

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA**

Letícia Martendal

**UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DE FORÇA MAGNÉTICA
SOBRE CARGAS COM O TEMA AURORAS POLARES
ORIENTADA PELA TEORIA DE MODELAGEM DE HESTENES**

Florianópolis

2018

Letícia Martendal

**UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DE FORÇA MAGNÉTICA
SOBRE CARGAS COM O TEMA AURORAS POLARES
ORIENTADA PELA TEORIA DE MODELAGEM DE HESTENES**

Trabalho de conclusão de curso submetido
ao Curso de Física, Departamento de Física,
do Centro de Ciências Físicas e Matemáticas
para a obtenção do Grau de Licenciado.

Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador: Prof. Dr. Paulo José Sena dos Santos

Florianópolis

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Martendal, Letícia

Uma proposta para o ensino de força magnética sobre cargas com o tema auroras polares orientada pela Teoria de Modelagem de Hestenes / Letícia Martendal ; orientador, Paulo José Sena dos Santos, 2018.

127 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Graduação em Física, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Física. 2. Ensino de Física. 3. Modelos. 4. Modelização. 5. Eletromagnetismo. I. Santos, Paulo José Sena dos. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Física. III. Título.

Letícia Martendal

**UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DE FORÇA MAGNÉTICA
SOBRE CARGAS COM O TEMA AURORAS POLARES
ORIENTADA PELA TEORIA DE MODELAGEM DE HESTENES**

Este Trabalho de conclusão de curso foi julgado aprovado para a obtenção do Título de “Licenciado”, e aprovado em sua forma final pelo Curso de Física, Departamento de Física, do Centro de Ciências Físicas e Matemáticas.

Florianópolis, 5 de julho 2018.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo José Sena dos Santos
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador

Profª Drª Sonia Maria Silva Corrêa de Souza Cruz
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Me. Reginaldo Manoel Teixeira
Colégio de Aplicação da Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. José Francisco Custódio Filho (Suplente)
Universidade Federal de Santa Catarina

Para aqueles que mais me desafiaram a conhecer: minha mãe, tia Elis, tio Éverton e Marcos.

AGRADECIMENTOS

Além dos personagens cujas ideias são citadas neste trabalho, houve aqueles cujos conhecimentos foram-me tão inspiradores quanto, e que tiveram participação elementar em sua elaboração.

Nessa perspectiva, agradeço especialmente ao professor Paulo, que aceitou orientar esse trabalho com tão pouco tempo para sua produção, além de ter tido essencial atuação no planejamento primário dessas aulas durante o curso de Prática de Ensino II. Suas reflexões, criteriosas como só elas, quanto ao ensino de física foram enormemente motivadoras ao longo da minha trajetória como licencianda.

À professora Sônia, que inicialmente orientou-me, e teve presença bastante enriquecedora em minha formação. Tenho muito a agradecer por sua serenidade e respeito a minha autonomia de pensamento durante a busca pelo objeto de estudo no trabalho de conclusão de curso.

Aos colegas de formação, que, nas disciplinas de ensino, fizeram-se tão importantes para a promoção de ricas discussões e de tantos trabalhos de planejamento em grupo.

Ao professor Jaquiel, professor de Física do Instituto Federal Catarinense, Campus Videira, que foi solícito desde o primeiro contato para que eu pudesse usar suas aulas e aplicar a pesquisa em sua turma. Sou muito grata a sua cordialidade, que resultou certamente em uma pesquisa com mais elementos a serem analisados.

Certamente também agradeço aos alunos do 3º ano do curso técnico integrado em Eletroeletrônica, que tiveram participação ativa na realização da prática, e também a toda a direção e coordenação do campus, que me recebeu de forma bastante formal e cordial.

Aos familiares, minha imensa gratidão: meus pais Édna e Isair, meu irmão Willian, e minhas irmãs queridas Laís e Lívia. Vocês são aqueles que me concederam a ventura de ter uma vida social prazerosa mesmo cursando graduação e mestrado/doutorado concomitantemente, e me ensinaram, na prática, o significado de fraternidade.

Ao meu namorado, Marcos: seria inconcebível pensar essa formação sem a sua presença! Instruiu-me em todas as facetas do meu percurso acadêmico, e acertou em todos as sugestões. Hoje sou realizada acadêmica e afetivamente devido, em grandessíssima parte, a sua participação em minha vida. Sou orgulhosa da relação sólida, recíproca e companheira que criamos.

Agradeço a outras tantas pessoas que direta ou indiretamente participaram desse trabalho.

I solemnly swear that I am up to no good.

(J. K. Rowling)

RESUMO

Neste trabalho, defende-se a estratégia de modelagem de Hestenes como uma alternativa para o ensino de Física. Optou-se pelo tratamento do eletromagnetismo, mais especificamente, da influência de um campo magnético sobre cargas em movimento, através dessa abordagem, com o tema *auroras polares*. Discute-se a importância da modelagem no ensino de Física como uma abordagem passível de contribuir com a formação crítica e científica dos estudantes e de promover uma imagem mais coerente da Física, uma atividade tipicamente humana, em que os cientistas buscam construir representações de fenômenos físicos reais, com diferentes graus de precisão e com contexto limitado. Uma descrição fenomenológica da formação das auroras polares desde o Sol até sua formação na atmosfera terrestre é apresentada. Constrói-se um modelo para o fenômeno, em nível de ensino médio, com descrição dos objetos, formulação matemática, soluções de casos particulares, validade e limitações, tendo como objetivo explicar a faceta de o mesmo ocorrer somente nos polos. Uma sequência didática de oito aulas é produzida, com o modelo como base, discutindo-se o papel dos modelos na produção do conhecimento científico, e enfatizando-se a relação vetorial entre a velocidade da carga, o campo magnético do meio e a força sofrida pela mesma. A aplicação é feita em uma turma de 3º ano de ensino médio técnico integrado do curso de Eletroeletrônica do IFC Campus Videira. Por fim, faz-se uma reflexão fundamentada no corpo teórico da proposta de Hestenes, mediando pesquisa em ensino e prática pedagógica, apontando as potencialidades e as dificuldades do módulo.

Palavras-chave: Modelos. Modelização. Eletromagnetismo. Auroras Polares. Ensino de Física.

ABSTRACT

In this work, the modeling strategy of Hestenes is defended as an alternative to the physics teaching. It was chosen by the treatment of the electromagnetism, more specifically, of the influence of a magnetic field on moving charges, through this approach, with the *polar auroras* theme. The importance of modeling in the physics teaching is discussed as an approach likely to contribute to critical and scientific training, and promote a more coherent picture of physics, a typically human activity in which scientists seek to construct representations of real physical phenomena with varying degrees of precision and limited context. A phenomenological description of the formation of the polar auroras since the Sun until its formation in the terrestrial atmosphere is presented. A model for the phenomenon is constructed, at the secondary level, with description of the objects, mathematical formulation, solutions of particular cases, validity and limitations, with the purpose of explaining the facet of it occurring only at the poles. A didactic sequence of eight classes is produced, with the model as the basis, discussing the role of models in the production of the scientific knowledge, and emphasizing the vectorial relation between the velocity of the charge, the magnetic field of the medium and the force suffered by the same. The application is made in a 3rd year technical high school integrated class of the course of Eletroelectronics of the IFC Campus Videira. Finally, a reflection based on the theoretical body of Hestenes's proposal is made, mediating research in teaching and pedagogical practice, pointing out the potentialities and difficulties of the module.

Keywords: Models. Modeling. Electromagnetism. Polar Auroras. Physics teaching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Desenvolvimento geral de modelos.	30
Figura 2	Aurora boreal registrada no Alaska, hemisfério norte.	37
Figura 3	Aurora austral registrada na Nova Zelândia, hemisfério sul. . .	38
Figura 4	Uma aurora em Júpiter.	38
Figura 5	As camadas do Sol.	40
Figura 6	Linhas de campo magnético do Sol.	41
Figura 7	Estrutura terrestre.	43
Figura 8	Magnetosfera terrestre e o vento solar.	44
Figura 9	Força magnética sobre um partícula de carga positiva.	45
Figura 10	Direção da força defletora para cargas positiva e negativa.	46
Figura 11	Regra da mão direita.	47
Figura 12	Deflexão de feixe de elétrons em tubo de raios catódicos.	47
Figura 13	Linhas de campo magnético de uma barra imantada.	48
Figura 14	Movimento circular de uma partícula (positiva) em um campo magnético uniforme.	49
Figura 15	Movimento helicoidal de uma partícula.	49
Figura 16	Partícula aprisionada em um campo magnético não-uniforme.	50
Figura 17	Cinturões de Van Allen.	51
Figura 18	Camadas da atmosfera terrestre.	52
Figura 19	Processo de desexcitação eletrônica.	53
Figura 20	Espectros de emissão de diferentes elementos.	54
Figura 21	Cores de uma aurora (boreal).	55
Figura 22	Carga q entrando no campo magnético.	59
Figura 23	Força magnética para a parte perpendicular da velocidade.	59
Figura 24	Sistema de coordenadas.	60
Figura 25	Trajectoria circular no plano xy	61
Figura 26	Trajectoria no plano xz	62
Figura 27	Trajectoria helicoidal da partícula.	62
Figura 28	Trajectorias de prótons e elétrons no campo magnético terrestre de acordo com o modelo.	67
Figura 29	Experimento em vídeo de simulação das linhas de campo geomagnéticas.	75

Figura 30 Laboratório de instalações elétricas (IFC - Videira). 82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Resumo dos ciclos de modelagem propostos por Hestenes, baseado no quadro 3 de Heidemann, Araujo e Veit (2012).	36
----------	--	----

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	21
1 MODELAGEM NO ENSINO DE FÍSICA	27
1.1 TEORIA DA MODELAGEM DE DAVID HESTENES	28
1.2 A MODELAGEM E OS DOCUMENTOS OFICIAIS DO MEC	32
1.3 A MODELAGEM EM SALA DE AULA	35
2 AS AURORAS POLARES	37
2.1 EXPLORAÇÃO DO TEMA	39
2.1.1 Atividade magnética do Sol	39
2.1.2 Atividade magnética da Terra	42
2.1.3 Movimento de uma carga em um campo magnético	44
2.1.4 Colisões na atmosfera	51
3 O MODELO	57
3.1 DESCRIÇÃO	57
3.2 FORMULAÇÃO	58
3.3 RAMIFICAÇÃO	63
3.4 VALIDAÇÃO E LIMITAÇÕES	68
4 SEQUÊNCIA DIDÁTICA	71
4.1 OBJETIVOS	71
4.1.1 Objetivos gerais	71
4.1.2 Objetivos específicos	71
4.2 DESENVOLVIMENTO DAS AULAS	72
4.3 AVALIAÇÃO	80
5 ASPECTOS METODOLÓGICOS	81
5.1 DESCRIÇÃO DA INSTITUIÇÃO	81
5.2 DESCRIÇÃO DA TURMA	83
5.3 CRITÉRIOS DE ANÁLISE	84
6 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DA APLICAÇÃO	85
6.1 DESCRIÇÃO DA APLICAÇÃO	85
6.2 REFLEXÕES	90
CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
REFERÊNCIAS	99
ANEXO A – Texto de divulgação: O que é a aurora polar? Como ela acontece?	107
ANEXO B – Fluxograma	111
ANEXO C – Estágio de descrição	115
ANEXO D – Estágio de formulação	119
ANEXO E – Estágio de ramificação	123

ANEXO F – Estágio de validação	127
---	------------

INTRODUÇÃO

O ensino atual das ciências físicas e naturais está ainda longe de trazer resultados satisfatórios. Em 1984, Villani já apontava para diversos problemas no ensino de Física, problemas esses que eram diagnosticados ao refletir-se sobre questões como: “Será que os alunos sabem aquilo que escrevem nas provas? Será que eles aprenderam o que foi ensinado? Será que aquilo que foi aprendido tem algum sentido profundo para os estudantes?”. Ainda segundo Villani, reflexões sobre essas questões apontam para a existência de um abismo entre o conteúdo ensinado e o que foi aprendido, ou então, de um aprendizado que raramente ultrapassa, para os alunos, o mero significado instrumental de ser necessário para bons resultados nas provas e nos vestibulares.

Esse diagnóstico apresenta-se ainda atualmente existente - sendo trazido por diversas pesquisas que se utilizam de abordagens alternativas ou que questionam o ensino de Física tradicional, como é o caso de Rosa e Rosa (2005) - e parece ser fruto de pressupostos bastante estáveis, que norteiam a prática pedagógica de Física (VILLANI, 1984).

Dentre esses pressupostos, elencados por Villani (1984), encontram-se as ideias de que: o aluno é uma “tábula rasa”, que deve “apagar” da mente o que acredita que sabe, e deve “receber” do professor noções de um conteúdo, bem definido e estático, aonde não havia nada, através de exercícios repetitivos; a avaliação é uma cópia adaptada dos exercícios, e deve medir se o que foi ensinado foi suficientemente absorvido; a relação pedagógica entre professor e aluno é uma via de mão única, sendo o professor aquele que detém o conhecimento, e, portanto, o que tem autoridade perante o processo de aprendizagem; o conteúdo físico é uma transposição em forma de redução daquilo que foi produzido e que está arquivado nos livros, de forma a não conversar com a atividade de pesquisa, ou até ser totalmente incompatível, já que as ideias de caráter criativo e questionador dos cientistas são abandonadas em detrimento de uma característica de aceitação dogmática (VILLANI, 1984).

Esses preceitos são compatíveis com os do chamado *ensino tradicional*, ou *abordagem tradicional*. Trata-se de uma “[...] prática pedagógica associada a uma concepção de educação, que se instituiu quando a educação formal coletiva se organizou” (PINHO ALVES; PINHEIRO, 2010, p.129). Consolidou-se na história do ensino de Física após a Revolução Francesa, e nela ainda a prática pedagógica está inserida.

