $-2k = 2\lambda x_0^2 > 0$, com isso, o significado físico da frequência é recuperado, pois,

$$\omega = \sqrt{\frac{-2k}{m}} = \sqrt{\frac{2\lambda x_0^2}{m}},$$

é real. Interpretamos este resultado como a recuperação da Lei de Hooke para o oscilador anarmônico, que só ocorre porque, com a quebra de simetria, o sistema físico oscila em torno de uma das duas posições de equilíbrio estável deslocadas da origem. Este resultado será retomado na subseção que segue, quando discutiremos como o caso anarmônico pode constituir um tratamento ilustrativo para o campo de Higgs, o qual realiza a quebra espontânea da simetria subjacente à Teoria Eletrofraca.

Agora, vamos trabalhar a analogia entre o oscilador anarmônico e o campo de Higgs. Isso é viabilizado porque o potencial clássico do campo de Higgs da Teoria Eletrofraca é regido por uma função energia potencial da mesma forma que a energia potencial do oscilador anarmônico, isto é, uma função com termos quadrático e quártico. A coordenada x , do oscilador passa a ser o campo de Higgs, ϕ . Neste sentido, podemos escrever:

$$F_H = -k\phi - \lambda\phi^3, \quad (34)$$

onde as posições de equilíbrio são $\phi = 0$ ou $\phi = \pm\sqrt{\frac{-k}{\lambda}}$.

Da mesma forma, podemos associar a energia potencial do OA, com a do campo de Higgs, fazendo a substituição das coordenadas,

$$E_H = \frac{1}{2}k\phi^2 + \frac{1}{4}\lambda\phi^4 \quad (35)$$

Como realizado na subseção anterior, a quebra de simetria ocorre quando os pontos de equilíbrio estável estão deslocados em relação à origem, estando, agora, à direita ou à esquerda. A mudança de ponto de equilíbrio corresponde ao que denominamos uma transição de fase do sistema. O sistema é essencialmente o mesmo: a massa e a mola, mas com os parâmetros em outra região de valores, de forma que o sistema apresenta uma física diferente daquela correspondente à fase (ou situação) em que a oscilação se dá em torno da origem, quando não ocorre quebra de simetria. Desta forma, precisamos reinterpretá-lo para o caso em que o campo não flutua em torno da configuração de campo trivial (campo nulo), de forma que o problema requer a introdução de uma nova coordenada física, como mostra a Eq 36.

$$\phi = \phi_0 + H \quad (36)$$

É importante destacar que, nesta situação, H representa o campo que corresponde às flutuações (oscilações) em torno da configuração de equilíbrio, ϕ_0 ; é ao campo H que nos referimos como campo de Higgs e a partícula a este associada é o bóson de Higgs. O ponto central na analogia oscilador anarmônico e o campo de Higgs consiste em substituir a coordenada oscilatória, y , em torno da posição de equilíbrio, x_0 , pelo campo de Higgs, H , que flutua em torno da configuração de mínima energia, ϕ_0 . Seguindo com o paralelo entre o oscilador anarmônico e o campo de Higgs, destacamos que o termo em y^2 na expressão da energia dada pela Eq (31), cujo coeficiente é

$$\frac{1}{2}K + \frac{3}{2}\lambda x_0^2 = \lambda x_0^2 + \frac{1}{2}2\lambda x_0^2, \quad (37)$$

corresponde à massa do bóson de Higgs segundo a relação abaixo:

$$m_H^2 = 2\lambda\phi_0^2 = -2K. \quad (38)$$

Lembramos aqui a relação $K = -\lambda x_0^2$ e que, na versão do campo de Higgs, y se torna H e x_0 é substituído ϕ_0 . O fator 2 na expressão acima aparece porque a forma canônica do termo de massa de um campo escalar real, como é o campo H , tem a forma $\frac{1}{2}m^2 H^2$.

Aqui, cabe um comentário oportuno, já que se trata de um ponto nevrálgico, e ainda em aberto, da Teoria Eletrofraca; na verdade, do Modelo-Padrão. O parâmetro de restauração, k , é, na verdade, a menos do fator (-2) , a própria massa do bóson de Higgs, como fica explícito na equação acima para m_H^2 . A justa crítica que se faz é que a massa do bóson de Higgs não é um subproduto do mecanismo de Higgs, ou seja, não é gerada pela dinâmica do sistema; ao contrário, é introduzida de forma ad-hoc ao se formular o modelo, é um “input”. Em outras palavras, esta massa já está presente ao se construir o modelo, quando se propõe a expressão da energia potencial.

Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

Polo 15 - IFRJ/UFF

Volta Redonda
Fevereiro de 2022

REFERÊNCIAS

ALVES, Gilvan; CARUSO, Francisco; SANTORO, Alberto; DA MOTA, Hélio. O Mundo das Partículas de Hoje e de Ontem. 2. ed. São Paulo-SP: Livraria da Física, 2012. 166 p. v. 1. ISBN 8578611578.

ANDERSON, Terry; SHATTUCK, Julie. Design-based research: A decade of progress in education research?. *Educational researcher*, v. 41, n. 1, p. 16-25, 2012.

ANDRADE, Marcelo. O Uso da Ferramenta Modellus no Ensino de Física: uma abordagem a luz da Teoria dos Campos Conceituais. *Próximas descobertas na Física de Altas Energias*, Porto Alegre, RS, v. 18, ed. 1, p. 27-36, 2015.

ANGOTTI, JOSÉ ANDRÉ PERES. Ensino de Física com TDIC. Florianópolis: UFSC/EAD/CFM/CED, 2015.

ARAÚJO, Ives Solano; VEIT, Eliane Angela. Uma revisão da literatura sobre estudos relativos a tecnologias computacionais no ensino de Física. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 4, n. 3, 2004.

BALTHAZAR, WAGNER FRANKLIN; OLIVEIRA, ALEXANDRE LOPES DE. PARTICULAS ELEMENTARES NO ENSINO MEDIO: UMA ABORDAGEM A PARTIR DO LHC. São Paulo-SP: Livraria da Física, 2010. 88 p. v. 1. ISBN 9788578610609.

BAROJAS, J. (Ed.) Cooperative networks in physics education. New York: American Institute of Physics, 1988. (AIP Conference Proceedings, 173).

BEZERRA JR, Arandi Ginane et al. Videoanálise com o software livre Tracker no laboratório didático de Física: movimento parabólico e segunda lei de Newton. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, p. 469-490, 2012.

BINI, G. La pedagogia attivistica in Italia. Roma: Riuniti, 1971.

BRASIL, Portal MEC. Programa Nacional do Livro Didático para O Ensino Médio. 2014.

BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular (BNCC). Educação é a Base. Brasília, p. 558, 2018. Disponível em: <<http://basenacionalcomum.mec.gov.br>>. Acesso em 09 de fev. 2021.

BROWN, A. L. Design experiments: Theoretical and methodological challenges in creating complex interventions in classroom settings. *Journal of the Learning Sciences*, v. 2, n.2, p.141–178, 1992. Disponível em:< <http://www.cs.uml.edu/ecg/projects/cricketscience/pdf/brown-1992-design-experiments.pdf>>. Acesso em: 06 ago. 2020.

BUFFON, LUIZ OTAVIO. O Uso de um software de simulações para a aprendizagem de circuitos elétricos simples: uma abordagem a partir do ensino por investigação. *Revista do Professor de Física*• Brasília, v. 2, n. 2, 2018.

CARUSO, F.; FREITAS, N. Física moderna no ensino médio: o espaço-tempo de Einstein em tirinhas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. v. 26, n.2, 2009, p. 355-366.

CARUSO, Francisco; OGURI, Vitor; SANTORO, Alberto. *Textos de Que São Quarks, Glúons, Bósons de Higgs, Buracos Negros e Outras Coisas Estranhas?* Apoio ao Professor de Física. 2. ed. São Paulo-SP. Livraria da Física, 2012. 209 p. v. 1. ISBN 8578611543.

CARUSO, Francisco; SANTORO, Alberto. *Do Átomo Grego À Física das Interações Fundamentais*. 3. ed. São Paulo-SP: Livraria da Física, 2012. 195 p. v. 1. ISBN 9788578611552.

CARVALHO, Sílvia HM; ZANETIC, João. Ciência e arte, razão e imaginação: complementos necessários à compreensão da física moderna. *ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA*, v. 9, 2004.

