

Vitruvian Cogitationes - RVC

UMA UEPS PARA A FÍSICA DE NEUTRINOS APLICADA EM TEMPOS DE PANDEMIA

UNA UEPS PARA LA FÍSICA DE NEUTRINOS APLICADA EN TIEMPOS DE PANDEMIA

A PSTU FOR NEUTRINO PHYSICS APPLIED IN TIMES OF PANDEMIC

Francisco Elias Gomes

EEFM Dionysio Costa – Mutum (MG) – EEFMDC;
escola.75558.pedagogico@educacao.mg.gov.br

 <https://orcid.org/0009-0007-7357-4848>

Flávio Gimenes Alvarenga

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES; flavio.alvarenga@ufes.br

 <https://orcid.org/0000-0002-7579-9561>

Resumo: Neste artigo, é apresentado um produto educacional elaborado para o ensino da física de neutrinos no formato de uma Sequência Didática (SD), inspirada nas Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS), que são sequências didáticas baseadas nos pressupostos da Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) de David Ausubel. O objetivo do artigo é trazer temas de Física Contemporânea, especialmente Neutrinos, para o ensino médio. Esperamos que os alunos tenham uma boa compreensão do que são as partículas fundamentais, especialmente os neutrinos. A metodologia utilizada foi a metodologia ativa estruturada em uma UEPS. O produto educacional foi aplicado por meio de aulas remotas no período da pandemia de coronavírus (covid-19), em uma turma do terceiro ano do ensino médio de uma escola pública no município de Mutum-MG. A estruturação do produto educacional será detalhada e os principais resultados de sua aplicação serão discutidos.

Palavras-chave: Física de partículas; Aprendizagem significativa; Unidades de Ensino Potencialmente Significativas.

Resumen: En este artículo se presenta un producto educativo diseñado para la enseñanza de la física de neutrinos en el formato de una Secuencia Didáctica (SD), inspirada en las Unidades Didácticas Potencialmente Significativas (UEPS), que son secuencias didácticas basadas en los supuestos de la Teoría del Aprendizaje Significativo (TAS) de David Ausubel. El objetivo del artículo es acercar temas de Física Contemporánea, especialmente Neutrinos, al nivel secundario. Esperamos que los estudiantes comprendan bien qué son las partículas fundamentales, especialmente los neutrinos. La metodología utilizada fue la metodología

activa estruturada em uma UEPS. El producto educativo fue aplicado a través de clases remotas durante el período de la pandemia de coronavirus (covid-19), em una clase de tercer año de secundaria de una escuela pública de la ciudad de Mutum-MG. Se detallará la estructuración del producto educativo y se discutirán los principales resultados de su aplicación.

Palabras-clave: Partículas físicas; Aprendizaje significativo; Unidades Didácticas Potencialmente Significativas.

Abstract: This article presents an educational product developed for teaching neutrino physics in the format of a Didactic Sequence (DS) inspired by the Potentially Significant Teaching Units (PSTUs), which are didactic sequences based the assumptions of David Ausubel's Theory of Meaningful Learning (TML). The objective of the article is to bring Contemporary Physics topics, especially Neutrinos, to high school. We hope that students have a good understanding of what fundamental particles are, especially neutrinos. The methodology used was the active methodology structured in a UEPS. The educational product was implemented through remote classes during the COVID-19 pandemic during the period of the covid-19 coronavirus pandemic in a third-year high school class at a public school in the municipality of Mutum-MG. The structure of the educational product will be detailed and the main results of its implementation will be discussed.

Keywords: Particle physics; Meaningful learning; Potentially Significant Teaching Units.

1 INTRODUÇÃO

Neste artigo, descrevemos os resultados da aplicação de um produto educacional intitulado “Uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa para a física de neutrinos” em uma turma do terceiro ano do ensino médio de uma escola pública, localizada na cidade mineira de Mutum. O produto educacional foi desenvolvido associado a uma dissertação de mestrado profissional (Gomes, 2022).

As aulas foram realizadas no segundo semestre do ano de 2020, no formato remoto, em função da pandemia de coronavírus covid-19, para uma turma de 20 alunos.

As dificuldades observadas em estudantes do ensino médio, no que diz respeito à compreensão de conceitos de física, assim como seus modelos teóricos e os meios matemáticos subjacentes, fazem com que a transformação das práticas pedagógicas torne-se uma necessidade. Neste contexto, concebemos, desenvolvemos, aplicamos e avaliamos uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) para ensinar a física de neutrinos. A dinâmica pedagógica da UEPS foi elaborada com o objetivo de levar aos estudantes da turma referida o ensino de conceitos sobre o Modelo Padrão de Física de Partículas (MPFP), destacando os neutrinos.

Esses estudantes se encontram imersos em um ambiente bastante tecnológico e têm uma grande dificuldade para compreender e manipular a maioria dos conceitos abstratos tão contextualizados em todos os campos da física e em suas vivências sociais ou não. Todavia, a maior dificuldade é utilizar meios matemáticos que formam as bases elementares dos diferentes modelos matemáticos, dos mais simples aos mais bem elaborados.

As práticas pedagógicas devem ser diferenciadas e inovadoras, tendo como meta incentivar os estudantes a buscarem soluções em um mundo cada vez mais interdisciplinar; a

serem os principais atores de seu processo de ensino-aprendizagem; a aprenderem via projetos ou via soluções de problemas, isto é, sem decorar conceitos e fórmulas; a desenvolverem habilidades tais como a troca de experiências e soluções em equipe; e a potencializarem o pensamento crítico e o poder de observação.

Em vários anos de docência, percebemos que na maioria das vezes os estudantes ainda não despertaram para os mistérios desse mundo simplesmente porque não foram motivados para isso (Bousquet *et al.*, 2017). Podemos observar na fala de Feynman (2008), a importância do ensino por projetos onde os estudantes podem interagir aplicando conhecimentos adquiridos durante sua formação: o melhor ensino exige uma situação em que o discente discute ideias, pensa sobre as coisas e dialoga sobre elas.

Precisamos repensar sobre o que e como ensinamos e sobre o que o estudante é capaz de fazer com o que aprendeu. Nesse sentido, elaboramos um produto educacional pensado com o objetivo geral de facilitar o ensino de física contemporânea no ensino médio; e com o objetivo específico de ensinar física de neutrinos via uma UEPS sobre o Modelo Padrão de Física das Partículas, fundamentada nos pressupostos da Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) (Moreira, 2012).

Ao decidir pela inovação e/ou mudança radical de sua prática pedagógica escolar, o Professor tem a chance de formar estudantes com capacidade cognitiva para questionar, criticar, compreender e melhorar de maneira progressiva o nosso mundo. Para isso, precisamos mudar e inovar em nossa percepção do ensinar, respeitando sempre a grade curricular do ensino tradicional que está bastante presente na maioria das escolas brasileiras: desde o ensino infantil, passando pelos ensinos fundamental, médio e graduação, até as pós-graduações.