A ruptura com o sistema monárquico e a aspiração de uma nova ordem social mais igualitária direciona

o povo francês a planejar e desenhar a nova organização fundamentada em seu lema revolucionário. A pretensão da revolução era defender a liberdade individual, buscar a igualdade entre os cidadãos e incentivar a fraternidade do povo (PINHO ALVES; PINHEIRO, 2010; p. 129).

Com o legado de propiciar que todos tivessem acesso aos bens produzidos pela sociedade, incluindo a Educação, a Revolução Francesa perpetuou seus objetivos a muitos povos, que, tendo adotado e institucionalizado um projeto social, tendeu a lutar por sua manutenção, de maneira a formar uma sociedade conservadora, e transferir esse sentimento para o sistema escolar (PINHO ALVES; PINHEIRO, 2010). Daí essa necessidade de ensinar-se um conhecimento de forma dogmática e inquestionável, valorizando-se o saber pelo saber, com o pressuposto de que o aprendiz tem noção de que o conteúdo é importante e sem a necessidade de conectá-lo com sua vida cotidiana. Para essa visão conservadora, o procedimento didático mais adequado é o expositivo¹, o que oferece ao professor a oportunidade de elaborar tal discurso didático, refletindo os valores dogmáticos e a-críticos (PINHO ALVES; PINHEIRO, 2010).

Ainda citando Pinho Alves e Pinheiro (2010), uma importante contribuição para as mudanças ocorridas no processo de ensino-aprendizagem foram as pesquisas de Piaget. O biólogo, psicólogo e epistemólogo suíço foi um dos primeiros a dedicar-se à psicogênese dos conceitos, e desenvolveu estudos sobre noções numéricas e de diversos conceitos físicos, como conservação, tempo, força e movimento, de crianças e adolescentes. Embora não tenha formulado uma teoria de aprendizagem, e sim uma teoria da formação do conhecimento e das estruturas mentais relacionadas ao mesmo (PIAGET, 1971) - que considera o conhecimento como uma construção contínua e a aprendizagem como uma atividade do sujeito epistêmico, possuidor de estruturas construídas e em construção, com o ambiente - seus trabalhos influenciaram, na década de 70, as pesquisas em ensino de ciências (PINHO ALVES; PINHEIRO, 2010).

Trabalhos de cunho psicológico-cognitivo também vieram de Vygotsky e Ausubel. Além desses autores, como alegam Pinho Alves e Pinheiro (2010), influências vieram também dos epistemólogos modernos, entre eles, Popper, Kuhn, Lakatos, Feyerabend e Bachelard, que defendiam uma concepção construtivista da ciência. Este último, com sua compreensão de que o progresso do espírito científico dá-se por meio de *rupturas epistemológicas*,

¹Usualmente o ensino tradicional é reduzido à abordagem expositiva, sendo que, na verdade, não o é fator expositivo de uma aula que a define como tradicional, mas sim a mensagem e o discurso transmitidos pela mesma.

isto é, de “sucessivas destruições dos conhecimentos do passado” (REALE; ANTISERI, 2006, p. 128), além de sua ideia de *obstáculo epistemológico*, resignificando o erro como “uma ideia que impede e bloqueia outras ideias” (REALE; ANTISERI, 2006, p. 129). A partir dessa visão de ciência, o erro cometido pelo aluno passa a ganhar também outro significado perante a prática pedagógica científica, e vê-se como sendo construído no cotidiano do estudante para criar explicações sobre o mundo a seu redor, sendo também uma fonte de detecção de obstáculos.

Essas influências levaram a uma visão de que o aluno é construtor de seu conhecimento, e que, no processo de ensino-aprendizagem, devem ser levadas em conta as concepções trazidas por ele, isto é, as concepções alternativas, ou espontâneas (PINHO ALVES; PINHEIRO, 2010). Pesquisas trouxeram, e ainda trazem, elevados dados dessas concepções por parte dos estudantes, mesmo após as aulas de Física, como apresentam Zylbersztajn (1983) e Nardi e Gatti (2004). Segundo Villani (1989), elas parecem estar dissociadas de lugar, idade, língua ou contexto cultural de seus autores. Dessa maneira, por serem já conhecidas em linhas gerais, levam a uma ferramenta poderosa para o ensino de Física, que objetiva uma problematização e uma reflexão das mesmas em sala de aula, para manifestarem-se menos como obstáculos à aprendizagem.

Além dessa contribuição para a pesquisa em ensino, aparece também a perspectiva do conhecimento físico não dissociado de seus aspectos humanos, filosóficos e culturais. E, nessa busca de meios para contextualizar-se o conhecimento físico e mostrar-se o processo de transformação da ciência, a estratégia de História e Filosofia da Ciência tem sido indicada como uma abordagem que pode trazer benefícios em diversos níveis (PEDUZZI; ZILBERSZTAJN; MOREIRA, 1992). Entre os argumentos para a utilização da mesma, tem-se que:

[...] humaniza o conteúdo ensinado; favorece uma melhor compreensão dos conceitos científicos, pois os contextualiza e discute seus aspectos obscuros; ressalta o valor cultural da ciência; enfatiza o caráter mutável do conhecimento científico; e, permite uma melhor compreensão do método científico (OLIVEIRA; SILVA, 2012, p. 41).

O caráter fenomenológico da Física também ganhou destaque relevante nas pesquisas em ensino. A prática experimental, por exemplo, considerada “[...] como um instrumento que oferece objetos concretos de mediação entre a realidade e as teorias científicas”, “[...] radicalmente opondo[-se] aos exercícios comprobatórios do laboratório tradicional” (PINHO ALVES, 2002). Dentre seus benefícios para o ensino-aprendizagem, Pinho Alves

(2002) traz, citando Tamir (1991), de modo aqui resumido: a necessidade do concreto, com a participação do aluno em um processo de investigação real, dando aos alunos a oportunidade de apreciar o espírito científico da ciência, e promovendo habilidades analíticas de resolução de problemas; o desenvolvimento de habilidades e estratégias com um largo espectro de efeitos generalizáveis; o oferecimento de oportunidades únicas de identificar, diagnosticar e suprir as concepções alternativas dos alunos; a motivação dos estudantes, em geral, por atividades e trabalhos práticos onde tenham a chance de realizar experiências significativas e não triviais (TAMIR, 1991 em PINHO ALVES, 2002).

Com esses novos pressupostos, os alunos possuem um envolvimento mais ativo em situações de ensino aprendizagem, com relação ao ensino tradicional. Outras estratégias para o ensino, com essa visão alternativa, que provém da concepção construtivista, podem ser listadas: três momentos pedagógicos, proposta por Delizoicov (2001), consistindo de uma problematização inicial, seguido de uma organização do conhecimento e de uma aplicação a outras situações; ilha interdisciplinar de racionalidade, apresentada por Fourez (2002), para representar situações cotidianas de forma autônoma e interdisciplinar; e modelagem (ou modelização), trazida para o ensino de ciências por autores como Mário Bunge e David Hestenes, e que “[...] é um processo que consiste na elaboração de uma construção mental que pode ser manipulada e que procura compreender um real complexo”, e pode ser utilizada “[...] tanto em situações gerais, quando novos conhecimentos são apresentados, quanto em situações particulares, quando o aluno já dispõe dos conhecimentos necessários”, “[...] devendo sempre ser norteada por uma questão, então, a primeira condição a ser satisfeita pela atividade de modelização é fornecer uma resposta para a questão que a originou” (PINHO ALVES; PINHEIRO, 2010, p. 219).

Essa visão alternativa para o ensino de ciências está inserida então em diversas estratégias para as aulas de Física. Com esta última, a de modelagem, pode-se quebrar o distanciamento entre a física da sala de aula e o mundo fora dela, imagem esta tão presente no ensino tradicional, já que se parte de um fenômeno real para então se construir um modelo ideal. Com o objetivo pessoal de uma imersão nessa metodologia, a modelagem foi adotada no presente trabalho, com base nas etapas de modelagem de David Hestenes (1987), com o tema *auroras polares* e enfoque no conteúdo de *força magnética sobre cargas em movimento*. A questão originária para o modelo, ou seja, aquela que o mesmo buscará responder, é: Como se pode explicar o fato de as auroras ocorrerem somente nos polos?

Devido à minha trajetória acadêmica, onde tornei-me primeiramente bacharel e mestra em Física (Atômica e Molecular), e somente depois cur-

sei a licenciatura, senti-me capaz de buscar os conhecimentos necessários para a elaboração de um modelo pedagógico a partir dos modelos científicos existentes sobre o tema. Dessa forma, o professor de Física que busca neste trabalho um apoio para usar a modelagem como estratégia para discutir esses conceitos no ensino médio não precisa dominar todo o conhecimento presente no corpo deste texto. O rigor conceitual no tratamento da fenomenologia das auroras polares foi tomado aqui principalmente para um aprofundamento pessoal no tema, para, em seguida, sentir-me competente a elaborar um modelo pedagógico. Evidentemente, quanto mais profundamente o professor dominar sobre os aspectos teóricos do conteúdo e do tema, mais estará seguro para ministrar essas aulas.

Busca-se, com a escolha da modelagem, contribuir com a formação crítica e científica dos estudantes a partir de uma abordagem que promova a construção de uma imagem mais coerente da Física, além de atentá-los aos aspectos conceituais e aos princípios físicos fundamentais na análise de uma situação real.

Para explicitar as características essenciais das teorias e dos modelos físicos, assim como as etapas presentes no processo de construção de modelos, que irão guiar a prática de ensino, uma discussão teórica acerca da escolha metodológica e da organização do conhecimento procedimental em Física é feita no primeiro capítulo, adotando-se o referencial de Hestenes (1987) sobre a construção de modelos na Física e no contexto do ensino.

Em seguida, no segundo capítulo, como, no processo de modelagem, há necessidade de compreenderem-se os aspectos físicos dos fenômenos para que se possam estabelecer as variáveis e as interações pertinentes, o tema auroras polares é explorado e estudado fenomenologicamente, desde sua origem, no Sol, até sua formação, na atmosfera terrestre.

A fim de possibilitar tal estudo no ensino médio, e conjuntamente aproximar o conhecimento físico escolar da forma como o conhecimento científico é construído, no terceiro capítulo, é construído um modelo para a deflexão das partículas do vento solar aos polos geomagnéticos, com enfoque, em termos de conteúdo físico, em força magnética sobre cargas. Os estágios de modelagem de Hestenes (1987) são especificados para o fenômeno. Após um primeiro trabalho como este, em que o modelo já está pronto, o professor pode buscar oferecer mais autonomia à turma nos processos de modelagem de outras situações físicas reais, podendo obter, ao final, diferentes modelos, com diferentes escolhas e idealizações.

A sequência didática, proposta para turmas de 3º ano do E.M., é apresentada no quarto capítulo, juntamente com os objetivos e as justificativas. Aspectos metodológicos da aplicação, como informações sobre a turma e a instituição onde foi aplicado o módulo estão contidas no quinto capítulo.

Assim como a descrição da aplicação e as reflexões das potencialidades e dificuldades encontradas, no sexto e último capítulo.

1 MODELAGEM NO ENSINO DE FÍSICA

O entendimento de como surge o conhecimento científico não é alvo somente das pesquisas epistemológicas das últimas décadas. Fatos históricos apontam que o homem, desde a mais remota antiguidade, busca por explicações acerca de como pensa sobre si e sobre as coisas que o cercam (PINHEIRO, 1996). No início do século XX, surge a concepção filosófica construtivista, que entende o conhecimento científico como uma construção humana, transitória e dinâmica, não sendo fruto de pura racionalidade, nem somente da empiria, de forma que, como elucidou Popper (2004), a construção das teorias científicas, por tratar-se de descrições de caráter provisório, uma vez que a ciência caracteriza-se pela refutabilidade dos seus conhecimentos, dá-se através da maneira como o homem enxerga o mundo, buscando, de muitos modos, o progresso científico.

Para o epistemólogo Mario Bunge, segundo Machado e Vieira (2008), “o progresso do conhecimento e da ação do homem no mundo está nas aquisições de teorias científicas” (MACHADO; VIEIRA, 2008, p. 4), de forma que é preciso teorizar sobre os dados empíricos. No entanto, para Bunge, os conhecimentos inseridos nas teorias não são transcrições completas da realidade, mas sim uma representação simbólica imperfeita (porém aperfeiçoável) da mesma, isto é, um conhecimento aproximado e não único do real (MACHADO; VIEIRA, 2008). Essa explicação idealizada da natureza é justamente o que se obtém por meio da construção de modelos, ou do processo de modelagem.

Essa importância que os modelos têm na construção do conhecimento científico torna a abordagem de modelagem uma ferramenta interessante para, principalmente, aproximar (i) os saberes físicos escolares da realidade observada pelos alunos através da sua relação com o mundo fora da sala de aula, e (ii) os modelos na construção da Ciência dos modelos no ambiente escolar.

Para explicitar as características essenciais dos modelos físicos e as etapas presentes em seus processos de construção, e ainda guiar as atividades da prática de ensino, adotar-se-á aqui o referencial de David Hestenes (1987) sobre a construção de modelos na Física e no contexto do ensino. Em seu texto *Toward a modeling theory of physics instruction*, o físico americano formula uma teoria instrucional que busca consolidar e organizar o conhecimento procedimental da Física, e que sirva como base para uma prática alternativa à do ensino tradicional.