CASTRO, A. D. E. A. *Didática para a escola de 1º e 2º graus*. São Paulo: Pioneira, 1976.

CORDEIRO, Antônio Luciano; DE OLIVEIRA RODRIGUES, Francisco Leandro. O software tracker: uma ferramenta educacional para potencializar o ensino de física. *Essentia-Revista de Cultura, Ciência e Tecnologia da UVA*, v. 20, n. 2, 2019.

COSTA, André Gustavo Cruz da. *Dissertação. Como ensinar a Física Moderna no ensino médio: Discussões e sugestões*. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2004

DE ANDRADE, M. E. *Simulação e modelagem computacional com o software Modellus: aplicações práticas para o ensino de física*. São Paulo: Livraria da Física, 2016.

DE CAMPOS VALADARES, Eduardo; MOREIRA, Alysson Magalhães. *Ensinando física moderna no segundo grau: efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro*. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 15, n. 2, p. 121-135, 1998.

DE SOUZA FILHO, Geraldo Felipe. *Simuladores computacionais para o ensino de física básica: uma discussão sobre produção e uso*. 2010.

Denardin, Luciano; Da Rocha, João Bernardes Filho; Harres, João Batista Siqueira. *ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA*, XVII., 2018, Campos do Jordão-SP. A abordagem da física moderna e contemporânea por professores após a interação com cientistas de um centro de pesquisa avançada. Campos do Jordão-SP, 2018.

DOMINGUINI, Lucas. Física moderna no Ensino Médio: com a palavra os autores dos livros didáticos do PNLEM. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 34, 2012.

EASTERDAY, Matthew W.; LEWIS, Daniel Rees; GERBER, Elizabeth M. Design-based research process: Problems, phases, and applications, 2014.

ESQUEMBRE, F. Computers in physics education. Computer Physics Communications. V.147, p. 13-18, ago.2002.

FEYNMAN, R. P. Deve Ser Brincadeira, Sr. Feynman! Brasília: Editora Universidade de Brasília; São Paulo: Imprensa Oficial do Estado, 2000.

FINITUDE da vida. Saber Sistemico, jul 2021. Disponível em: <https://sabersistemico.com.br/constelacoes-sistemicas/finitude-da-vida>. Acesso em: 14 ago. 2021.

FONTES, ADRIANA DA SILVA et al. A UTILIZAÇÃO DAS TDIC COMO FERRAMENTA POTENCIALIZADORA NO ENSINO DE QUEDA LIVRE. Ensino, Saúde e Ambiente, v. 12, n. 3, 2019.

GARCIA, Luiz Cláudio; COSTA, Márcia da. A inserção de física moderna no ensino médio por meios de práticas experimentais e aplicações na astronomia. CADERNOS, P. D. E. Os desafios da escola pública paranaense na perspectiva do professor PDE. 2014.

GODOY, Arlida Schmidt. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. Revista de administração de empresas, v. 35, n. 2, p. 57-63, 1995.

GONÇALVES, Joerbed. O Percurso Epistemológico dos Saberes e a Equivalência Massa-Energia. Orientador: Mauricio Pietrocola Pinto de Oliveira. 202 p. Tese (Doutorado em Educação) - Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2014.

GONÇALVES, Joerbed. O uso do Modellus aplicado ao ensino de física: Uma proposta didática para o ensino de oscilações harmônicas. Orientador: Edson Firmino Viana de Carvalho. Coorientadora: Karla Cristina Silva Sousa. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) - Universidade Federal do Maranhão, [S. l.], 2018.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Mental, physical, and mathematical models in the teaching and learning of physics. Science Education, New York, v. 86, n. 1, p. 106-121, Jan. 2002.

HEIDEMANN, Leonardo Albuquerque; ARAUJO, Ives Solano; VEIT, Eliane Angela. Atividades experimentais e atividades baseadas em simulações computacionais: quais os principais fatores que influenciam a decisão de professores de conduzir ou não essas práticas em suas aulas?. Revista electrónica de investigación en educación en ciencias, v. 9, n. 2, p. 42-57, 2014.