É fácil verificar que, em grande parte das escolas do ensino básico, os estudantes não aprendem de forma significativa os conteúdos de física, mas simplesmente durante as aulas os ouvem e/ou os copiam, decorando-os e assim esquecendo-os rapidamente. Por quê? Porque se trata de uma aprendizagem mecânica, que não condiz com o papel preponderante da educação, que é formar alunos críticos capazes de questionar a “verdade” atual; de propor inovações ou novos conhecimentos para melhorar seu ambiente de convívio social. É importante mencionar que os processos de aprendizagem tradicional e os processos inovadores, no caso a aprendizagem significativa, devem coexistir.

De forma resumida, nosso produto educacional “*Uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa para a Física de neutrinos*” foi elaborado na forma de uma sequência didática (SD) sustentada por uma transcrição da Aprendizagem Significativa de Ausubel, proposta por Moreira, com o emprego de uma “Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS)” (Moreira, 2011), que tem como principal mecanismo de ação o aumento progressivo da profundidade dos conteúdos. Sua dinâmica orgânica de funcionamento é a metodologia ativa “*Ensino sob medida*” exposta no artigo de Araújo e Mazur (2013). Dessa forma, ao aplicarmos nosso produto, pudemos constatar, por meio da coleta de dados, uma mudança progressiva no emaranhado e complexo sistema cognitivo dos estudantes submetidos à nossa pesquisa no que diz respeito à compreensão da composição do Universo observável e da relação intrínseca dessas partículas com as quatro interações fundamentais da natureza.

2 PERCURSO METODOLÓGICO

2.1 A FÍSICA DE PARTÍCULAS

O objetivo da física das partículas é estudar os constituintes fundamentais (sem estrutura interna ou indivisível) da matéria, suas propriedades e suas interações. Para isso, foi elaborado o Modelo Padrão de Física das Partículas (Moreira, 2009, Caruso; Oguri; Santori, 2012, Soares; Belich Júnior; Helayel-Neto, 2018).

Até onde sabemos, as partículas fundamentais são formadas por seis quarks (up, down, strange, charme, bottom e top) e três léptons carregados (elétron, múon e tau), com seus três neutrinos associados.

O neutrino é um férmion (partícula elementar de spin igual a 1/2) sensível apenas à interação fraca e gravitacional. O neutrino recebeu esse nome porque é eletricamente neutro e sua massa, durante muito tempo foi considerada como nula. Essa massa de repouso é menor que aquelas das outras partículas elementares conhecidas, exceto aquelas sem massa. A força fraca tem um alcance muito pequeno e a interação gravitacional tem uma intensidade bastante reduzida, conferindo aos neutrinos a capacidade de atravessar a matéria normal quase sem serem detectados.

Os neutrinos podem ser produzidos por várias desintegrações radioativas, tais como a desintegração beta de núcleos atômicos ou de hádrons; reações nucleares naturais como as que ocorrem no interior das estrelas; reações nucleares artificiais em reatores nucleares, bombas nucleares ou aceleradores de partículas; durante o fenômeno da supernova; durante o spin-down¹ de uma estrela de nêutrons; e durante a colisão de raios cósmicos ou feixes de partículas com os átomos. A maior parte dos neutrinos observados ao redor da Terra tem origem em reações termonucleares no interior do Sol. Um fluxo de $6,5 \times 10^9$ neutrinos solares por segundo e por centímetro quadrado colide com a superfície da Terra de forma ininterrupta.

As principais questões em aberto quanto à natureza essencial dos neutrinos são a descoberta do valor absoluto da massa dos três sabores de neutrinos; o nível de violação CP (Carga Paridade) na área leptônica; e as evidências na física que poderiam quebrar a simetria do modelo padrão como a dupla desintegração beta sem neutrinos.

Até recentemente, os neutrinos eram considerados partículas sem massa, até a descoberta do fenômeno da oscilação, provando assim que os neutrinos têm massa. Essa descoberta do fenômeno da oscilação de neutrinos surge como uma resposta ao problema dos neutrinos solares², surgido no ano 2000. Apesar dos avanços teóricos e experimentais quanto à física de partículas, não conhecemos ainda as massas individuais dos neutrinos. Todavia, postula-se que as massas dos neutrinos sejam inferiores a $1,5 \times 10^{-37} \text{ Kg} \approx 0,086 \text{ MeV}/c^2$ (Apollonio *et al.*, 1999; De Kerret *et al.*, 2020; Fermilab, 2023).

¹ É uma propriedade quântica do spin. A descoberta desse fenômeno ocorreu em 1922 no Instituto de Física Teórica de Frankfurt (Alemanha) e realizada pelos físicos Otto Stern e Walther Gerlach.

² Problema relacionado à diferença entre teoria e observação quanto à quantidade de neutrinos produzidos pelo Sol (neutrinos eletrônicos) e aqueles que chegavam à superfície terrestre, isto é, havia um déficit de neutrinos. Experimentalmente está demonstrado que esse déficit é devido à oscilação dos neutrinos. Isto é, durante sua viagem até a Terra os Neutrinos oscilam (mudam de sabor) espontaneamente, passando de neutrino eletrônico a neutrinos muônico ou tauônico e vice-versa.

2.2 A SEQUÊNCIA DIDÁTICA

A seguir, apresentamos as etapas da UEPS que utilizamos na construção da SD, cuja característica principal, em nosso entendimento, foi o aumento progressivo da complexidade dos conteúdos das Tarefas de Leitura e das atividades propostas.

O Quadro 1 mostra um resumo da proposta de uma SD de seis aulas, na forma de UEPS para o ensino de Física de neutrinos.

Quadro 1 - SD na forma de UEPS

Aula 1	Definição do tópico específico a ser abordado. Tema: Física dos neutrinos.
Aula 2	Criar/propor situações que levem os estudantes a manifestar seus conhecimentos prévios escritos aceitos ou não aceitos no contexto do assunto abordado.
Aula 3	Propor situações-problema, em nível bem introdutório, levando em conta o conhecimento prévio do aluno.
Aula 4	Aprofundando o conhecimento.
Aula 5	Avaliação somativa em sala de aula.
Aula 6	Observando a diferenciação progressiva via aula dialogada interativa e entrega aos estudantes de um questionário de opinião.

Fonte: Adaptado de Moreira (2012).

O Quadro 2, a seguir, mostra o encadeamento das atividades da SD para o ensino de física de neutrinos.