1.1 TEORIA DA MODELAGEM DE DAVID HESTENES

Estruturando o conhecimento científico em dois tipos, factual, consistido pelas teorias, modelos e interpretação de dados, e procedimental, envolvendo as estratégias e técnicas para desenvolver o conhecimento factual, Hestenes (1987) ressalta a ausência deste último nos livros didáticos, de forma que os estudantes são deixados a descobrir conhecimentos procedimentais por eles mesmos. O que justifica, em grande parte, a dificuldade que têm na resolução de problemas (HESTENES, 1987).

O que o autor propõe então é uma teoria para organizar o conhecimento procedimental, para que possa ser ensinado de forma mais eficiente do que com relação ao ensino tradicional, onde os alunos aprendem esse procedimento, por eles mesmos, após anos de estudo e resolvendo infindáveis listas de problemas, como ocorre nos cursos universitários.

Considerando então que o conhecimento factual é estruturado através de modelos e teorias, o autor identifica o desenvolvimento de modelos como a principal estratégia dos cientistas, o que fornece uma base para uma *estratégia instrucional centrada em modelos*. Sendo que, para Hestenes (1987),

Um modelo é um objeto substituto, uma representação conceitual de uma coisa real. Os modelos em física são modelos matemáticos, o que significa que propriedades físicas são representadas por variáveis quantitativas nos modelos (Traduzido de HESTENES, 1987, p. 4).

Na física, ainda para Hestenes, os modelos, que são do tipo matemático, possuem quatro componentes: (i) um conjunto de nomes para o objeto e para os agentes que interagem com ele; (ii) um conjunto de variáveis descritivas (ou descritores) representando propriedades do objeto, que podem ser variáveis de objeto - que representam propriedades intrínsecas do objeto -, de estado - que representam propriedades intrínsecas de valores que podem variar com o tempo - e de interação - que representa a interação de algum objeto externo (chamado agente) com o objeto que está sendo modelado; (iii) as equações do modelo, descrevendo a estrutura e a evolução temporal; (iv) uma interpretação relativa às variáveis descritivas para propriedades de alguns objetos que o modelo representa.

Uma prática bastante comum nas aulas de física, como bem retrata Hestenes (1987), é tratar as equações do modelo como sendo o próprio modelo matemático, o que limita a interpretação do mesmo, talvez não para um cientista experiente, que é capaz de enxergar o modelo como um todo através da equação, mas, para o estudante, a equação sem uma interpretação trata-se apenas de relações abstratas entre variáveis matemáticas.

Já uma teoria científica para Hestenes (1987),

pode ser considerada como um sistema de princípios para modelagem de objetos reais. Este ponto de vista deixa claro que o conceito de teoria pressupõe o conceito de modelo. De fato, uma teoria científica pode ser relacionada à experiência somente quando usada para construir modelos específicos que podem ser comparados com objetos reais. As leis de uma teoria podem ser testadas e validadas somente por teste e validação dos modelos derivados da teoria. (Traduzido de HESTENES, 1987, p. 5).

E, ainda segundo Hestenes (1987), uma teoria científica possui três componentes importantes: (i) um quadro de leis específicas e genéricas caracterizando as variáveis descritivas da teoria; (ii) uma base semântica de regras de correspondência relacionando as variáveis descritivas às propriedades de objetos reais; (iii) uma superestrutura de definições, convenções e teoremas para facilitar a modelagem em uma variedade de situações.

Tendo estruturado o significado de teoria e modelo na física, Hestenes (1987) tem a base para a estratégia instrucional. E o processo cognitivo de aplicação dos princípios de uma teoria em um objeto ou fenômeno real, Hestenes chama de processo de *modelagem*.

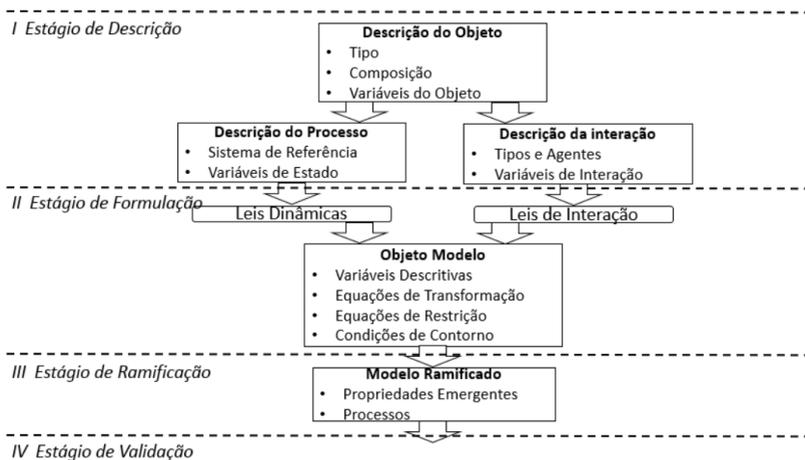
Para isso, ele elaborou uma estratégia de desenvolvimento de modelos que é composta de quatro estágios a serem implementados sucessivamente, formando as etapas de modelagem: (i) descrição, (ii) formulação, (iii) ramificação e (iv) validação (vide figura 1).

No estágio de descrição, monta-se um “completo conjunto de nomes e variáveis descritivas para o modelo, junto com as interpretações físicas para todas as variáveis”. É dividido ainda em três componentes: um primeiro que trata da descrição dos objetos, como o tipo e as variáveis dos objetos; um segundo que visa a descrição do movimento (ou do processo, em casos fora da mecânica), como a escolha do sistema de referência e a distinção das variáveis de movimento; e o terceiro para a descrição de interação, onde se buscam os agentes, o tipo e a variável de interação. Esse estágio, se não explorado durante a modelagem, pode tornar o problema ou fenômeno ainda mais difícil para os estudantes, e é pouco presente nos livros didáticos.

No estágio de formulação, as leis físicas de interação e de movimento são aplicadas para determinar equações específicas para o objeto modelado, fazendo uso das considerações tomadas no estágio anterior e das teorias físicas conhecidas.

No estágio de ramificação, as propriedades e os casos especiais do modelo são estudados, de forma que as equações são resolvidas e os resultados podem ser representados analiticamente e graficamente e então analisados.

Figura 1: Desenvolvimento geral de modelos.



Fonte: HESTENES, 1987, p. 14, em SOUZA, 2015, p.6.

Os livros didáticos, em geral, apresentam bastante essa parte, já que é basicamente matemática, porém cometem o equívoco de não apresentar os cálculos como tendo sido providos de uma ramificação, como se fossem gerais, e isso traz dificuldades para os estudantes, que não compreendem quando eles podem ou devem ser usados.

Por fim, o estágio de validação é responsável pela avaliação empírica do modelo ramificado, podendo envolver um teste experimental de laboratório ou uma comparação com dados já existentes.

Essas etapas foram descritas primeiramente se pensando no desenvolvimento de modelos em mecânica, primeira área de contato dos estudantes com a Física, porém são generalizáveis, e Hestenes, em seu artigo, exemplifica através da modelagem de um circuito LRC.

Uma comparação entre um curso que se utiliza de instrução por modelagem e um curso padrão foi feita por Brewe (2008): enquanto que, em um curso padrão, as leis são dadas em forma de equação e aplicadas para resolver problemas, tratando-se de um conteúdo permanente, sem necessidade de validação e indistinguível do fenômeno, em instrução por modelagem, os modelos são construídos de acordo com as leis e restrições físicas pela aplicação de ferramentas de representação, e são usados para resolver problemas, tratando-se de modelos não-definitivos, necessitando de validação e refinamento, e também representativos do fenômeno. Além de que, no primeiro

caso, a resolução de problemas é um jogo que requer truques e é aprendido pela resolução de um grande número de problemas, diferentemente da instrução por modelagem, que é um processo a ser aprendido através do acúmulo de experiência em suas etapas.

Hestenes (1987) alega que o uso sistemático da teoria da modelagem na instrução poderá (i) promover o desenvolvimento da intuição física dos estudantes, além de (ii) ajudá-los a ganhar uma visão unificada e mais coerente da ciência, já que permite o entendimento de que os modelos são usados para compreender fenômenos empíricos.

Brewe (2008) acrescenta como principais vantagens do uso da teoria da modelagem: (i) potencial de manter os estudantes focados nos princípios fundamentais da física; (ii) relação próxima entre o currículo e a prática da ciência, permitindo que os alunos envolvam-se em atividades consistentes com a atuação dos cientistas; (iii) mudança na natureza da resolução de problemas, através da aplicação de modelos quantitativos, requerendo uso de múltiplas representações; e (iv) incentivo dos estudantes a atentarem-se aos aspectos conceituais na análise de situações físicas.

Veit e Teodoro (2002) também trazem outros benefícios: (i) facilita a construção e a generalização de relações e significados, contribuindo para o desenvolvimento cognitivo; (ii) exige que os estudantes definam e exponham suas ideias mais precisamente; e (iii) propicia oportunidades de testarem seus próprios modelos cognitivos, detectando e corrigindo incoerências.

No entanto, há também dificuldades, como bem retrata Brewe (2008), no âmbito do ensino superior, porém também válidas para o ensino médio. Uma delas é que a ideia de envolver os estudantes em atividades consistentes com as científicas torna-se muito mais prática quando se tem à disposição um laboratório de ensino, onde eles possam facilmente interagir com os sistemas físicos estudados. Essa é uma característica que a maioria das escolas brasileiras não tem, fazendo-se necessárias adaptações por parte do professor. Ademais, Brewe (2008) salienta também que os instrutores muitas vezes ficam incomodados com o fato de a cobertura de conteúdo ser reduzida com o uso da modelagem, já que o tempo necessário para tratar dos conceitos, e para os alunos desenvolverem uma compreensão profunda sobre o modelo, precisa ser ampliado. No entanto, se se considera quanto conteúdo de física é verdadeiramente necessário e aprendido pelos estudantes, o resultado da instrução por modelagem torna-se uma opção atraente para o ensino médio.

Ademais, conforme apontam Machado e Vieira (2008), segundo Martinand (1996), a questão fundamental da modelização (não somente no referencial de Hestenes) no ensino de ciências não está na escolha de um bom modelo para ser ensinado, mas sim em como explicitar as características essenciais dos modelos científicos e a forma de pensar presente em seus proces-

sos de construção. À vista disso, essa questão aponta para a necessidade de o professor refletir sobre seus objetivos de ensino, buscando coerência entre o seu referencial de caráter procedimental e as competências do ponto de vista físico.

1.2 A MODELAGEM E OS DOCUMENTOS OFICIAIS DO MEC

Dentre os princípios norteadores gerais estabelecidos pelas Diretrizes Curriculares para o Ensino Médio (BRASIL, 1999), destaca-se a produção de um conhecimento efetivo, que proporcione o desenvolvimento de competências e habilidades específicas para cada disciplina, integradas pela interdisciplinaridade e valendo-se da contextualização. E, quanto às competências e habilidades a serem desenvolvidas na área de Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias, há diversas que seriam diretamente beneficiadas pelo uso da modelagem no processo de ensino/aprendizagem, tais como:

- Compreender enunciados que envolvam códigos e símbolos físicos;
- 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 (VEIT; TEODORO, 2002, p. 3).

Atualmente, as redes de ensino de todo o país estão se mobilizando em torno do documento intitulado Base Nacional Comum Curricular proposto pelo Ministério da Educação (BRASIL, 2015). Tal documento recai a uma listagem pragmática de conteúdos travestidos de “direitos e objetivos de aprendizagem”, como analisa Silva (2016), não sustentando elementos conceituais sobre educação, formação humana e políticas curriculares (SILVA, 2016). Essa problematização, no entanto, não será estendida aqui. Far-se-á apenas um destaque aos objetivos contidos nessa formulação e que possam ser alcançados através da estratégia de construção de modelos.

Como competência geral da área de ciências da natureza e suas tecnologias para o ensino médio, destaca-se como sendo possibilitada pelo uso da modelagem o seguinte parágrafo:

No Ensino Médio, a área deve, portanto, se comprometer, assim como as demais, com a formação dos jovens para o enfrentamento dos desafios da contemporaneidade, na direção da educação integral e da formação cidadã. Os estudantes, com maior vivência e maturidade, têm condições para aprofundar o exercício do pensamento crítico, realizar novas leituras do mundo, com base em modelos abstratos, e tomar decisões responsáveis, éticas e consistentes na identificação e solução de situações-problema (BRASIL, 2015, p. 537).

E, dentre as três competências específicas, e suas respectivas habilidades, a segunda apresenta relação com a abordagem aqui tratada, discorrida como:

Construir e utilizar interpretações sobre a dinâmica da Vida, da Terra e do Cosmos para elaborar argumentos, realizar previsões sobre o funcionamento e a evolução dos seres vivos e do Universo, e fundamentar decisões éticas e responsáveis (BRASIL, 2015, p. 539).

Assim como a maioria de suas habilidades:

(EM13CNT201) Analisar e utilizar modelos científicos, propostos em diferentes épocas e culturas para avaliar distintas explicações sobre o surgimento e a evolução da Vida, da Terra e do Universo.

[...]

(EM13CNT203) Avaliar e prever efeitos de intervenções nos ecossistemas, nos seres vivos e no corpo humano, interpretando os mecanismos de manutenção da vida com base nos ciclos da matéria e nas transformações e transferências de energia.

(EM13CNT204) Elaborar explicações e previsões a respeito dos movimentos de objetos na Terra, no Sistema Solar e no Universo com base na análise das interações gravitacionais.

(EM13CNT205) Utilizar noções de probabilidade e incerteza para interpretar previsões sobre atividades experimentais, fenômenos naturais e processos tecnológicos, reconhecendo os limites explicativos das ciências.

(EM13CNT206) Justificar a importância da preservação e conservação da biodiversidade, considerando parâmetros qualitativos e quantitativos, e avaliar os efeitos da ação humana e das políticas ambientais para a garantia da sustentabilidade do planeta (BRASIL, 2015, p. 543).