HERNÁNDEZ, M. I. Desenvolupament iteratiu d'una seqüència d'ensenyament i aprenentatge sobre Propietats Acústiques dels Materials. Tese de Doutorado. Universitat Autònoma de Barcelona, Espanha, 2012.

HIGGS, Peter W. Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons. *Physical Review Letters*, Edimburgo-SLD, v. 13, n. 16, p. 508-509, 19 out. 1964. Disponível em: <<https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.13.508>>. Acesso em: 24 jun. 2020.

IBGE, Censo. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. 2000.

KESSLER, Sérgio Luís et al. O ensino da física moderna no ensino médio: necessidades e dificuldades no oeste catarinense. 2008.

KNEUBI, Fabiana; PIETROCOLA, Maurício. A Pesquisa Baseada em Design: visão geral e contribuições para o ensino de ciências. *Investigações em Ensino de Ciências*, São Paulo-SP, ano 2017, v. 22, n. 2, p. 01-16. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22600/1518-8795.ienci2017v22n2p01>. Acesso em: 26 jan. 2021.

LARA, A. L. et al. O PIBID, o ENPEC e os trabalhos sobre tecnologias de informação e comunicação no ensino de ciências: algumas reflexões e possíveis relações. VIII Encontro Nacional de Pesquisadores em Ensino de Ciências, 2011.

LIJNSE, P. (2010). Methodological aspects of design research in physics education. In Kortland, K., & Klaassen, K. (Orgs.). *Designing Theory-Based Teaching-Learning Sequences for Science Education* (pp.144-155). Utrecht: CDBeta Press.

MACHADO, Alan; COSTA, Leonardo. A utilização do software MODELLUS no ensino da Física. *Interagir: pensando a extensão*, Rio de Janeiro, RJ, v. 14, p. 45-50, 2009.

MAIA, Marcilon Chaves. Uma abordagem do modelo padrão da física de partículas acessível a alunos do ensino médio. 2011. 70 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Ciências e Matemática) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

MARETI, Lucas. Sequência Didática: Uma alternativa para o ensino de acústica no Ensino Médio. Orientador: Ana Lúcia Brandl. 2017. 145 p. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2017. Disponível em: <https://www.mnpefsorocaba.ufscar.br/produtos/produtos-e-dissertacoes/dissertacao-lucas-mazeti>. Acesso em: 2 fev. 2021.

MARTINEZ RAMIREZ, Elvira; FLOREZ GARCIA, Mercedes; CARBONELL PADRINO, Maria Victoria. Aplicación de nuevas tecnologías para la impartición del curso cero en la ETSI Agrónomos. 2008.

MCKENNEY, Susan; REEVES, Thomas C. Educational design research. In: *Handbook of research on educational communications and technology*. Springer, New York, NY, 2014. p. 3. Disponível em: <https://www.academia.edu/21629553/Educational_Design_Research>. Acesso em: 09 ago. 2020.

MEDEIROS, Alexandre; MEDEIROS, Cleide Farias de. Possibilidades e limitações das simulações computacionais no ensino da Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 24, n. 2, p. 77-86, 2002.

MEHÉUT, M. and PSILLOS, D. Teaching-Learning Sequence: aims and tools for science education research. *International Journal of Education Science*, v.26, n.5, p. 517, 2004.

MEHÉUT, M. Teaching-Learning Sequences tools for learning and/or research. In: *Research and Quality of Science Education* (Eds. Kerst Boersma, Martin Goedhart, Onno de Jong e Harrie Eijlhof). Holanda: Springer, pp. 196-197, 2005.

MIRANDA, Márcio Santos; ARANTES, A. Riposati; STUDART, Nelson. Objetos de aprendizagem no ensino de física: usando simulações do PhET. *Física na Escola*, v. 11, n. 1, p. 27-31, 2010.

MONICO, Kleidiani. Dualidade Onda Partícula: Uma Sequência Didática Para o Ensino Médio Com Foco em Atividades Investigativas. Orientador: Flávio Gimenes Alvarenga. 2018. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

MONTEIRO, Maria Amélia; NARDI, Roberto; BASTOS FILHO, Jenner Barretto. A sistemática incompreensão da teoria quântica e as dificuldades dos professores na introdução da física moderna e contemporânea no ensino médio. *Ciência & Educação* (Bauru), v. 15, p. 557-580, 2009.