Quadro 2 – Atividades da SD (55 minutos/aula)

Aula 1	Nessa aula interagimos verbalmente com a turma, promovendo uma discussão em sala de aula sobre qual a natureza da matéria. Com os dados resultantes dessa interação oral elaboramos um questionário diagnóstico.
Aula 2	Ao longo dessa aula, aplicamos o questionário diagnóstico e também escolhemos algumas respostas desse questionário diagnóstico que têm o potencial para promover a socialização do conhecimento com troca de significados entre os estudantes. Após essa aula enviamos aos estudantes as Tarefas de Leitura, a saber, o Modelo Padrão da Física de Partículas (http://moreira.if.ufrgs.br/modelopadrao.pdf) e Partículas e Interações (http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol5/Num2/v5n1a03.pdf) para serem estudados em casa e cujas respostas nos foram entregues antes da terceira aula. De posse das repostas do questionário diagnóstico e do questionário conceitual 1, elaboramos nossa terceira aula sob medida para os estudantes, observando suas dúvidas.
Aula 3	Durante essa aula corrigimos e tiramos as dúvidas dos estudantes quanto ao questionário conceitual 1. Também escolhemos algumas respostas deste questionário que tinham o potencial para promover a socialização do conhecimento com a negociação de significados entre os estudantes. Após essa aula enviamos aos estudantes as Tarefas de Leitura, a saber, neutrino(https://en.m.wikipedia.org/wiki/Neutrino); Wolfgang Pauli (https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Pauli/); e O Drama de Consciência de um Jovem Cientista

	(http://www.cbpf.br/~cirto/MecEstNaoExten_HTML/AULAS/Aula_03/Morcelle_&_Campbell_&_Tavares_&_Vugman%28Ettore_Majorana_O_Drama_De_Consciencia_De_Um_Jovem_Cientista%29%5BCBPF_Ciencia_E_Sociedade_2006%5D.pdf), para serem estudados em casa e também enviamos o questionário conceitual 2 cujas respostas nos foram devolvidas antes da quarta aula. De posse das repostas do questionário conceitual 2, elaboramos nossa quarta aula sob medida para os estudantes, observando suas dúvidas.
Aula 4	Durante essa aula corrigimos e tiramos as dúvidas dos estudantes quanto ao questionário conceitual 2. Mais uma vez selecionamos algumas respostas deste questionário que apresentavam potencial para incentivar a socialização do conhecimento com troca de significados entre os estudantes.
Aula 5	Nessa penúltima aula, enviamos aos estudantes a avaliação conceitual discursiva. Cada questão foi respondida em uma folha separada fornecida com a avaliação.
Aula 6	Durante os 30 primeiros minutos, o objetivo era observar se os estudantes sabiam explicar a regressão molécula, átomo, núcleo, prótons, nêutrons, quarks, elétrons, neutrinos. Em suma: se os estudantes eram capazes de perceber que havia um processo natural que constrói tudo que existe por meio de interações entre partículas e campos. Cuidadosamente pudemos inferir que de fato havia na mente desses estudantes indícios de “assinaturas” de aprendizagem significativa, isto é, novos conhecimentos se ancoraram na rede cognitiva dos estudantes, associando-se convenientemente a subsunçores pré-existentes para explicar o que os estudantes não sabiam. No final da aula enviamos aos estudantes um questionário de opinião sobre nossa pesquisa.

Fonte: Autoria Própria.

A SD descrita acima foi aplicada no segundo semestre do ano de 2020, ainda quando as escolas estavam funcionando no formato de aulas remotas, em decorrência da pandemia coronavírus COVID-19, o que foi determinante para a adoção da metodologia Ensino sob Medida.

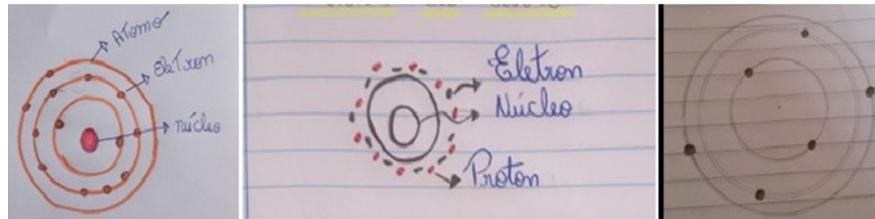
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aqui fazemos uma análise dos dados recolhidos durante a aplicação de nosso produto educacional a partir da sequência de aulas. Analisamos as falas dos estudantes, além das representações mentais e as respostas das atividades da SD, que consistiam na representação do átomo e do neutrino; o questionário diagnóstico; o questionário conceitual 1; o questionário conceitual 2; a avaliação discursiva tradicional; e a observação da manifestação da diferenciação progressiva através de uma aula dialogada interativa sem *slides*.

3.1 AULA 1: FALA DOS ESTUDANTES E REPRESENTAÇÃO DO ÁTOMO E DO NEUTRINO PELOS ESTUDANTES

Nesta primeira aula, de um lado, solicitamos aos estudantes que respondessem oralmente “Do que as coisas são feitas ou qual a natureza das coisas”. O objetivo era conhecer a concepção/representação mental prévia que os estudantes tinham do átomo e de sua estrutura interna e dos neutrinos e, assim, conhecer os ajustes necessários para intervir nas próximas etapas da SD e atender às necessidades conceituais dos estudantes. A Figura 1 abaixo mostra representações do átomo feitas por três estudantes participantes da pesquisa.

Figura 1 - Representações do átomo pelos estudantes
 Estudante 1 Estudante 2 Estudante 3

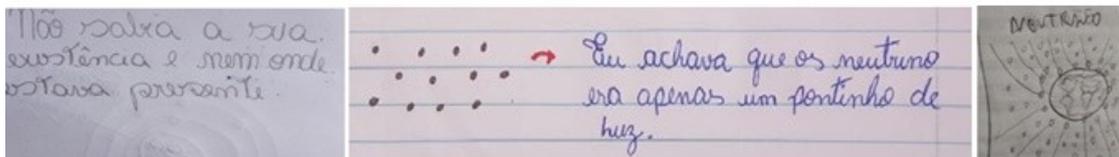


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 1 acima constatar que o Estudante 1 sabe que o átomo tem um núcleo e elétrons orbitando ao seu redor, mas desconhece o fato de que o núcleo tem prótons e nêutrons em seu interior e ainda menos que esses últimos são formados por quarks. O Estudante 2 sabe que o átomo tem um núcleo com elétrons orbitando ao seu redor, mas desconhece também que o núcleo tem prótons e nêutrons em seu interior e ainda menos que esses últimos são formados por quarks e além disso situa os prótons fora do núcleo. O Estudante 3 não sabe que o átomo possui um núcleo, mas sabe que os elétrons orbitam em torno de alguma coisa. É importante destacar que todos os três alunos associam os átomos às circunferências, mostrando como a concepção de objetos regulares e perfeitos está arraigada em suas estruturas cognitivas.

Abaixo mostramos a representação do neutrino feita pelos mesmos três estudantes.

Figura 2 - Concepções dos neutrinos pelos estudantes
 Estudante 1 Estudante 2 Estudante 3



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 2 acima constatamos que o estudante 1 nunca ouviu falar sobre neutrino; que o Estudante 2 o confunde com fótons; que o Estudante 3 sabe da existência do neutrino e que ele está em toda parte, podendo também atravessar o planeta Terra. Isso foi uma surpresa, pois esse estudante desconhece que o átomo tem um núcleo. A resposta esperada como certa era que os estudantes fizessem uma representação gráfica qualquer do que eles pensavam que fosse o neutrino.