A terceira competência também se enquadra nessa perspectiva:

Analisar 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) (BRASIL, 2015, p. 539).

Juntamente de suas habilidades, destacando-se as seguintes:

(EM13CNT301) Construir questões, elaborar hipóteses, previsões e estimativas, empregar instrumentos de medição e representar e interpretar modelos explicativos, dados e/ou resultados experimentais para construir, avaliar e justificar conclusões no enfrentamento de situações-problema sob uma perspectiva científica.

(EM13CNT302) Comunicar, para públicos variados, em diversos contextos, resultados de análises, pesquisas e/ou experimentos - interpretando gráficos, tabelas, símbolos, códigos, sistemas de classificação e equações, elaborando textos e utilizando diferentes mídias

e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC) -, de modo a promover debates em torno de temas científicos e/ou tecnológicos de relevância sociocultural.

(EM13CNT303) Interpretar textos de divulgação científica que tratem de temáticas das Ciências da Natureza, disponíveis em diferentes mídias, considerando a apresentação dos dados, a consistência dos argumentos e a coerência das conclusões, visando construir estratégias de seleção de fontes confiáveis de informações.

[...]

(EM13CNT307) Analisar as propriedades específicas dos materiais para avaliar a adequação de seu uso em diferentes aplicações (industriais, cotidianas, arquitetônicas ou tecnológicas) e/ou propor soluções seguras e sustentáveis.

(EM13CNT308) Analisar o funcionamento de equipamentos elétricos e/ou eletrônicos, redes de informática e sistemas de automação para compreender as tecnologias contemporâneas e avaliar seus impactos (BRASIL, 2015, p. 545).

1.3 A MODELAGEM EM SALA DE AULA

Isto posto, entende-se que o ensino de Física por meio da modelagem pode contribuir para uma aprendizagem mais significativa quando os alunos participam de atividades que os envolvam ativamente na construção e na utilização de modelos, e que os façam comunicar seus resultados aos colegas (HEIDEMANN; ARAUJO; VEIT, 2012). Para otimizar a aprendizagem, essas atividades precisam ser cuidadosamente planejadas pelo professor.

Hestenes (1997), em seu texto *Modeling methodology for physics teachers*, aborda instruções para professores trabalharem com os estágios de modelagem, os chamados *ciclos de modelagem*. O autor propõe que a utilização da modelagem em sala de aula seja dada em dois estágios principais, denominados como desenvolvimento do modelo e implementação do modelo. Um resumo do ciclo de modelagem é apresentado na Tabela 1. Trata-se de uma estratégia em que os estudantes obtêm seus próprios modelos, de forma que se envolvem ativamente durante as aulas.

A seguir, apresentar-se-á a fenomenologia das auroras polares, com o estudo dos aspectos físicos envolvidos, como uma pré-descrição do processo

Tabela 1: Resumo dos ciclos de modelagem propostos por Hestenes, baseado no quadro 3 de Heidemann, Araujo e Veit (2012)

<p>Primeiro estágio: Desenvolvimento do modelo</p>	<p>1) Discussão pré-laboratorial: professor apresenta o problema.</p> <p>2) Investigação: em pequenos grupos, os alunos trabalham no planejamento e na condução de experimentos.</p> <p>3) Discussão pós-laboratorial: em conjunto, os alunos apresentam e justificam as suas conclusões na forma oral e escrita por meio dos quadros brancos.</p>
<p>Segundo Estágio: Implementação do modelo</p>	<p>Alunos implementam o modelo recém confeccionado em outras situações (problemas, novos experimentos, implementação computacional).</p>

de modelagem, afinal, sem uma compreensão do comportamento do fenômeno, não há como estabelecer as variáveis e as interações pertinentes. Essa etapa é importante também para aprofundamento por parte do professor que se deseja utilizar dessa abordagem para trabalhar a ação da força magnética sobre cargas através da temática das auroras polares no ensino médio, como será retratado no capítulo 5, usando os estágios de modelagem de Hestenes (1987).

2 AS AURORAS POLARES

A aurora polar é um fenômeno característico por um brilho observado nos céus noturnos nas regiões polares. Em latitudes do hemisfério norte, é conhecida como aurora boreal (nome batizado por Galileu Galilei em 1619, em referência à deusa romana do amanhecer, Aurora, e a seu filho, Bóreas, representante dos ventos nortes (EXPLICATORIUM, 2018)), mostrada na figura 2. Em latitudes do hemisfério sul, é conhecida como aurora austral, nome batizado por James Cook, uma referência direta ao fato de estar no Sul (EXPLICATORIUM, 2018), representada na figura 3.

Figura 2: Aurora boreal registrada no Alaska, hemisfério norte.



Fonte: EXPLICATORIUM, 2018.

Esse fenômeno não é exclusivo da Terra, ocorrendo também em outros planetas do sistema solar como Júpiter (figura 4), Saturno, Marte e Vênus (EXPLICATORIUM, 2018). O fenômeno também não é exclusivo da natureza, já que pode ser reproduzido artificialmente através de explosões nucleares¹ ou em laboratório².

A aurora polar terrestre aparece tipicamente tanto como um brilho difuso quanto como uma cortina de luzes. Algumas vezes são formados arcos

¹Tal fenômeno foi demonstrado pelo teste nuclear nos Estados Unidos, denominado *Starfish Prime* em 9 de julho de 1962 (EXPLICATORIUM, 2018). O céu da região do Oceano Pacífico foi iluminado pela aurora por mais de sete minutos. Esse efeito foi previsto pelo cientista Nicholas Christofilos, que tinha trabalhado noutros projetos sobre explosões nucleares.

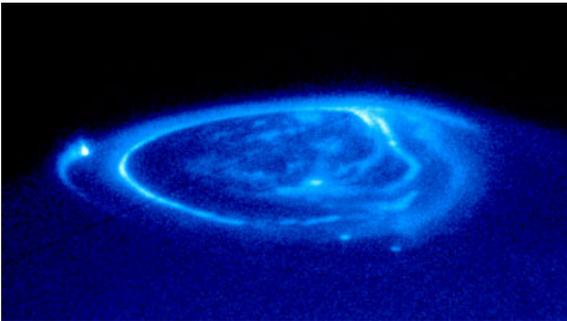
²As simulações do efeito em laboratório começaram a ser feitas no final de século XIX pelo cientista norueguês Kristian Birkeland, que demonstrou, utilizando uma câmara de vácuo e uma esfera, que os elétrons eram guiados em tal efeito para as regiões polares da esfera (EXPLICATORIUM, 2018).

Figura 3: Aurora austral registrada na Nova Zelândia, hemisfério sul.



Fonte: EXPLICATORIUM, 2018.

Figura 4: Uma aurora em Júpiter.



Fonte: EXPLICATORIUM, 2018.

que podem mudar de forma constantemente. Cada cortina consiste de vários raios paralelos e alinhados na direção das linhas do campo magnético, sugerindo que o fenômeno no nosso planeta esteja relacionado com o campo magnético terrestre. Da mesma forma, a junção de diversos fatores pode levar à formação de linhas aurorais de tonalidades de cor específicas (EXPLICATORIUM, 2018). Apesar de suas luzes às vezes parecerem tocar o chão, a altura mais baixa de sua formação fica a cerca de 100 km da superfície, pelo menos dez vezes mais alto do que a altitude alcançada pelos jatos comerciais, e na última camada da atmosfera (ZÊNITE, 2018).

O fenômeno aurora polar pode ser estudado com diversos enfoques em termos de objeto. Pode-se tratar da sua origem no astro principal do

sistema solar, com conhecimentos de astronomia, termodinâmica e eletromagnetismo. Pode-se abster a como se dá o fenômeno nas proximidades da Terra, buscando-se compreender a ocorrência dele somente nos polos. Pode-se ainda pensar em termos de óptica, na formação das luzes no céu. Além de outros aspectos que fogem mais da área da física, como o turístico e outros. Far-se-á, a partir de agora, uma exploração do tema, abordando os tópicos mais importantes para o processo de modelização que se busca nesse trabalho.

2.1 EXPLORAÇÃO DO TEMA

A origem das auroras está a aproximadamente 150 milhões de quilômetros da Terra, no Sol. Ele é um lugar tão quente e dinâmico que a sua força gravitacional, embora gigantesca, não é capaz de conter sua própria atmosfera. O fenômeno envolve também o campo magnético da Terra - que apresenta um comportamento específico de tal modo a permitir, por vezes, a entrada das partículas carregadas que provêm do Sol - e também a atmosfera terrestre, onde há o aparecimento das luzes.

2.1.1 Atividade magnética do Sol

O Sol é uma estrela média, semelhante a milhares de outras no universo. Produz cerca de 4×10^{23} quilowatts de potência por segundo. Entende-se que se o Sol tivesse sua energia canalizada por um segundo, isto resultaria em energia suficiente para abastecer o nosso país pelos próximos 9 milhões de anos (TAVARES, 2000). Devido às altas temperaturas e densidades no seu interior, ocorre a fusão do hidrogênio, criando energia e tendo o hélio como subproduto. E é a fusão nuclear a fonte básica de energia do Sol.

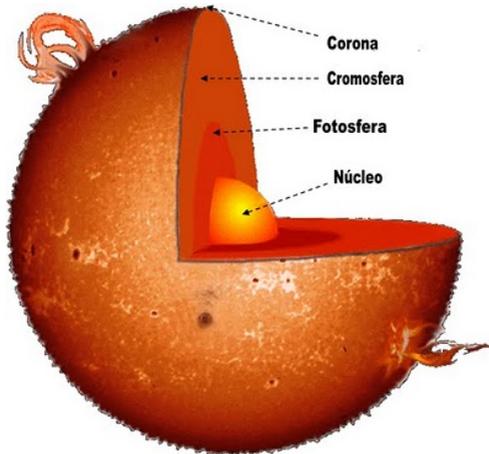
Ele é uma esfera maciça de gás luminoso, composta basicamente por hidrogênio (90%) e hélio (10%), apresentando também percentuais menores de elementos mais pesados como carbono e oxigênio (SILVA, 2007). Discordantemente do que muitos acreditam, o sol não está parado, ele gira em torno de seu eixo assim como a Terra, levando 27 dias para dar uma volta completa. No entanto, diferentemente da Terra, esse movimento de rotação não é uniforme, por não se tratar de um corpo rígido, sendo que o equador solar gira mais rápido do que as regiões próximas aos polos (SILVA, 2007).

O Sol produz radiação ultravioleta, raios-x, partículas e campos magnéticos. A região do espaço que sofre influência do Sol é chamada de heliosfera e inclui o vento solar e todas as magnetosferas dos planetas do sistema

solar (SILVA, 2007).

A camada mais interna do Sol é o seu centro (núcleo, vide figura 5), onde a altíssima temperatura, de aproximadamente 15 milhões de Kelvins, o mantém no estado gasoso apesar de sua densidade ser dez vezes maior que a do chumbo. É no centro do Sol que ocorre a fusão termonuclear dos isótopos de hidrogênio em núcleos de hélio. Ao redor do centro está o envelope radioativo que é envolto pelo envelope convectivo. Estas camadas apresentam valores de densidade e temperatura bem menores que as presentes no coração do Sol. A massa solar distribui-se em 40% no centro e 60% no envelope, enquanto que o volume do centro corresponde a 10% do total. A manutenção da elevada temperatura no centro do Sol é mantida pela pressão que o envelope exerce sobre ele (SILVA, 2007).

Figura 5: As camadas do Sol.



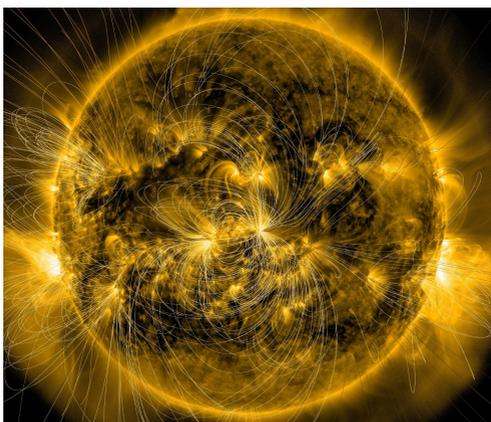
Fonte: ENERGIA SOLAR, 2018.

A distâncias de cerca de 0,7 vezes o raio do Sol a partir de seu centro, o transporte de energia é feito por convecção. Esta energia é irradiada para o espaço numa região conhecida como fotosfera, que é a superfície visível do Sol. Ela apresenta uma temperatura de cerca de 6000 K e sua espessura é de algumas centenas de quilômetros. O círculo avermelhado que fica visível ao redor da lua em algumas ocasiões, nas quais ela se posiciona à frente da face solar visível na Terra, é a camada conhecida como cromosfera. Partindo do centro em direção a fotosfera, a temperatura diminui gradualmente. No entanto, apesar de ser uma camada mais externa, a cromosfera possui uma temperatura (7000K) maior que a da fotosfera (SILVA, 2007).

A camada mais externa do Sol, ainda disponível na figura 5, é a coroa (uma estrutura parecida com uma pérola branca ao redor da cromosfera que só é visível durante um eclipse total do Sol), também conhecida como corona. A coroa é na verdade uma nuvem de plasma de baixa densidade, com temperaturas que variam de 1 a 2×10^6 K.

As linhas de campo magnético solar (figura 6) podem ser curtas ou então se estender pelo espaço. É através dessas linhas de campo magnético que a coroa se expande pelo espaço na forma do chamado vento solar.

Figura 6: Linhas de campo magnético do Sol.



Fonte: Divulgação NASA.