MOREIRA, M.A. O Bóson de Higgs na mídia, na Física e no Ensino da Física. *Textos de Apoio ao Professor de Física*, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, v. 28, n. 2, 2017. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/public/tapf/tapf_v28n2_moreira.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2020.

MOREIRA, Marco Antonio. Uma análise crítica do ensino de Física. *Estudos avançados*, v. 32, n. 94, p. 74-76, 2018.

MORIM, Edilúcio. Próximas descobertas na Física de Altas Energias. Orientador: Francisco Eulário Alves Dos Santos. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) - Universidade Federal do Acre, Rio Branco, AC, 2019.

MUNIZ, D. S.; DA SILVA, A. J.; SILVA, J. P. C.; NASCIMENTO, D. O.. Proposta metodológica sobre o efeito fotoelétrico para o ensino médio. *Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente-FAEMA, Ariquemes*, v. 9, n. 2, p. 841-845, jul.-dez. 2018.

O BÓSON de Higgs EXPLICADO. Gravação de Pedro Loss. Youtube: *Ciência Todo Dia*, 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=gCaTJYhA4Ik>. Acesso em: 13 jun. 2021.

OGURI, Vitor; SANTORO, Alberto; ABREU, Luciano. Próximas descobertas na Física de Altas Energias. 1. ed. São Paulo-SP: Livraria da Física, 2018. 284 p. v. 1. ISBN 8578615727.

OLIVEIRA, Fabio Ferreira de; VIANNA, Deise Miranda; GERBASSI, Reuber Scofano. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, p. 447-454, 2007.

OLIVEIRA, Jeane Silveira de; TOLEDO, Eduardo Martins. *Propostas de Atividades usando as simulações do Phet Colorado*. 2019.

OLIVEIRA, M. M. *Sequência Didática Interativa no processo de formação de Ciências*. Petrópolis: Vozes, 2013.

OSTERMANN, F. e MOREIRA, M. A. Uma Revisão Bibliográfica sobre a Área de pesquisa Física Moderna e contemporânea no Ensino Médio; *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, 2000.

OSTERMANN, F. e MOREIRA, M. A. Uma Revisão Bibliográfica sobre a Área de Pesquisa Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio; *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, 2000.

PASTANA, Claudionor de Oliveira. *A utilização do software Modellus para o ensino de Funções Trigonométricas por meio do Movimento Harmônico Simples*. 2017. Dissertação de Mestrado.

PERRENOUD, P. *Dez novas competências para ensinar*. Porto Alegre: Artes Médicas Sul, 2000.

PESSANHA, Márlon Caetano Ramos. *Estrutura da matéria na educação secundária: obstáculos de aprendizagem e o uso de simulações computacionais*. 2014. Tese (Doutorado em Ensino de Física) - Ensino de Ciências (Física, Química e Biologia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. doi:10.11606/T.81.2014.tde-28042014-202005. Acesso em: 20 jan 2021.

PETERSON, R. & HERRINGTON, J. (2005). The state of the art of design-based research. In *The World Conference on E-Learning in Corporate, Government, Healthcare, and Higher Education*, Vancouver, Canada. Disponível em: <<http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1060&context=edupapers>>. Acesso em: 06 de ago. 2020.

PLEITEZ, V. A física de partículas elementares e o Prêmio Nobel de Física 2008. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, p. 4301.1-4301.5, 2008.

PIMENTA, Jean; BELUSSI, Lucas; NATTI, Érica; NATTI, Paulo. O bóson de Higgs. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo-SP, ano 2306, v. 35, n. 2, p. 1-14, 24 abr. 2013. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/mStXCZr59JndVyQMMRWdq9p/abstract/?lang=en>>. Acesso em: 30 jun. 2020.

PORTELLA, Ben-hur Martins et al. Uma proposta de objeto educacional digital para o ensino de cinemática. 2019.

REEVES, T. Design research from a technology perspective. In J. V. D. Akker, K. Gravemeijer, S. McKenney & N. Nieveen (Eds.), *Educational design research*. p. 52–66. New York: Routledge, 2006.