3.2 AULA 2: FALA DOS ESTUDANTES E QUESTIONÁRIO DIAGNÓSTICO

Na segunda aula, os estudantes responderam durante a aula a um questionário diagnóstico abaixo com 13 questões abertas. Durante a resolução do questionário os estudantes fizeram algumas afirmações e questionamentos, que relatamos: “Professor claro que já ouvi falar desse tal de átomo, mas não lembro mais o que é não”; “não sei escrever com minhas palavras”; “sei que o elétron é negativo e o próton é positivo”; “Que partícula é a menor coisa que existe?”; “Ai então não tem nada dentro dela?”; “O átomo é uma partícula?”;

“Existe máquina para ver o átomo?”; “Neutrino é aquilo que passou na televisão e que explica como o mundo era?”.

Abaixo analisamos as respostas dos estudantes às 13 questões do questionário diagnóstico, a saber:

- 1- O que são átomos?
- 2- O que tem dentro deles?
- 3- O que é uma partícula?
- 4- Qual a carga do elétron, do próton e do nêutron?
- 5- Já ouviram falar de neutrinos?
- 6- Onde os átomos são produzidos?
- 7- O que significa partícula elementar?
- 8- Existe alguma coisa imediatamente próxima ao redor do átomo? Se sim, o quê? 9- Se prótons repelem prótons, por que o átomo não desmancha?
- 10- Por que o elétron não cai sobre o núcleo?
- 11- Quais são as quatro interações da natureza?
- 12- Por que é mais fácil ocorrer uma reação química do que uma reação nuclear?
- 13- Se bilhões de neutrinos nos atravessam a cada segundo, por que não sentimos nada?

O Quadro 3 abaixo mostra as respostas dos estudantes às treze questões acima.

Quadro 3 - Amostra do desempenho dos estudantes

Questões	Respostas dos participantes da pesquisa
Questão 1	80% responderam: são partículas que ocupam lugar no espaço.
Questão 2	95% responderam: têm prótons, elétrons e nêutrons.
Questão 3	80% responderam: são átomos.
Questão 4	100% responderam: carga negativa, carga positiva e carga zero.
Questão 5	30% responderam: sim.
Questão 6	90% responderam: no ar.
Questão 7	70% responderam: não divisível/sem estrutura interna.
Questão 8	80% responderam: elétrons.
Questão 9	70% responderam: por ser indivisível.
Questão 10	60% responderam: por ser pequeno.
Questão 11	70% responderam: interação gravitacional e eletromagnética.
Questão 12	90% responderam: a reação química o homem consegue fazer, já a nuclear somente os átomos conseguem.
Questão 13	80% responderam: por serem muito pequenos.

Fonte: Autoria própria.

3.3 AULA 3: FALA DO ESTUDANTE E QUESTIONÁRIO CONCEITUAL 1

Na terceira aula expositiva dialogada via *slides*, observando e anotando os comentários e questionamentos dos participantes durante essa aula, pôde-se constatar mais uma vez que a palavra átomo já estava bastante presente na estrutura cognitiva deles, mas de uma forma ainda não contextualizada. Isso talvez pudesse justificar o porquê de não saberem o que são átomos, já que simplesmente sabem que existem e imaginam que têm a forma

geométrica de bolinhas de gude. Ao serem perguntados por que uma árvore sofre flexão ao ser atingida por uma ventania, simplesmente responderam que é por causa do ar, não associando ainda isso a átomos.

A seguir, apresentamos no Quadro 4 as respostas dos estudantes às oito questões de múltipla escolha do questionário conceitual 1, que foram:

1- O átomo é a menor partícula que identifica um elemento químico. Ele possui duas partes, a saber: uma delas é o núcleo, constituído por prótons e nêutrons, e a outra é a região externa (eletrosfera), por onde circulam os elétrons. Alguns experimentos permitiram a descoberta das características das partículas constituintes do átomo. Em relação a essas características, indique a alternativa correta. a) prótons e elétrons possuem massas iguais e cargas elétricas de sinais opostos; b) entre as partículas atômicas, os elétrons têm maior massa e ocupam maior volume no átomo; c) entre as partículas atômicas, os prótons e os nêutrons têm maior massa e ocupam maior volume no átomo; d) entre as partículas atômicas, os prótons e os nêutrons têm mais massa, mas ocupam um volume muito pequeno em relação ao volume total do átomo.

2- O Modelo-Padrão da Física de Partículas pode ser dividido em dois grandes grupos principais. São eles: a) hádrons e léptons; b) bósons e férmions; c) mésons e bárions; d) táuons e múons; e) bósons e quark.

3- Assinale a alternativa abaixo que apresenta somente léptons: a) Nêutrons, prótons e elétrons; b) Elétrons, múons e táuons c) Fótons, bósons de Higgs e glúons; d) Neutrinos, quarks e bósons Z e W; e) Nêutrons e neutrinos.

4- Assinale a alternativa abaixo que apresenta somente partículas elementares:

- a) Elétrons e quarks;
- b) Nêutrons e prótons;
- c) Átomos e moléculas;
- d) Múons e nêutrons;
- e) Táuons e prótons.

5- Assinale, entre as alternativas abaixo, aquela que apresenta apenas bárions:

- a) Fótons e glúons;
- b) Prótons e elétron;
- c) Nêutrons e prótons;
- d) Neutrinos e nêutrons;
- e) Glúons e bósons de Higgs.

6- De acordo com o modelo padrão da física de partículas um próton ou um neutron é, cada um, formado por três quarks. Um quark tipo “up” tem carga elétrica $2/3$ e um quark tipo “down” tem carga elétrica $1/3$ em unidades da carga fundamental. Podemos dizer que:

- a) Um próton tem três quarks tipo “down”;
- b) Um neutron tem três quarks tipo “up”;
- c) Um próton tem três quarks tipo “up”;
- d) Um neutron tem quatro quarks tipo “down”;
- e) Um próton têm dois quark “up” e um “down”.

7- Os quarks são partículas que, quando ligadas em trios, formam partículas como prótons e nêutrons. Em relação aos quarks, assinale a alternativa correta:

- a) São partículas que não têm massa e, por isso, recebem o nome de bósons;
- b) São partículas não elementares, pois apresentam estruturas internas feitas de partículas ainda menores;
- c) São partículas elementares de carga elétrica parcial menor que a carga elementar;
- d) São as responsáveis pela força de atração que mantém os núcleos atômicos estáveis;
- e) São destruídos nas reações nucleares para a obtenção de energia nuclear.

8- A Física de Partículas é uma área da Física:

- a) que estuda os diferentes tipos de ligações e reações químicas;
- b) responsável pelo estudo das partículas elementares e da interação entre radiação e matéria;
- c) responsável por explicar reações nucleares;
- d) destinada a formular teorias capazes de unificar a força gravitacional com outras forças da natureza;
- e) que explica, exclusivamente por meio da Física Clássica, as interações entre átomos e moléculas.