A área entre o Sol e a Terra e os demais planetas, chamada de meio interplanetário, já foi considerada um vácuo perfeito, mas atualmente é entendida como sendo uma área de alta turbulência consistida pelo vento solar, que flui a velocidades que variam entre 250 a 1000 km/s (TAVARES, 2000). Esse vento é formado devido à elevada temperatura da coroa, o que impede que a gravidade do Sol a mantenha confinada, resultando na sua constante perda de partículas, majoritariamente prótons e elétrons. O vento solar, ao deixar o Sol, transporta consigo o campo magnético local, de forma que as partículas seguem as linhas de campo como se fossem contas amarradas em um fio, formando o campo magnético interplanetário. Em seu movimento de expansão, o vento solar é confrontado, por exemplo, pelo campo magnético da Terra (e de outros planetas como Júpiter e Saturno). Com isso, ele é forçado a desviar o campo da Terra, moldando assim sua magnetosfera (SILVA, 2007).

Durante tempestades magnéticas do Sol, os fluxos podem ser bem mais fortes, assim como o campo magnético interplanetário, causando dis-

túrbios pela ionosfera em resposta às tempestades, afetando as atividades de caráter eletromagnético na Terra, como a comunicação por rádio, os sistemas de navegação, além de causar danos para astronautas, células solares de satélites artificiais nessa região, e também no movimento de bússolas e na ação de radares (EXPLICATORIUM, 2018).

2.1.2 Atividade magnética da Terra

O sistema solar é dominado pela heliosfera, a magnetosfera do Sol, e todo o objeto dentro da sua influência deve necessariamente interagir de algum modo com o plasma que flui do Sol. Os campos intrínsecos dos planetas, por exemplo, podem produzir cavidades em torno deles próprios, protegendo-os do vento solar (ROCHA, 2002).

O campo magnético terrestre é semelhante ao de um ímã de barra, mas essa semelhança é superficial. O campo magnético de um ímã de barra, ou qualquer outro tipo de ímã permanente, é criado pelo movimento coordenado de elétrons dentro dos átomos de ferro. Porém, as substâncias ferromagnéticas não retêm o magnetismo quando aquecidas além da temperatura de Curie, que é o caso do interior da Terra.

A intensidade do campo na superfície da Terra varia de menos de 30 microteslas, até superior a 60 microteslas, ao redor dos polos magnéticos no norte do Canadá e sul da Austrália, e em parte da Sibéria (KARTTUNEN *et al.*, 2016).

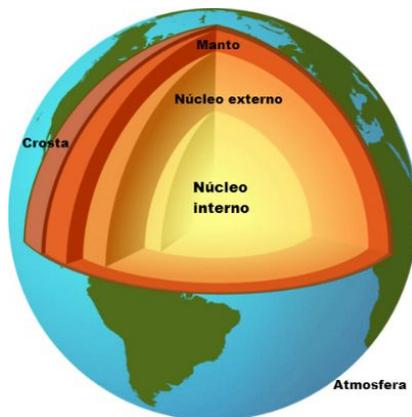
Qualquer que seja o modelo construído para explicar a origem do campo magnético da Terra, este deve estar de acordo com inúmeros condicionantes, como a geometria do campo observado, a sua inclinação, a sua intensidade, o seu espectro harmônico, a variação secular³, e também a estrutura interna do planeta, definida pela sismologia. Após diversos estudos, algumas teorias foram sendo postas à parte, e a teoria que atualmente parece gerar consenso é a teoria do dínamo (ROCHA, 2002).

Essa teoria propõe um mecanismo pelo qual um corpo celestial, como a Terra, pode gerar um campo magnético por indução através de um fluido condutor em movimento no interior do núcleo externo (figura 7), e mantê-lo durante escalas temporais astronômicas (ROCHA, 2002). Esse modelo foi proposto primeiramente por Larmor (1919).

Em sua forma menos sofisticada, a teoria do dínamo trata o líquido do núcleo externo como um plasma (fluido eletricamente carregado), com va-

³Os polos magnéticos da Terra sofrem variação chamada de *secular*. Tratam-se de mudanças nas posições dos polos, sendo graduais ao longo dos anos e não-homogêneas entre polos norte e sul magnéticos.

Figura 7: Estrutura terrestre.



Fonte: MUNDO EDUCAÇÃO, 2018a.

lores locais de densidade, velocidade macroscópica e temperatura, de forma que as partículas que o constituem, como elétrons, íons e partículas neutras, não sejam especificadas (NELSON; MEDEIROS, 2012). Trata-se de um modelo mecânico que inclui equações de movimento do fluido (hidrodinâmica), equações de campos eletromagnéticos e equações de estado e de energia (termodinâmica).

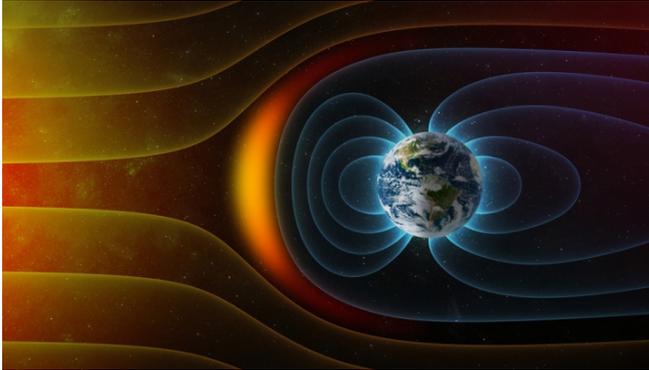
A questão principal do modelo é que o tempo de decaimento do campo magnético terrestre deve seguir o decaimento ôhmico⁴, e as expectativas revelam que esse tempo é muito menor do que a idade do universo (NELSON; MEDEIROS, 2012). Portanto, sem processos de regeneração e manutenção, o campo seria atualmente nulo. É nesse ponto que entra a analogia ao dínamo. O dínamo elétrico transforma energia proveniente do movimento em energia elétrica. No caso do campo magnético terrestre, designa-se de dínamo o processo que relaciona o movimento do plasma astrofísico (devido à convecção térmica e à rotação do planeta) com a variação temporal do campo magnético presente no meio. Dessa forma, o suprimento de energia para amplificar a intensidade do campo vem do movimento do fluido (NELSON; MEDEIROS, 2012).

Mas é necessário ponderar ainda sobre os efeitos do campo magnético solar no campo magnético terrestre. A magnetosfera de um planeta é a região do espaço onde seu campo magnético encontra-se confinado pelo fluxo de

⁴É o tempo de decaimento do campo magnético de um fluido, que pode ser estimado a partir da equação de indução magnética.

partículas do vento solar. Na Terra, ela se assemelha a um dipolo magnético, com seus polos próximos aos polos geográficos da Terra, e divide-se em dois lados: diurno e noturno (figura 8) (ROCHA, 2002).

Figura 8: Magnetosfera terrestre e o vento solar.



Fonte: Divulgação NASA.

Como ilustra a figura 8, no lado diurno, o local da pausa entre a heliosfera e a magnetosfera terrestre coincide com a região onde o campo magnético é equilibrado pela pressão do plasma solar (dez raios terrestres de distância do centro da Terra), já no lado noturno, a magnetosfera se prolonga como uma cauda (SILVA, 2007). Esse campo pode ser pensado como um obstáculo num fluxo fluido partindo do Sol, dando forma a um sulco no lado oposto ao vento solar.

Essa magnetosfera funciona como um escudo para o vento solar, que atinge constantemente o planeta, e as partículas provenientes do Sol são defletidas e confinadas nas linhas de campo magnético terrestre. Quando a atividade do vento solar é mais intensa, essas partículas chegam aos polos, numa região oval que possui um tamanho médio de 3.000 km, podendo aumentar para 4.000 ou 5.000 km (EXPLICATORIUM, 2018). Muitos aspectos físicos podem ser observados nesse processo de deflexão dessas partículas para os polos.

2.1.3 Movimento de uma carga em um campo magnético

Considera-se que o escudo magnético da Terra contra o vento solar não é perfeito, já que contém fugas para os polos magnéticos do planeta quando o fluxo é muito forte, formando as auroras polares. Como o vento solar é com-

posto de partículas carregadas, sabe-se, pela teoria eletromagnética, que essas cargas irão sofrer uma deflexão, já que entrarão em uma região de campo magnético diferente - visto que já estavam imersas na heliosfera. Portanto, nesse momento, discutir-se-á como o movimento de uma partícula carregada é afetado pela ação de campos magnéticos externos.

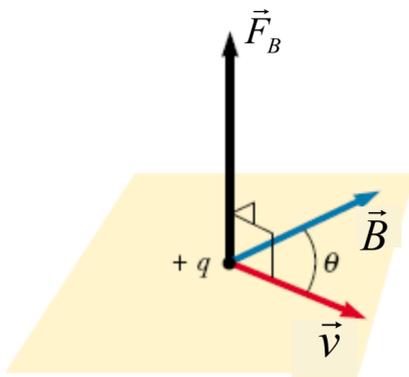
No estudo do eletromagnetismo, esse tema é referido como *força magnética sobre cargas* ou ainda *movimento de uma carga em um campo magnético*, e descreve a força que uma partícula carregada em movimento sofre ao ser exposta a um campo magnético, assim como sua nova trajetória.

A partir de resultados experimentais, lançando diversas vezes uma carga teste através da região onde há um campo magnético (\vec{B}), variando a direção e o módulo da velocidade da carga, e determinando, em cada caso, a força (se existir) que atua sobre ela no ponto considerado, conclui-se que a força (\vec{F}_B) (força magnética defletora) pode ser escrita como o produto vetorial de \vec{v} e a grandeza vetorial \vec{B} ou seja [Resnick, Halliday e Walker 1996]:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (2.1)$$

onde q pode ser positiva ou negativa.

Figura 9: Força magnética sobre um partícula de carga positiva.



Fonte: FÍSICA E VESTIBULAR, 2018.

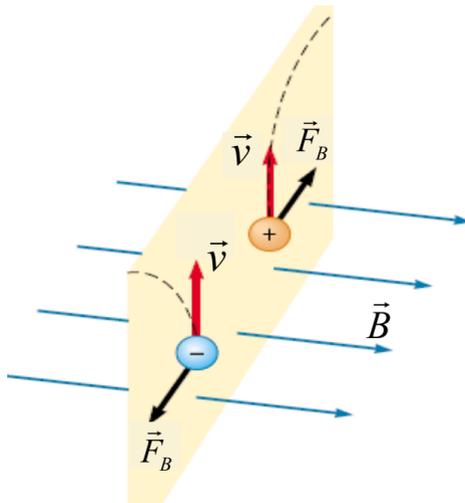
Essa equação resume algumas informações importantes (RESNICK; HALLIDAY; WALKER, 1996), que podem ser observadas na figura 9: a força magnética \vec{F}_B atua perpendicularmente ao vetor velocidade, de forma que um campo magnético constante e uniforme não pode aumentar nem diminuir o módulo da velocidade da partícula em movimento, somente a sua direção - o que não viola a 2ª lei de Newton, pois uma variação somente na direção de \vec{v}

consiste ainda em uma aceleração; um campo magnético não exerce nenhuma força sobre uma carga que se move em direção paralela ou antiparalela ao campo, como mostra a equação 2.1, que pode ser escrita, em módulo, como

$$F_B = qvB \sin \theta, \quad (2.2)$$

com q em módulo e θ sendo o ângulo entre \vec{v} e \vec{B} ; o valor máximo da força ocorre quando a carga está se movendo perpendicularmente ao campo magnético, ou seja, com $\theta = 90^\circ$; o módulo da força é diretamente proporcional a q e a v ; se a partícula estiver em repouso ou ainda se ela for eletricamente neutra, não haverá força magnética atuando sobre ela; o sentido da força defletora depende do sinal de q , de modo que uma carga positiva e outra negativa, com velocidades em mesma direção, são defletidas a sentidos opostos, como representa a figura 10.

Figura 10: Direção da força defletora para cargas positiva e negativa.

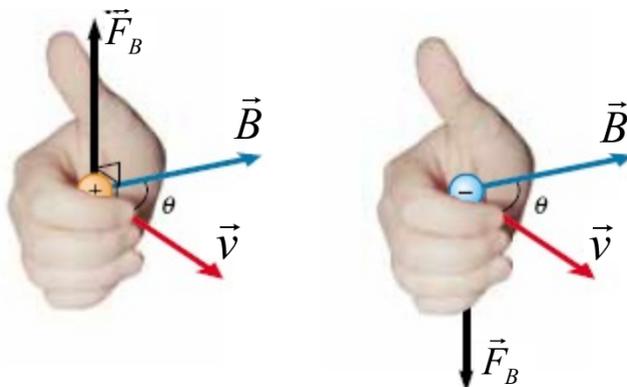


Fonte: FÍSICA E VESTIBULAR, 2018.

Usando a regra da mão direita para produtos vetoriais (figura 11), pode-se determinar a direção e o sentido da força exercida sobre a partícula. Para q positiva, se os dedos da mão direita estão na direção de \vec{v} e são dobrados em direção a \vec{B} , o polegar aponta na direção e no sentido de $\vec{v} \times \vec{B}$. Para q negativa, o sentido de \vec{F}_B é oposto ao dado pelo polegar.

A equação anterior pode ser usada para explicar o desvio de feixes de elétrons em um tubo de raios catódicos (figura 12), no qual essas deflexões possibilitam as imagens nas telas das televisões (de tubo). Nesse equipa-

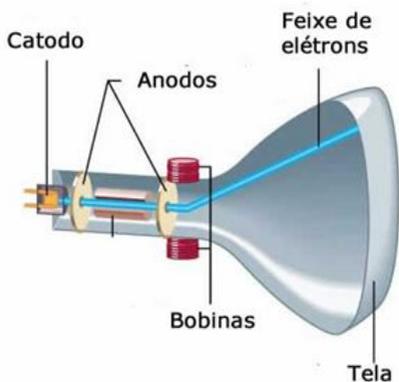
Figura 11: Regra da mão direita.