REEVES, T.C., HERRINGTON, J. & Oliver, R. Design Research: A Socially Responsible Approach to Instructional Technology Research in Higher Education. *Journal of Computing in Higher Education*, v. 16. n.2, p. 96-115, 2005. Disponível em: <https://www.learntechlib.org/p/67987/>. Acesso em 06 ago. 2020.

RODRIGUES, Gizella; FERREIRA, Helaine. Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, VIII., 2011, Campinas-SP. Elaboração e análise de Sequências de Ensino Aprendizagem sobre os estados da matéria. Campinas-SP, 2011. Disponível em: http://abrapecnet.org.br/atas_enpec/viii/enpec/resumos/R0234-2.pdf. Acesso em: 18 jan. 2021.

SÁ, A.; BALTHAZAR, W. F.; HELAYËL-NETO, J. A. Quebra espontânea de simetria e mecanismo de Higgs: uma abordagem a partir dos osciladores harmônico simples e anarmônico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 43, 2021.

SANCHO, Juana M. Para Uma Tecnologia Educacional. Porto alegre: Artmed, 1998, p. 40.

SANTOS, A.M.; CARVALHO, P.S. Abordagem do Movimento Relativo Através do Estudo do Movimento Parabólico com Uso do Software Tracker. *Revista do Professor de Física*, Brasília, v. 5, n. 1, p. 40-48, 2021.

SILVA, Daniele; PINHEIRO, Rafael. Análise de Algumas Publicações de Física Moderna no Contexto da Educação Básica. *Revista Saberes Docentes*, Juína-MT, v. 5, n. 10, p. 56, 10 jul. 2020.

SILVA, Josiel R.; GERMANO, José SE; MARIANO, Roni S. SimQuest-ferramenta de modelagem computacional para o ensino de física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 33, p. 01-088, 2011.

SOUZA, Denis. Construção de um Website sobre a física dos neutrinos para alunos do ensino médio. Orientador: José Kenichi Mizukoshi. 2020. 123 p. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Universidade Federal do ABC, Santo André-SP, 2020.

SOUZA, M , NASCIMENTO, A , COSTA, D e FERREIRA, O. Jogo de Física de partículas: Descobrimo o bóson de Higgs. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo-SP, v. 41, n. 2, p. 1-14, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/zdFcZNBfKx4x4gVbrL7wnxR/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 3 set. 2020.

TED-ED: Lincoln Don Higgs Boson. Gravação de Don Lincoln. Youtube: Powerhouse Animation Studios, ca. 2013. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=gCaTJYhA4Ik>. Acesso em: 13 jun. 2021.

TONIATO, D. J.; FERREIRA, B. L. ; FERRACIOLI, L.. Tecnologia no Ensino de Física: Uma Revisão do XVI Simpósio Nacional de Ensino De Física. In: EPEF, X, 2006, Londrina,PR. . Pôsteres, P008-F8.

VALADARES, E. C., MOREIRA, A. M. Ensinando física moderna no segundo grau: efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 15, n. 2, p. 121-135, ago. 1998.

VAN DEN AKKER, J. Principles and Methods of Development Research. Design Approaches and Tools in Education and Training. Springer, Dordrecht. v. 1. p. 1-14, 1999. Disponível em: < https://doi.org/10.1007/978-94-011-4255-7_1>. Acesso em: 07 ago 2020.

WANG, Feng; HANNAFIN, Michael J. Design-based research and technology-enhanced learning environments. *Educational technology research and development*, v. 53, n. 4, p. 5-23, 2005.

XAVIER, Márcio Câmara; TEIXEIRA, Célia Regina; SAVETI, Bianca Priscila. Aplicação das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) na educação e os desafios do educador. *Dialogia*, v. 9, n. 1, p. 105-116, 2010.

XIMENES, Samuel. Matéria escura no ensino médio. Orientador: Carlos Eduardo Magalhães de Aguiar. 2016. 85 p. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2016.

ZABALA, Antoni. A Prática Educativa: Como ensinar. Tradução de Ernani F. da F. Rosa. Porto Alegre: ArtMed, 1998.

ZABALA, Antoni; ARNAU, Laia. Como aprender e ensinar competências. Artmed: Porto Alegre, 2010.

ZABALZA, M.A. (2004). Diários de aula: um instrumento de pesquisa e desenvolvimento profissional. Porto Alegre: Artmed.