Quadro 4 - Amostra do desempenho dos estudantes

Questões	Respostas	A	B	C	D	E	Acertos (%) (aprox.)
Questão 1	D	-	-	3	8	-	72,7
Questão 2	B	2	9	-	-	-	81,8
Questão 3	B	-	9	1	-	1	81,8
Questão 4	A	9	2	-	-	-	81,8
Questão 5	C	-	-	10	1	-	90,9
Questão 6	E	-	-	-	-	11	100
Questão 7	C	1	-	10	-	-	90,9
Questão 8	B	-	10	1	-	-	90,9

Fonte: Autoria própria.

Analisaremos a seguir as respostas dos estudantes às 12 questões abertas do mesmo questionário conceitual:

Questão 1: Cite as quatro interações fundamentais da natureza, descrevendo a função de cada uma no micromundo da Física das partículas.

-80% responderam: interação gravitacional, gerada talvez pelos grávitons e responsável pela gravidade; interação eletromagnética, gerada pelos fótons e responsável pelo brilho do Sol; interação fraca, geradas por bósons vetoriais, responsável pela radiação; força forte, gerada pelos glúons, responsável pelo núcleo não desmanchar.

Questão 2: Se o núcleo do átomo é constituído por partículas carregadas positivamente (prótons), por que esse núcleo não explode?

-70% escreveram: devido a uma cola chamada glúon;

Questão 3: Se cargas elétricas negativas e positivas se atraem, por que os elétrons não são absorvidos pelo núcleo?

-80% responderam de forma clássica: porque ocupam órbitas fixas em torno do núcleo.

Questão 4: Se elétrons e prótons têm massa, qual é o papel da interação gravitacional na estabilidade do átomo?

-90% responderam: desprezível, pois é muito pequena.

Questão 5: E os nêutrons, qual o papel deles na estrutura do átomo?

80% escreveram: estabilidade do núcleo;

Questão 6: Quais são as partículas veiculadoras da força nuclear forte? Como se chama o campo no interior do qual elas se manifestam?

80% escreveram: quarks, mas não sabiam que o campo é o campo forte (Observação: talvez a palavra campo os tenha confundido).

Questão 7: Quais são as partículas veiculadoras da força eletromagnética? Como se chama o campo no interior do qual elas se manifestam?

100% responderam: fótons, mas não sabiam que o campo é o campo eletromagnético.

Questão 8: Quais são as partículas veiculadoras da força fraca? Como se chama o campo no interior do qual elas se manifestam?

100% responderam: bósons vetoriais, mas não sabiam que o campo é o campo fraco;

Questão 9: No seu entendimento, o que é o Modelo Padrão de Física das Partículas (MPFP)?

90% responderam: é um modelo que explica as partículas e como elas interagem em nosso Universo.

Questão 10: Conforme o MPFP atual, qual o número total de partículas que compõem a matéria ordinária?

100% erraram essa questão.

Questão 11: O modelo padrão identifica e especifica a matéria escura? E a energia escura? 100% escreveram: não e não.

Questão 12: O modelo padrão identifica e especifica a partícula portadora da força gravitacional? 100% responderam: não.

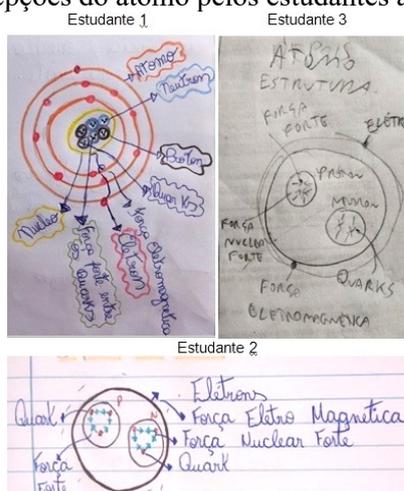
Os dados quantitativos do Quadro 4 acima e as respostas das questões abertas refletem algo muito importante, a saber, que os estudantes não apenas leram as Tarefas de Leitura, mas estudaram-nas de verdade. Uma prova disso é que em 99% das frases das respostas das questões abertas deles não há indícios de frases prontas ou palavras rebuscadas. Escreveram utilizando as palavras que conheciam. Podemos observar nisso aspectos mesmo que tênues de aprendizagem significativa.

3.4 AULA 4: FALA DOS ESTUDANTES E QUESTIONÁRIO CONCEITUAL 2

Nessa quarta seção, observando os comentários e questionamentos dos participantes durante essa aula expositiva dialogada via *slides*, notamos que houve um ganho de aprendizagem significativa: alguns estudantes já entendiam o que era o subsunçor partícula elementar e a partir dele já conseguiam “explicar” que o átomo não era uma partícula elementar e sabiam explicar que dentro dos prótons e nêutrons havia outras partículas, no caso os quarks.

Na Figura 3 abaixo estão representadas as concepções do átomo, após a intervenção pedagógica, dos mesmos três estudantes das Figuras 1 e 2.

Figura 3 - Concepções do átomo pelos estudantes após a intervenção



Fonte: Autoria própria.

Fazendo uma análise comparativa entre as Figuras 1 (aula 1) e 3 (aula 4), podemos inferir que o átomo continua tendo a forma geométrica de uma circunferência; que os elétrons ainda gravitam em órbitas predeterminadas; que o átomo passa a ter um núcleo composto de prótons e nêutrons, que por sua vez são formados por quarks; que a força forte une os quarks; que a força eletromagnética atua entre os prótons e os elétrons. Mais uma vez vemos que houve uma evolução quanto ao entendimento da estrutura atômica. Isso é uma forte “assinatura” de aprendizagem significativa.

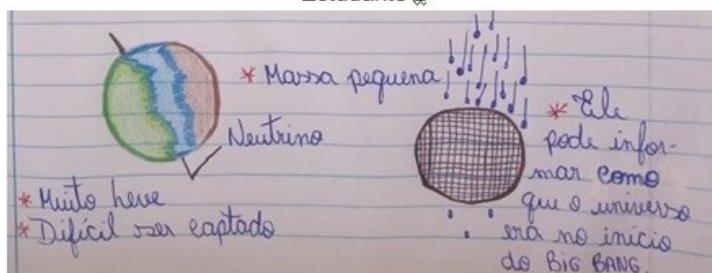
Na Figura 4 abaixo estão representadas as concepções do neutrino, após a intervenção pedagógica, pelos mesmos três estudantes da Figura 1.

Figura 4 - Concepção dos neutrinos pelos estudantes após a intervenção

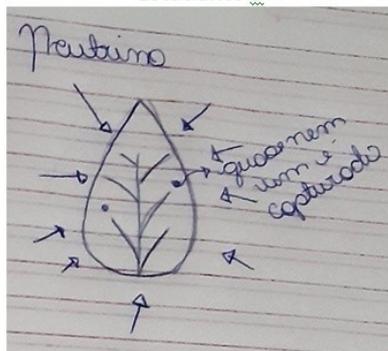
Estudante 1



Estudante 2



Estudante 3



Fonte: Autoria própria.