Fonte: FÍSICA E VESTIBULAR, 2018.

mento, proposto primeiramente por J. J. Thomson para medir a razão entre a massa e a carga de um elétron, elétrons são emitidos por um filamento aquecido e acelerados por um campo elétrico estabelecido ligando-se uma bateria aos terminais das placas defletoras, proporcionando também um campo magnético por meio de uma corrente em um sistema de bobinas, e ocasionando deflexões nos feixes de elétrons (RESNICK; HALLIDAY; WALKER, 1996). Os mesmos produzem luz ao atingir a tela fluorescente.

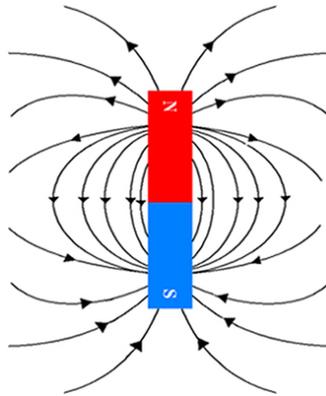
Figura 12: Deflexão de feixe de elétrons em tubo de raios catódicos.



Fonte: CIENTECNO, 2018.

O vetor campo magnético pode ser visualizado através de linhas de campo. Toma-se que a direção da reta tangente a uma linha de campo magnético, em qualquer ponto, determina a direção de \vec{B} naquele ponto, e que o espaçamento das linhas é uma medida do módulo de \vec{B} , sendo o campo forte onde as linhas estão mais próximas umas das outras, e fraco onde estão mais afastadas. A figura 13 mostra como o campo magnético de uma barra imantada pode ser representado pelas linhas de campo. As linhas formam curvas fechadas, saindo do ímã pelo polo norte e entrando nele pelo polo sul. Os efeitos magnéticos externos de uma barra imantada são mais fortes próximos às suas extremidades.

Figura 13: Linhas de campo magnético de uma barra imantada.

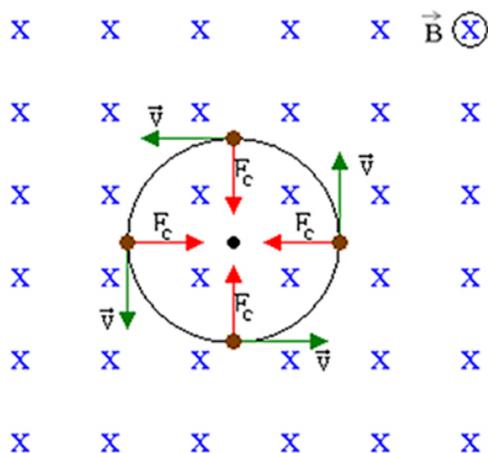


Fonte: MUNDO EDUCAÇÃO, 2018b.

Quando um elétron entra em uma área de campo magnético constante e uniforme, com velocidade perpendicular ao campo, como a força magnética deflete continuamente o elétron, e porque \vec{v} e \vec{B} são perpendiculares entre si, a deflexão faz com que os elétrons sigam uma trajetória circular (figura 14). Isso é análogo à situação de uma pedra presa à extremidade de uma corda, descrevendo uma trajetória circular sob uma superfície horizontal lisa, de forma que a tensão na corda é que fornece a aceleração centrípeta necessária, enquanto que, no primeiro caso é a força magnética (RESNICK; HALLIDAY; WALKER, 1996).

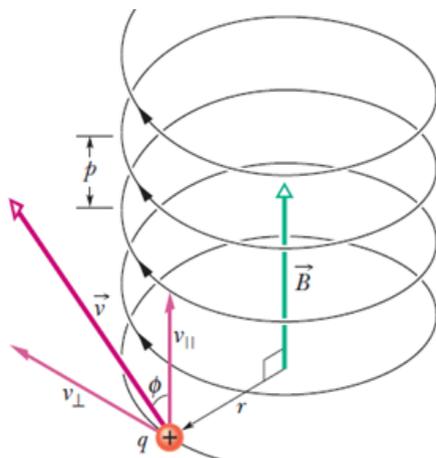
Se a velocidade da partícula carregada tiver também uma componente paralela ao campo magnético uniforme, a partícula passará a mover-se numa trajetória helicoidal em torno da direção do campo, já que essa componente atuará como um *passo* da espiral, enquanto que a componente perpendicular permite a deflexão contínua da partícula para o centro (figura 15).

Figura 14: Movimento circular de uma partícula (positiva) em um campo magnético uniforme.



Fonte: MUNDO EDUCAÇÃO, 2018c.

Figura 15: Movimento helicoidal de uma partícula.

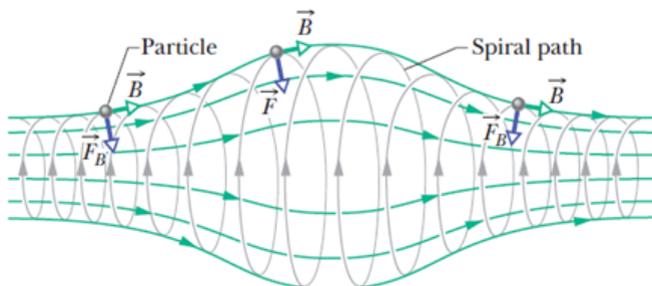


Fonte: RESNICK; HALLIDAY; WALKER, 1996.

Para um tipo específico de campo magnético não-uniforme, representado na figura 16, o campo suficientemente mais intenso nos lados direito e esquerdo “reflete” a partícula quando chega nessas áreas, fazendo com que a

mesma fique “aprisionada” dentro dele. Esse tipo de campo é denominado de *garrafa magnética*. Pode-se notar na figura que o vetor força magnética em cada extremidade da *garrafa* tem um componente apontando para o centro dela, e é essa configuração de força que permite o aprisionamento.

Figura 16: Partícula aprisionada em um campo magnético não-uniforme.



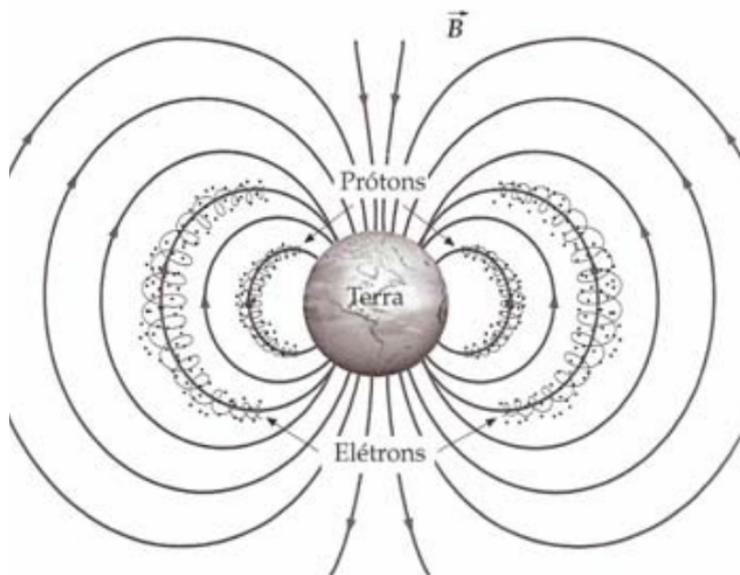
Fonte: RESNICK; HALLIDAY; WALKER, 1996.

Pode-se observar uma semelhança entre o campo da figura 16 e o campo magnético terrestre. O primeiro apresenta maior intensidade nas extremidades laterais, enquanto que o segundo apresenta maior intensidade nos polos. Assim, o campo magnético terrestre forma também uma *garrafa magnética*, que aprisiona elétrons e prótons formando os *cinturões de radiação de Van Allen*, desenhados na figura 17. Essas cargas espiralam acima da atmosfera terrestre, entre os polos geomagnéticos, de forma que as partículas oscilam para frente e para trás, de uma extremidade à outra dessa *garrafa magnética* em poucos segundos (RESNICK; HALLIDAY; WALKER, 1996).

Quando há grande fluxo de vento solar na direção da Terra, com elétrons e prótons altamente energéticos nos cinturões de radiação, há uma produção de um campo elétrico mais forte na região onde os elétrons normalmente seriam refletidos, eliminando a reflexão, e fazendo com que os elétrons se desloquem para a atmosfera, onde colidem com átomos e moléculas, formando as auroras polares. Essas partículas carregadas depois tornam a descer ao longo das linhas de campo, e, por isso o fenômeno somente se apresenta nas regiões dos polos magnéticos, em forma de um arco oval com menos de 1 km de espessura (RESNICK; HALLIDAY; WALKER, 1996).

A teoria de colisões entre partículas carregadas e átomos (ou moléculas), também conhecida como teoria de espalhamento, usa-se de uma abordagem quântica, e busca descrever e prever a quantidade de energia que é transmitida para os átomos ou moléculas. Essa excitação energética pode promover a emissão de luz visível em alguns casos.

Figura 17: Cinturões de Van Allen.



Fonte: TIPLER; MOSCA, 2000, p. 198.

2.1.4 Colisões na atmosfera

A atmosfera terrestre é a camada de gases retida pela força gravitacional terrestre. Ela tem papel importante na proteção da vida no planeta, absorvendo a radiação ultravioleta solar, aquecendo a superfície por meio da retenção de calor (efeito estufa), e reduzindo os extremos de temperatura entre o dia e a noite, por ser isolante térmica (ROCHA, 2002). A coloração azul do céu é também explicada, em parte, pela constituição da atmosfera, que dispersa a luz solar no comprimento de onda da cor azul.

A sua composição dá-se, em volume, por cerca de 77% de nitrogênio molecular, 21% de oxigênio molecular, 1% de argônio, 0,04% de gás carbônico e pequenas quantidades de outros gases (ROCHA, 2002).

A camada da atmosfera onde chegam as partículas do vento solar que escapam da magnetosfera terrestre é a *termosfera* (figura 18), com uma densidade menor de moléculas com relação à primeira camada próxima à superfície. É a maior camada da atmosfera. A temperatura dessa camada aumenta conforme a elevação da altitude, devido à radiação solar. A quantidade de energia que incide do Sol é suficiente para elevar a temperatura até 2500°C,

porém esse calor não é transmitido, já que o ar é muito rarefeito nessa região, e não há contato suficiente entre as partículas (KARTTUNEN, 2016). É também nessa região que orbitam os ônibus espaciais.

Figura 18: Camadas da atmosfera terrestre.



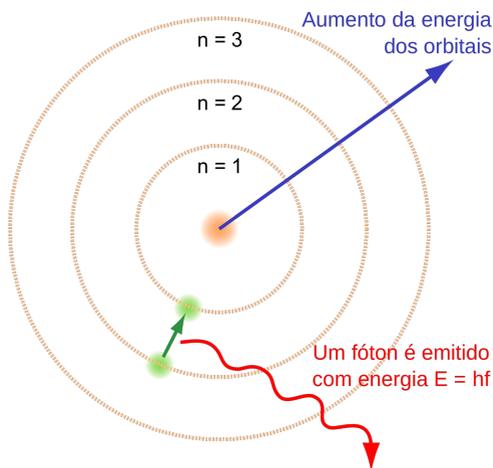
Fonte: POLON, 2018.

Nas colisões com os elétrons e prótons do vento solar, os átomos e moléculas presentes nessa parte da atmosfera saltam para níveis mais energéticos e, como não se podem manter nesse estado por muito tempo, retornam aos seus níveis de origem, devolvendo a energia extra na forma de radiação, por vezes, luz visível. Considerando as inúmeras colisões que ocorrem nessas situações, o resultado é a luz observada nas auroras.

Quando um átomo colide com outro ou com partículas carregadas, um elétron de uma de suas subcamadas externas recebe uma pequena quantidade de energia, fazendo com que o átomo passe de seu estado fundamental para um de seus estados excitados. O campo coulombiano da partícula incidente (projétil) pode atuar sobre um elétron de uma subcamada externa do átomo atingido (alvo), e fornecer a ele alguns elétrons-volt de energia de excitação (EISBERG; RESNICK, 1979). No processo de desexcitação (figura 19), o átomo que recebeu energia passa do estado inicial excitado para o estado fundamental através da emissão de fótons de baixas energias cujas frequências constituem seu *espectro ótico* ou *espectro de emissão*.

Em 1859, Kirchhoff e Bunsen deduziram a partir de suas experiências

Figura 19: Processo de desexcitação eletrônica.



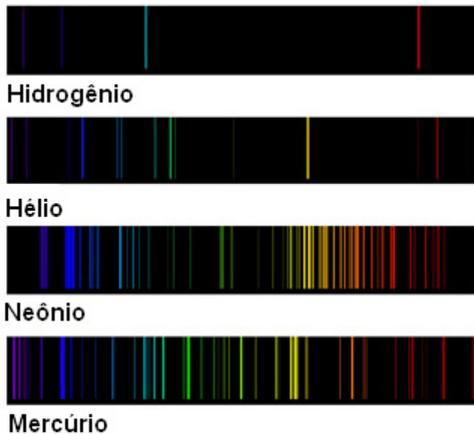
Fonte: WIKIPÉDIA, 2018.

que cada elemento, em determinadas condições emite um espectro característico, exclusivo de cada elemento (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009). Com isso, desenvolveu-se um novo método de análise, baseado nestas emissões, a chamada *espectroscopia*, de fundamental importância no estudo dos astros, uma vez que praticamente tudo o que se sabe a respeito da composição química deles vem de estudos das suas emissões espectrais.

A energia fornecida ao átomo para que ele altere o seu estado não pode possuir qualquer valor. Cada átomo é capaz de emitir ou absorver radiação eletromagnética somente em frequências específicas, o que torna a emissão uma característica particular de cada material. Na figura 20, encontram-se espectros de emissão de alguns átomos. É possível obter espectros assim por meio do aquecimento de um gás de determinado elemento, atravessando sua radiação através de um prisma. Dessa forma, como cada comprimento de onda tem uma deflexão diferente ao passar por outro meio, a radiação irá se separar nas frequências que são emitidas pelo gás. Observa-se isso na formação do arco-íris, porém de forma contínua, já que a luz do sol emite em todas as frequências.

No caso de moléculas, sabe-se que elas podem permanecer ligadas tanto em estados excitados quanto no estado fundamental. Os espectros de emissão e absorção das mesmas são devidos às transições entre os estados de energia permitidos, porém esses diagramas são relativamente complicados e diferem em muitos aspectos do caso atômico. Não se pode classificar os

Figura 20: Espectros de emissão de diferentes elementos.



Fonte: FOGAÇA, 2018.

estados segundo o momento angular orbital eletrônico, por exemplo, já que a força que se exerce sobre um elétron não é uma força central (numa molécula diatômica, por exemplo, há dois centros de atração nuclear), e o momento angular orbital não se conserva (EISBERG; RESNICK, 1979).

Além de que, a solução da equação de Schroedinger, mesmo para as moléculas mais simples, é muito difícil. Apesar disso, os resultados empíricos da espectroscopia molecular mostram que se pode considerar a energia de uma molécula como constituída de três partes principais: eletrônica, vibracional e rotacional (EISBERG; RESNICK, 1979). Para um dado estado eletrônico, têm-se grupos separados por intervalos de energia quase idênticos, que correspondem aos estados de vibração dos núcleos. Ainda, dentro de um estado vibracional, há uma estrutura fina de níveis atribuídos aos diferentes estados de rotação da molécula. Essa estrutura de níveis sugere que se pode obter uma solução aproximada para a equação de Schroedinger separando-a em três equações, uma descrevendo o movimento dos elétrons, outra as vibrações do núcleo e outra a rotação dos mesmos. Nas diferentes aproximações pode-se levar em conta o acoplamento ou não entre esses movimentos.

Da mesma forma, o espectro emitido por uma molécula pode ser dividido em três regiões espectrais correspondentes aos três diferentes tipos de transições entre os estados quânticos moleculares (EISBERG; RESNICK, 1979): no infravermelho remoto, observam-se os espectros de rotação, correspondentes às radiações emitidas em transições entre estados de rotação de uma molécula que possui um momento de dipolo elétrico; no infravermelho

lho próximo, observam-se os espectros de vibração-rotação, correspondentes às radiações emitidas em transições vibracionais de moléculas que possuem momento de dipolo elétrico, que comportam também mudanças nos estados de rotação; na região do visível e do ultravioleta, observam-se os espectros eletrônicos, correspondentes às radiações emitidas em transições eletrônicas.

No caso da colisão de elétrons e prótons com as moléculas da atmosfera, a luz emitida pode se manifestar em diferentes formas (longos arcos, cortinas se estendendo como fitas paralelas às linhas de campo magnético, manchas e véus) e também cores (vermelho, azul e verde) (SILVA, 2007), o que indica que, durante a ocorrência do fenômeno, essas moléculas recebem energia suficiente para sofrerem transições inclusive em nível eletrônico. A figura 21 retrata uma aurora boreal com algumas dessas cores. Uma descrição desse comportamento com relação aos comprimentos de onda observados é bastante complexa, já que envolvem fatores como a energia de incidência das partículas carregadas, a estrutura interna de cada molécula, e também a altitude de ocorrência da colisão (devido ao efeito de dispersão da luz).

Figura 21: Cores de uma aurora (boreal).



Fonte: BRAZIL ROCKET, 2018.

O oxigênio molecular, por exemplo, a cerca de 100 *km* de altitude (limite das auroras mais baixas), emite uma luz levemente esverdeada, enquanto que, acima de 300 *km*, emite luz vermelha ou, durante grandes tempestades magnéticas, um tom vermelho-sangue; moléculas de nitrogênio também produzem uma luz avermelhada, mas à alta atmosfera emitem em azul e violeta (ZÊNITE, 2018).

Um fato interessante é que as auroras não ocorrem somente no planeta Terra. Já foram observadas em Júpiter, Vênus, Saturno e Netuno (ZÊNITE, 2018). Aparentemente, no sistema solar, se o planeta possui alguma atmos-

fera gasosa, então também pode receber esse fenômeno.

3 O MODELO

A fim de possibilitar o estudo das auroras polares no ensino médio, e conjuntamente aproximar o conhecimento físico escolar da forma como o conhecimento científico é construído, nesse capítulo, será construído um modelo para a deflexão das partículas do vento solar aos polos geomagnéticos, ou seja, buscando responder à seguinte questão: por que as auroras ocorrem somente nos polos? Ao escolher-se esse recorte na construção do modelo, o enfoque, em termos de conteúdo físico, será em *força magnética sobre cargas*.

Os estágios de modelagem de Hestenes (1987) serão, em seguida, especificados para esse fenômeno, ressaltando-se que essas etapas tratam-se de escolhas, eficientes ou não, dependendo do objetivo do modelo, de forma que cada diferente descrição para o mesmo objeto/processo leva a um caminho diferente.

É importante reiterar também que essa construção já pronta será utilizada na sequência didática, proposta no capítulo seguinte, não por que estudantes de ensino médio não tenham capacidade de fazer suas próprias escolhas nas etapas de modelagem, mas por ter-se prezado por um tempo hábil de se apresentar uma abordagem nova (não habitual) em uma escola com duas aulas semanais. Após um primeiro trabalho como este, o professor terá mais liberdade para dar autonomia à turma nos processos de modelagem, podendo ter a rica experiência de comparar os diferentes modelos obtidos.

Como desvantagens nessa escolha, há o fato de os alunos não se envolverem ativamente na construção do modelo, sem autonomia para as escolhas tomadas, e ainda sem a comunicação de seus resultados para os colegas. No entanto, os outros benefícios da utilização da modelagem continuam convenientes, já que ainda propiciará maior aproximação e contextualização do conteúdo físico com fenômenos reais e com a construção da ciência, assim como o aparecimento de diversas representações e todas as outras promoções mencionadas.

3.1 DESCRIÇÃO

Nesse estágio, as descrições são estabelecidas. Primeiramente a descrição dos objetos, considerando as partículas carregadas e a Terra como objetos relevantes para o modelo, e obtendo as especificações:

- Descrição dos objetos. (a) Vento solar. Tipo: eletromagnético. Composição: elétrons e prótons (partículas puntiformes carregadas). Variá-

veis: carga, massa. (b) Terra. Tipo: eletromagnético. Composição: grande imã (de campo magnético aproximadamente uniforme). Variáveis: campo magnético.

Em seguida, a descrição do processo, que envolve escolha de sistema de referência e distinção das variáveis de movimento, como o exposto:

- Descrição do processo. Sistema de referência: centrado na partícula. Variável de movimento: velocidade.

Por último, na descrição da interação, será considerada a interação entre as partículas carregadas e o campo magnético da Terra, com as seguintes caracterizações:

- Descrição da interação. Agentes: partícula carregada e Terra. Tipo de interação: eletromagnética. Variável de interação: força magnética.

A partir dessas especificações, percebe-se que não se considera a influência do campo magnético do Sol na magnetosfera terrestre, de forma que as linhas de campo magnético da Terra são simétricas dos dois lados, diurno e noturno. Assim como não são levadas em consideração as variações naturais desse campo, e, principalmente, ele é tido como sendo aproximadamente uniforme, com as linhas de campo no sentido sul-norte geográfico.

3.2 FORMULAÇÃO

No estágio de formulação, aplicam-se as leis físicas de interação e de movimento para determinar as equações específicas do modelo. A equação física utilizada será a da força magnética sobre uma carga em movimento (equação (2.1)):

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}. \quad (3.1)$$

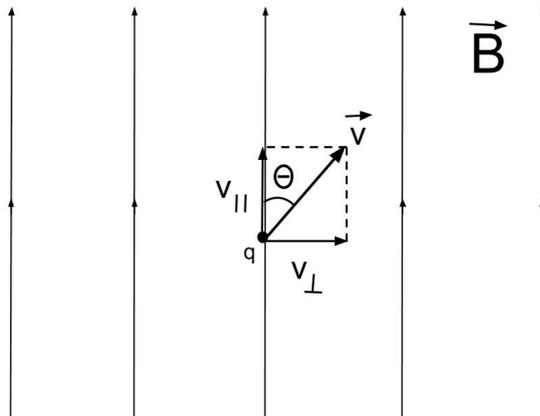
Ou ainda, em módulo,

$$F_B = qvB \sin \theta, \quad (3.2)$$

em que θ é o ângulo entre \vec{v} e \vec{B} (partindo do vetor \vec{v} para o vetor \vec{B} no sentido anti-horário).

Considera-se uma partícula de carga q entrando na área de campo magnético constante e uniforme da Terra, \vec{B} , com uma velocidade que faz um ângulo θ com relação a \vec{B} , tendo uma componente paralela e outra perpendicular ao campo, como mostra a figura 22.

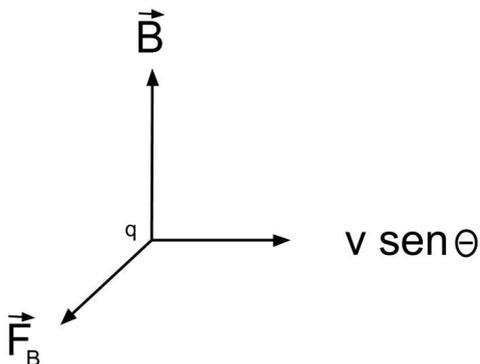
Figura 22: Carga q entrando no campo magnético.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A força magnética que irá agir na carga será devida à componente perpendicular da velocidade da partícula, e pode ser representada na figura 23.

Figura 23: Força magnética para a parte perpendicular da velocidade.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Como a carga continuará sofrendo a influência do campo magnético uniforme, essa força atuará como uma força centrípeta, de forma que:

$$F_B = F_{centrip} \quad (3.3)$$

$$\Rightarrow qv \sin \theta B = \frac{mv^2 \sin^2 \theta}{r} \quad (3.4)$$

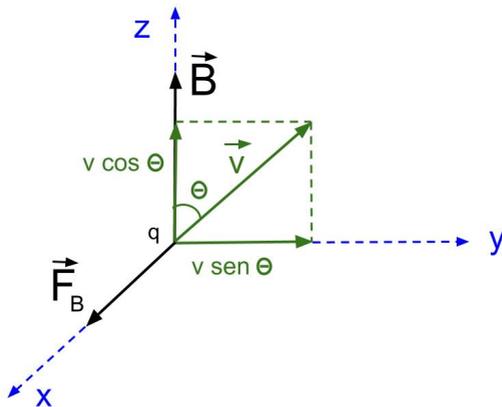
$$\Rightarrow r = \frac{mv \sin \theta}{qB}. \quad (3.5)$$

E esse será o raio da trajetória circular da partícula, dependendo inversamente da magnitude do campo magnético, o que é facilmente intuitivo: quanto maior a intensidade do campo magnético, maior será a deflexão a partícula. A velocidade angular é dada por

$$\omega = \frac{v \sin \theta}{r} = v \sin \theta \frac{qB}{mv \sin \theta} = \frac{qB}{m}, \quad (3.6)$$

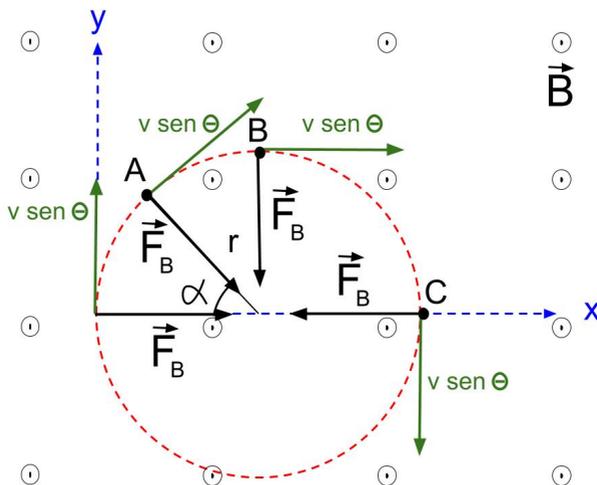
positiva no sentido horário quando se olha de cima no plano xy . A carga realizará um movimento circular uniforme, considerando-se a parte perpendicular da velocidade ($v \sin \theta$). Escolhendo o sistema referencial dado na figura 24, o movimento da carga no plano xy , devido à constante deflexão pela força magnética tem a trajetória explicitada na figura 25.

Figura 24: Sistema de coordenadas.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Devido à componente paralela da velocidade, a trajetória no plano xz é traçada como na figura 26. Os pontos A , B e C são equivalentes aos mesmos

Figura 25: Trajetória circular no plano xy .

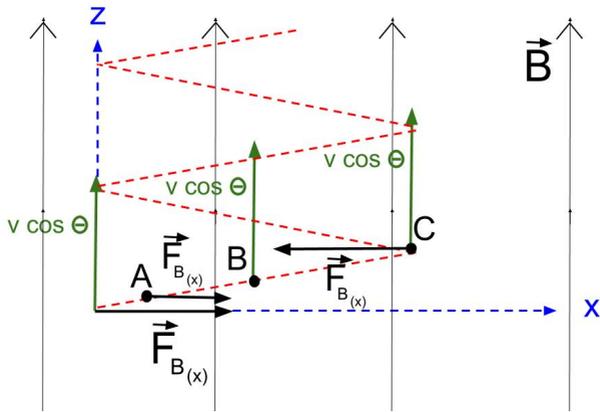
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

na figura 25. Pode-se perceber que, no ponto C , no plano xy , o vetor força magnética está apontando para a direção negativa do eixo x , assim como o faz no plano xz , sendo oposto ao ponto de origem nos dois planos, o que faz com que a carga tenha esse movimento oscilatório. A diferença entre as trajetórias nos dois planos dá-se devido à velocidade, em um dos planos (xy), mudar sua direção original por conta da sua relação perpendicular com o campo magnético.