Realizando uma nova análise comparativa dessa vez entre as Figuras 2 (aula 1) e 4 (aula 4), verificamos um salto qualitativo quanto à compreensão do que seja o neutrino. O Estudante 1 não sabia que o neutrino existia, mas agora sabe que existe e até onde é produzido e que é dificilmente capturado em detectores, mas não escreve no desenho que tem pouca massa e é neutro, mas o fez muito bem nas respostas do questionário conceitual 2. Sabe também que dentre todas as partículas que têm massa, o neutrino é a mais leve e a mais abundante no Universo.

Quanto ao Estudante 2 que confundia o neutrino com pontinhos de luz (fótons), agora o descreve bem em relação à dificuldade de capturá-lo em detectores, à sua pequena massa e à sua carga. Ele até indica que neutrino interage muito pouco com a matéria. Quanto à Estudante 3, prefere ressaltar a propriedade que o neutrino tem de atravessar as coisas interagindo muito pouco com a matéria bariônica.

Novamente o Estudante 1 surpreendeu: Os Estudantes 2 e 3 não sabiam explicar por que os neutrinos interagem muito pouco com a matéria. O Estudante 1 prontamente respondeu: “Eu sei responder isso. É porque reage com a matéria pela tal de força fraca e pela

tal de força gravitacional que têm uma pegada muito pequena”. Esse foi um momento marcante para o professor, pois percebeu que a SD está alcançando os seus objetivos e os estudantes estão interagindo e cooperando uns com os outros. Isso é uma troca de significados! É assim que funciona a ciência: equipes unidas e que se auxiliam nas dificuldades de entendimento das coisas desse mundo.

Agora analisamos as respostas dos estudantes quanto ao questionário conceitual 2, composto de 20 questões abertas sobre os neutrinos:

Questão 1: O que são neutrinos?

-90% dos estudantes basicamente responderam: Férmion que interage apenas via interação fraca e interação gravitacional; têm pequena massa e é neutro. Os outros -10% dos estudantes responderam aproximadamente que é uma partícula subatômica sem carga elétrica e que interage com outras partículas.

Questão 2: Quem o postulou pela primeira vez? Por quê?

-80% escreveram: Wolfgang Pauli para salvar o princípio da conservação da energia e quantidade de movimento. Os 20% restantes responderam apenas Wolfgang Pauli.

Questão 3: Quem o identificou experimentalmente?

-99% responderam: Clyde Cowan e Frederick Reines. 1% respondeu Enrico Fermi;

Questão 4: Cite algumas fontes geradoras de neutrinos.

-100% responderam: estrelas/buracos negros e outros.

Questão 5: O neutrino é um bóson ou um férmion?

-100% escreveram férmion.

Questão 6: Quantos tipos de neutrinos existem atualmente? Qual o nome de cada um deles?

-100% responderam 03. Neutrino do elétron, do tau e do múon.

Questão 7: Quantos antineutrinos existem atualmente? Qual o nome de cada um deles?

-90% escreveram apenas: 03. Os 20% restante responderam 03 e o nome de cada um dos antineutrinos.

Questão 8: Os neutrinos possuem carga elétrica?

-100% responderam: não.

Questão 9: O que são neutrinos cósmicos?

-95% escreveram: Neutrinos de alta energia produzidos nas supernovas e no big bang.

Questão 10: O neutrino é sensível a quais das quatro interações fundamentais?

-85% responderam: apenas interação fraca. Os outros 15% responderam que não encontraram a resposta ou responderam apenas interação gravitacional.

Questão 11: Os neutrinos podem ser capturados facilmente? Por quê?

-99% responderam não. Mas apenas a estudante 1 (a mesma de sempre) soube explicar o porquê.

Questão 12: Confirme ou refute a frase: o neutrino é mais massivo que o elétron. -99% responderam não. Apenas 1% escreveu sim.

Questão 13: Cite algumas possíveis aplicações dos neutrinos.

-80% não souberam responder adequadamente e escreveram respostas como “luz que vaza por um material transparente, radiação.

20% responderam para estudar o Universo.

Questão 14: Conforme o genial físico Ettore Majorana, o neutrino seria uma antipartícula ou seria sua própria antipartícula?

-90% escreveram sua própria antipartícula enquanto 10% escreveram que não encontraram a resposta ou escreveram outras coisas.

Questão 15: Os neutrinos sofrem oscilação, isto é, se transformam uns nos outros? --99% responderam: sim. Dois estudantes disseram que não sabiam responder.

Questão 16: Qual a importância dos neutrinos para a cosmologia?

-100% escreveram: ajudam os cientistas a estudarem as galáxias e as estrelas.

Questão 17: Teoricamente, por que os neutrinos poderiam nos trazer informações importantes de como era o Universo 2 minutos após o Big Bang?

-90% basicamente responderam “que o neutrino estava presente na hora do big bang e podia falar como ele era”.

Questão 18: O que é uma desintegração beta?

-100% basicamente escreveram “transformação de um núcleo em outro núcleo”.

Questão 19: Qual foi a maior contribuição de Bruno Pontecorvo quanto aos neutrinos?

-90% responderam: propôs a ideia da oscilação dos neutrinos.

Questão 20: O que são oscilações de neutrinos?

-90% escreveram que é quando um neutrino pode ter os três sabores ao mesmo tempo. Um pode se transformar no outro.

Analisando as respostas acima do questionário conceitual 2, podemos constatar um grau avançado de compreensão de alguns termos da física de neutrinos, tal como oscilação, pois no início da pesquisa associavam-na a um pêndulo de relógio de parede. Isso revela indícios que a maioria dos estudantes compreendeu bem os conteúdos das Tarefas de Leitura.

3.5 AULA 5: AVALIAÇÃO DISCURSIVA TRADICIONAL

Nessa quinta seção, são analisadas as cinco questões discursivas da avaliação tradicional. Antes disso, é pertinente destacar que em todas as respostas dos estudantes nesta avaliação, podemos observar que não há frases prontas copiadas das Tarefas de Leitura (TL) propostas. Isso mostra que mais uma vez os textos foram estudados e as repostas foram construídas com as próprias palavras dos estudantes. Isso revela também o alto grau de confiabilidade dos dados recolhidos nesta pesquisa, imprescindível em qualquer pesquisa científica. Vamos então às análises das respostas das questões:

-Primeira questão: Escreva um texto relatando tudo o que você aprendeu sobre o Modelo Padrão de Física das Partículas (mínimo de 20 linhas).

A maioria dos estudantes escreveu que o Modelo Padrão identifica as partículas e explica como elas interagem entre si.

-Segunda questão: Escreva um texto relatando tudo o que você aprendeu sobre neutrinos e suas aplicações tecnológicas (mínimo de 20 linhas).

A maioria dos estudantes (90%) responde que os neutrinos são difíceis de serem detectados; interagem pouco com a matéria conhecida; não podem ser quebrados; estão presentes nas estrelas; só interagem via força fraca e gravitacional; são neutros; têm massa muito pequena; presenciaram o big bang; transformam-se uns nos outros; são muito importantes para estudar o Universo, pois ao viajarem por ele quase não são absorvidos pela matéria estelar;

-Terceira questão: No seu entendimento quais foram os impactos científicos, tecnológicos e sociais atuais da proposição do neutrino em 1930 por Pauli?

Por um lado, todos os estudantes não souberam escrever sobre o impacto social da proposta de Pauli; por outro, a maioria respondeu que a proposição de Pauli permitiu manter inviolável o princípio de conservação da energia e do momento linear; descobrir a oscilação dos neutrinos; e a fabricação de detectores.

-Quarta questão: O que você sugere para melhorar sua aprendizagem em Física?

Um participante respondeu que deveria ter mais aulas no meet. Foi respondido pelo professor que a sugestão era excelente e enriquecedora. Outra participante sugeriu que fossem utilizados, vídeos, músicas e experimentos nas aulas. O professor também respondeu que analisará a sugestão como uma forma inovadora de ensinar a física de neutrinos.

3.6 AULA 6: OBSERVANDO A DIFERENCIAÇÃO PROGRESSIVA E INDÍCIOS DE APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA NA FALA DOS ESTUDANTES ATRAVÉS DE AULA DIALOGADA INTERATIVA

A partir do último encontro virtual, observamos que: os estudantes conheciam bastante sobre os férmions, os bósons e, sobretudo sobre os neutrinos; sabiam da ligação inseparável entre esses dois primeiros, isto é, que férmions e bósons através de interações se juntavam para criar coisas; não entendiam por que não conhecíamos ainda a massa absoluta dos neutrinos; para alguns, era muito difícil aceitar que estamos continuamente sendo

atravessados por neutrinos. Para explicar por que a matéria é quase transparente aos neutrinos, foi feita uma analogia com o único campo de futebol da cidade: “Imaginem que o átomo seja do tamanho do campo de futebol de Mutum. O núcleo desse átomo seria uma azeitona no centro do campo e todo o gramado do campo seria um espaço vazio. É por isso que os neutrinos podem passar pelas coisas sem serem percebidos: o átomo para ele é um vazio”. A partir desse artifício mental, foi possível explicar o porquê de apenas 2 ou 3 neutrinos serem detectados entre bilhões que passam pelos detectores. Outros questionaram o porquê os neutrinos foram descobertos somente recentemente (1956), se são tão abundantes no Universo. Foi respondido que era uma questão tecnológica.

Os estudantes acharam muito estranho conhecermos somente 0,5% da composição do Universo. E um deles, questionou: “Por que os neutrinos podem me falar como o Universo era pouco tempo depois do big bang?”. O professor respondeu que é porque não perdem pedacinho de si quando chegam a Terra. Outra pergunta interessante: “Professor, se o neutrino oscilar, então é igual a um pêndulo?” Resposta do professor: Não é a mesma coisa não. Aqui, oscilar significa que um neutrino pode se transformar em outro, isto é, ter massa. Também acharam fantástico que todos os átomos são formados dentro das estrelas e disseram que leram que os neutrinos poderiam ser uma coisa (matéria) escura do Universo.

No Quadro 5 estão descritos alguns questionamentos feitos pelo professor aos estudantes ao longo desse último encontro da pesquisa e suas respectivas respostas.

Quadro 5 - Dados do desempenho dos alunos durante aula dialogada

Perguntas do Professor	Respostas dos Estudantes
O que é uma partícula?	Algo muito pequenininho. Tem também quando ela é elementar e aí não tem nada dentro dela.
O átomo é uma partícula elementar?	Não. Dentro dele tem prótons e nêutrons. Esses também têm coisas pequenas dentro deles que se chamam quarks e que ficam colados no outro por uma cola chamada glúons. É a força nuclear forte.
O que é modelo padrão?	Tipo uma bula que fala as propriedades das partículas e como se juntam para formar as coisas do mundo.
O elétron e o quark são elementares?	Não. Porque não precisam de outros pedacinhos para formar eles. Talvez não tem nada dentro deles.
O que é em Física um campo?	Por exemplo, se joga uma pedra em uma lagoa lá de casa vai aparecer um monte de ondinhas. O campo seria a água e a ondinha correndo na água é uma partícula. Vi isso em um vídeo na internet e estava escrita no texto que você enviou no WhatsApp pra gente.
O que é um neutrino? É mais leve ou mais pesado que o elétron?	Sei que é uma coisa muito pequena e está para tudo quanto é lado e também li que passa um monte em minha unha agora. É muito levinho mesmo, muito menos que o elétron. E também não é positivo e nem negativo e por isso é neutro.
Quem falou pela primeira vez que o neutrino existe? Por quê?	Foi um cara chamado Pauli em 1930 acho. Mas só viram esse neutrino mesmo só em 1956. Tá no texto que o senhor enviou para gente. Ele resolveu um problema para salvar uma teoria.
O que quer dizer que o neutrino pode oscilar?	Eu sei responder. É por que um pode virar outro. É como camaleão, que fica verde de repente. Tinha confundido com o balanço de pêndulo de relógio. O neutrino carrega com ele tipo os três sabores ao mesmo tempo.
Onde os átomos são feitos.	Essa eu quero responder. Pensei que era no ar, mas nas aulas lembro que você disse que são fabricados dentro das estrelas.

O que é o átomo de Bohr?	É aquele que o elétron só pode caminhar em círculo em alguns lugares que pode ficar.
Como era o átomo Schrödinger, aquele que falei durante as aulas?	Professor Francisco, essa vou responder, essa ai. O átomo dele é tipo uma caixa de maribondos com todos os maribondos voando do lado de fora, mas, na verdade, é um só que está em todos os lugares ao mesmo tempo. O marimbondo é um elétron, mas ninguém pode saber onde ele está.
Qual foi a proposta Majorana quanto aos Neutrinos?	Tem uma pergunta dessa no questionário 2 e eu sei responder. Pode? O neutrino e antineutrino é a mesma coisa. Lembro disso quando o Senhor falou na aula. Mas ninguém provou nada disso aí ainda.
Para quê servem os neutrinos?	Essa eu acho que sei. Serve para falar como era o Universo pouquinho depois que começou a existir. Serve também para ver o mundo com o telescópio de neutrinos. Você falou disso e tem também no questionário número dois.
Lembra quando comparei um detector com uma peneira? É fácil pegar o neutrino?	Opa já usei peneira para apanhar café. Por isso lembrei do que o senhor falou. Não. É muito difícil.
Por que é difícil pegar ele então?	Tem essa questão também no questionário. É por que quem comanda ele são duas forças muito fraquinhas, a fraca e gravitacional.
Os prótons são formados de quê? E os nêutrons?	Vou responder essa. De 2 quarks para cima e um para baixo e ficam juntos por causa da cola da força forte e o nêutron de dois quarks para baixo e um pra cima.
Qual o sabor de neutrinos que você mais gosta?	Lembrei de sorvete, por isso quando você falou disso nas aulas aprendi o nome deles e também dos antisorvetes. Então é neutrino do elétron, do múon e do tau e os outros é antineutrino do elétron, do múon e do tau. Acertei?
Em uma de nossas aulas falei do neutrino estéril. Sabem falar para mim o que é?	Opa. Estéril que sei é quando uma pessoa não pode ter filho. Brincadeira professor. Lembro sim. Quase morri para ler aqueles textos que mandou para gente. Esse neutrino só sente a força gravitacional, mas não foi achado ainda.
Falei na aula do problema dos neutrinos solares. Vou explicar melhor. Por exemplo, sai 100 Neutrinos do Sol e só chegava na Terra. Sabe explicar isso?	Se eu pudesse seria como os neutrinos. Posso ser três coisas ao mesmo tempo. É assim oh Francisco. É que muitos neutrinos do sol viram os outros dois e assim dá diferença, né.
Quais benefícios científicos e sociais a previsão de Pauli dos neutrinos trouxeram para a sociedade?	Sei fazer esses. Quase ninguém acertou na avaliação. E você já tinha respondido aqui. É assim oh: apareceu novas teorias, tecnologias e muita emprego e renda em várias partes do mundo.
No questionário de opinião todos vocês avaliaram nossa pesquisa sobre neutrinos com uma nota de 95 pontos em 100 pontos. O que acham que faltou para aprenderem mais?	Pode falar Professor? Todos gostaram e aprenderam muito. Podia ter mais aulas no meet; vídeos; também música e até algumas experiências. Não teria como fazer experiências não?
Podem falar um pouco ai sobre os neutrinos e supernovas.	Espera aí essa eu quero fazer. Gosto de tudo que fala de estrelas. Professor é uma grande explosão. Você falou muito disso. Tava até meio repetido. Lá são feitos os átomos de carbono do esqueleto de um boi; o metal de uma roçadeira de pasto. Essa tal de supernova cospe um monte de neutrinos de muita energia e 99% desse estrondo são levados pelos neutrinos. Tô certo? Então valeu Professor.

Fonte: Autoria própria.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pudemos verificar nas análises dos questionários, das figuras mentais e das falas dos estudantes indícios de que eles adquiriram um conhecimento significativo e que hoje podem estar aptos a desenvolverem a compreensão de conhecimentos mais complexos ou, quem sabe, no futuro, ajudar a desenvolver novos conhecimentos. Os estudantes conseguiram transitar pelos conceitos de férmions e bósons com uma destreza razoável; sabem que tudo são grãos e que por intermédio dos bósons esses férmions formam a matéria que conhecemos; também aprenderam que o modelo padrão está em construção; e que a “verdade” que conhecemos é provisória. Também verificamos que, por meio da contextualização, conseguimos facilitar consideravelmente a compreensão das quatro interações fundamentais da natureza pelos estudantes.

Outro fato marcante é que os estudantes compreenderam com profundidade o motivo da proposição do neutrino por Pauli, tanto no sentido do desenvolvimento da física teórica advindo disso, como seu impacto na geração de emprego e renda. Um dos estudantes disse ao professor: “Professor penso que na época que Pauli postulou o neutrino nem ele sabia da repercussão disso”.

Esses jovens, em sua maioria, conseguiram progressivamente diferenciar cada subsunção partícula do Modelo padrão, reunindo-os para formar o todo.

Ao longo do desenvolvimento da aplicação do produto, tivemos indícios de que a SD no formato de UEPS associada ao Ensino sob Medida com tarefas de leitura potencialmente significativas promoveu, de fato, a aprendizagem significativa. Tanto é que o método foi elogiado e aprovado pelos estudantes da pesquisa, pela diretora da escola e por alguns Professores mais abertos a desafios educacionais.

Por fim, é importante ressaltar uma vez mais que a SD foi aplicada de forma remota e emergencial no período da pandemia, e o Ensino sob Medida foi essencial dentro dessa proposta de trabalho aqui apresentada, podendo ser agora reformulada numa perspectiva de ensino híbrido.

REFERÊNCIAS

APOLLONIO, M. *et al.* Limits on neutrino oscillations from the CHOOZ experiment. **Phys. Letters B**, 466, p. 415-430, 1999. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0370269399010722>. Acesso em: 15 jul. 2023.

ARAÚJO, I.S; MAZUR, E. Instrução pelos colegas e ensino sob medida: uma proposta para o engajamento dos alunos no processo de ensino aprendizagem de física. **Cad. Bras. Ens. Fís.**, v. 30, n. 2, p. 362-384, 2013. Instituto de Física – UFRGS Porto Alegre–RS e Harvard University Cambridge – Massachusetts-EUA. Disponível em: https://mazur.harvard.edu/files/mazur/files/rep_707.pdf. Acesso: 15 jul. 2023.

BOUSQUET, B.; CANIONI, L.; GUILLET, J. P.; FLECK, S.; NORMAND, S.; HACHET, M. HOBIT: Un concept innovant pour la transformation des pratiques pédagogiques en physique. **Révue Réflet de la Physique**, n. 73, p. 36-39, 2022. Disponível em: <https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2022/03/refdp202273p36.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2023.

CARUSO, F.; OGURI, V.; SANTORO, A. **Partículas elementares: 100 anos de descobertas.** São Paulo: Livraria da Física, 2012.

DE KERRET, H. et al. Double Chooz θ_{13} measurement via total neutron capture detection. **Nature Physics**, n.16, p. 558-564, 2020. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41567-020-0831-y?error=cookies_not_supported&code=5acf2064-eeed-45d9-80e5-a148e14a3f96. Acesso em: 15 jul. 2023.

FERMILAB. **All things neutrinos.** 2023. Disponível: <https://neutrinos.fnal.gov/>. Acesso: 15 jul. 2023.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **Lições de Física de Feynman.** Porto Alegre: Bookman, 2008.

GOMES, F. E. **Uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa para a Física de Neutrinos.** 2022. 257 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Departamento de Ciências Exatas, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES, 2022.

MOREIRA, M. A. **O que é afinal Aprendizagem Significativa?** 2011. Disponível em: <http://moreira.if.ufrgs.br/oqueefinal.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2023.

MOREIRA, M. A. **Unidades de Ensino Potencialmente Significativas* Potentially Meaningful Teaching Units – PMTU.** Instituto de Física – UFRGS - Porto Alegre-RS, 2012. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/~moreira/UEPSport.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2023.

MOREIRA, M. A. O Modelo Padrão da Física de Partículas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 1, 1306, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/sMFh5cP7J9S8RzcXGsmV3fR/?format=pdf&lang=pt>. Acesso: 15 jul. 2023.

SOARES, T. C.; BELICH JÚNIOR, H.; HELAYEL-NETO, J. A. **Física de partículas vistas pelas interações fundamentais e formação de professores.** São Paulo: Livraria da Física, 2018.

Submetido em: 25/08/2023
Aprovado em: 12/10/2023
Publicado em: 21/12/2023



Todo o conteúdo deste periódico está sob uma licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/), exceto onde está indicado o contrário.