Tendo essas informações, pode-se traçar a trajetória em três dimensões, como é feito na figura 27. Esse tipo de movimento é denominado de *movimento helicoidal uniforme*. O passo, representado por p na figura, trata-se da distância que a partícula percorre em uma revolução na trajetória helicoidal, e pode ser calculado através da relação do período:

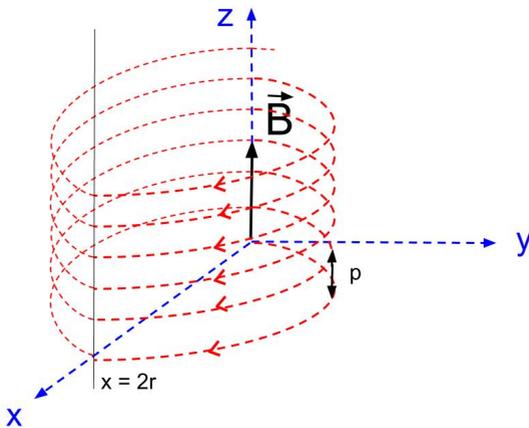
$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}, \quad (3.7)$$

onde se usou da relação da velocidade angular (3.6). Sabendo-se que uma distância, em módulo, é igual ao valor da velocidade multiplicado pelo tempo levado para percorrê-la, então o passo será igual à velocidade na direção y multiplicado pelo período, ou seja,

Figura 26: Trajetória no plano xz .

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 27: Trajetória helicoidal da partícula.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

$$p = v_y T = \frac{2\pi m v \cos \theta}{qB}. \quad (3.8)$$

Essa distância então dependerá de todas as variáveis da relação da força magnética, exceto da parte paralela da velocidade.

Por fim, como o campo é uniforme, não há aprisionamento das cargas, elas espiralam ao redor das linhas de campo magnético, e vão direto para os polos. Como o objetivo é a modelização do fenômeno das auroras, com enfoque na descrição da deflexão das cargas para os polos, essa consideração não traz tantas perdas, já que responde a essa questão de forma mais básica. Caso o campo não fosse uniforme, o aprisionamento das partículas precisaria ser considerado, e, para um fluxo intenso do vento solar, haveria uma corrente elétrica considerável, com a indução de um novo campo magnético, que permite que as cargas passem. Como, para haver o fenômeno das auroras polares, é preciso haver esse fluxo intenso, então, aproximar já o campo magnético como sendo uniforme, de maneira que as partículas passam livremente para os polos, torna o cálculo mais simples.

3.3 RAMIFICAÇÃO

No estágio de ramificação, as propriedades e os casos especiais do modelo são estudados. Esse passo será feito através da aplicação de valores diferentes para: ângulos entre a velocidade da partícula e o campo magnético terrestre; e cargas e massas (prótons e elétrons). O valor utilizado para o módulo do campo magnético terrestre, buscado na literatura como uma média¹, será de $40 \mu T$.

Primeiramente, tratando de prótons, com carga $q = 1,6 \times 10^{-19} C$ e massa $m = 1,67 \times 10^{-27} kg$, considera-se que os mesmos incidam a uma velocidade de $v = 400 km/s$ com os seguintes ângulos com relação ao campo magnético terrestre (em qualquer ponto da órbita, já que é considerado uniforme):

- $\theta = 0^\circ$

Nesse caso, o raio da trajetória (equação (3.5)) será:

$$r = \frac{mv \sin(0^\circ)}{qB} = 0, \quad (3.9)$$

pois seno de zero é igual a zero. Consequentemente não haverá movimento circular, o que é esperado devido à não atuação da força magnética para cargas com velocidade paralela ao campo.

- $\theta = 90^\circ$

¹Os valores encontrados foram entre $30 \mu T$, na região equatorial, e $60 \mu T$, nos polos (ALMEIDA; MARTIN, 2007). Assim, o valor médio é de $40 \mu T$.

O raio da trajetória será igual a

$$r = \frac{mv \sin(90^\circ)}{qB} = \frac{mv}{qB} \quad (3.10)$$

$$\Rightarrow r = \frac{(1,67 \times 10^{-27} \text{ kg})(400 \times 10^3 \text{ m/s})}{(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(40 \times 10^{-6} \text{ T})} = 104 \text{ m}. \quad (3.11)$$

A velocidade angular será dada por

$$\omega = \frac{qB}{m} = \frac{(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(40 \times 10^{-6} \text{ T})}{(1,67 \times 10^{-27} \text{ kg})} = 3,83 \times 10^3 \text{ rad/s}, \quad (3.12)$$

independendo do valor de θ (desde que haja uma componente perpendicular, se não, o valor será indeterminado), somente do módulo da velocidade.

O passo (equação (3.8)) então será:

$$p = \frac{2\pi mv \cos(90^\circ)}{qB} = 0, \quad (3.13)$$

pois cosseno de 90° é zero. Como não há passo, a partícula permanece em movimento circular no mesmo plano, sem seguir a linha de campo, o que é esperado quando a partícula não possui componente da velocidade paralelo ao campo.

- $\theta = 45^\circ$

O raio da trajetória será:

$$r = \frac{mv \sin(45^\circ)}{qB} = 73,8 \text{ m}, \quad (3.14)$$

sendo menor do que para $\theta = 90^\circ$, já que aqui a mesma intensidade de velocidade é dividida em duas componentes, e, quanto menor a velocidade perpendicular, menor será a distância que a partícula percorre enquanto está sendo puxada pela força centrípeta, tornando o raio da sua trajetória menor.

O passo será dado por

$$p = \frac{2\pi mv \cos(45^\circ)}{qB} = 656 \text{ m}. \quad (3.15)$$

Com velocidade na direção z com que sobe para o polo norte geográfico dada por

$$v_z = v \cos(45^\circ) = 2,83 \times 10^5 \text{ m/s}. \quad (3.16)$$

- $\theta = 225^\circ$

O raio da trajetória será:

$$r = \frac{mv \sin(225^\circ)}{qB} = -73,8 \text{ m}, \quad (3.17)$$

onde o sinal negativo significa que a partícula girará no sentido oposto ao definido na seção anterior, ou seja, no sentido anti-horário.

O passo será dado por

$$p = \frac{2\pi mv \cos(45^\circ)}{qB} = -656 \text{ m}, \quad (3.18)$$

significando também que a partícula seguirá seu movimento helicoidal no sentido oposto ao que foi definido, ou seja, no sentido negativo do eixo z , com velocidade com que desce para o polo sul geográfico dada por

$$v_z = v \cos(45^\circ) = -2,83 \times 10^5 \text{ m/s}. \quad (3.19)$$

Pode-se concluir que, no caso de prótons, as partículas que incidem no campo magnético terrestre, com velocidade que tenham um ângulo $0^\circ < \theta < 180^\circ$ com relação à \vec{B} (isso só pode ocorrer quando vêm pelo lado diurno da magnetosfera, como mostra a figura 28) seguem em movimento helicoidal uniforme para o polo norte geográfico, formando as auroras boreais. Enquanto que os prótons com $180^\circ < \theta < 360^\circ$ (pelo lado noturno) fazem o mesmo movimento, porém para o sul geográfico, formando as auroras austrais. A figura 28 mostra também as trajetórias dos prótons nos dois casos.

Agora, tratando de elétrons, com carga $q = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ e massa $m = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, considerando também uma velocidade de $v = 400 \text{ km/s}$ com os seguintes ângulos com relação ao campo magnético terrestre:

- $\theta = 0^\circ$

Mesmo caso dos prótons, sem atuação da força magnética.

- $\theta = 90^\circ$

O raio da trajetória será igual a

$$r = \frac{mv \sin(90^\circ)}{qB} = -5,69 \times 10^{-2} \text{ m}. \quad (3.20)$$

E o sinal vem da carga negativa, e descreve a trajetória circular também no sentido anti-horário.

A velocidade angular será dada por

$$\omega = \frac{qB}{m} = -7,03 \times 10^3 \text{ rad/s}, \quad (3.21)$$

independendo do valor de θ (desde que haja uma componente perpendicular, se não, o valor será indeterminado), somente do módulo da velocidade.

O passo nesse caso também será zero, assim como para prótons.

- $\theta = 45^\circ$

Nesse caso, o raio da trajetória é igual a

$$r = \frac{mv \sin(45^\circ)}{qB} = -4,02 \times 10^{-2} \text{ m}, \quad (3.22)$$

sendo menor bem do que para o próton, já que sua massa é menor, e isso indica que seja mais facilmente defletido, e ainda no sentido oposto.

O passo será dado por

$$p = \frac{2\pi mv \cos(45^\circ)}{qB} = -0,253 \text{ m}, \quad (3.23)$$

também menor do que para prótons, e no sentido de z negativo, com velocidade

$$v_z = v \cos(45^\circ) = -2,83 \times 10^5 \text{ m/s}. \quad (3.24)$$

- $\theta = 225^\circ$

O raio da trajetória tem valor

$$r = \frac{mv \sin(225^\circ)}{qB} = 4,02 \times 10^{-2} \text{ m}, \quad (3.25)$$

com movimento no sentido horário.

O passo será igual a

$$p = \frac{2\pi mv \cos(45^\circ)}{qB} = 0,253 \text{ m}, \quad (3.26)$$

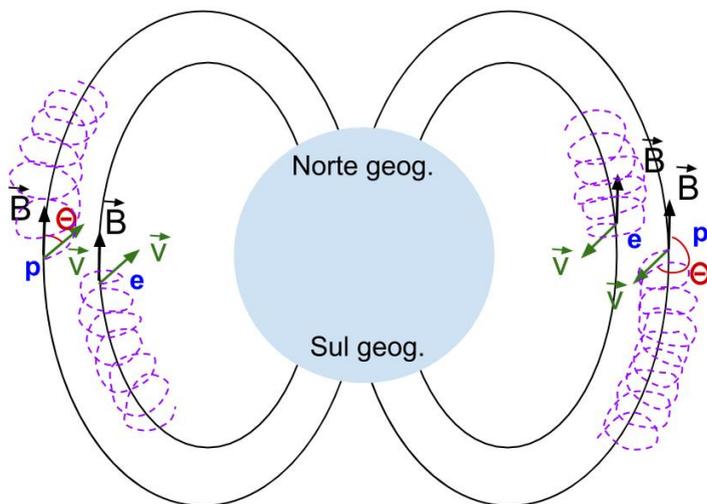
significando que a partícula seguirá seu movimento helicoidal no sentido positivo do eixo z , com velocidade com que sobe para o polo norte geográfico dada por

$$v_z = v \cos(45^\circ) = 2,83 \times 10^5 \text{ m/s}. \quad (3.27)$$

Pode-se concluir novamente que, no caso de elétrons, contrariamente aos prótons, as partículas que incidem no campo magnético terrestre, com

velocidade que tenham um ângulo $0^\circ < \theta < 180^\circ$ com relação à \vec{B} (ocorrendo quando vêm pelo lado diurno da magnetosfera), seguem em movimento helicoidal uniforme para o polo sul geográfico, formando as auroras austrais. Enquanto que os elétrons com $180^\circ < \theta < 360^\circ$ fazem o mesmo movimento, porém para o norte geográfico, formando as auroras boreais. Dessa forma, nos dois polos há formação das auroras tanto por partículas negativas quanto por positivas. A figura 28 também mostra as trajetórias para elétrons nos dois casos.

Figura 28: Trajetórias de prótons e elétrons no campo magnético terrestre de acordo com o modelo.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Outra observação que pode ser feita é que esses arcos que as cargas fazem ao redor das linhas de campo são muito pequenos com relação às distâncias astronômicas, conforme mostram os valores de r , enquanto que a velocidade com que os percorrem é bastante alta. Já a velocidade do eixo z é menor do que a de incidência, porém ainda bastante alta. De forma que um próton, com a velocidade indicada e com $\theta = 45^\circ$, chega ao polo norte geográfico no intervalo de tempo de

$$\Delta t = \frac{d}{v_z} = \frac{2R}{v \cos(45^\circ)} = 45,0 \text{ s} \quad (3.28)$$

em que a distância considerada (de onde a partícula encontra a linha de campo, até o polo), por suposição, foi de duas vezes o raio médio terrestre ($R = 6371 \text{ km}$).

3.4 VALIDAÇÃO E LIMITAÇÕES

Por fim, o estágio de validação é responsável pela avaliação empírica do modelo ramificado, que, nesse caso, envolverá comparações dos resultados com dados já existentes. Como não se encontram facilmente na literatura valores como os que foram obtidos no modelo, o que será comparado para o teste de validação será o fato de que as auroras ocorrem somente nos polos, e, nesse ponto, o modelo cumpre seu papel.

O que se pode destacar então são as limitações do modelo. Essa discussão será baseada nas escolhas simplificadas feitas na primeira seção desse capítulo, que são:

- Campo magnético terrestre uniforme

Sabe-se que o campo magnético terrestre não é uniforme, sendo mais intenso próximo aos polos e menos intenso nas regiões equatoriais. Como o modelo foi construído com a aproximação de que o campo magnético é uniforme, e também não sofrendo suas variações naturais (mudanças na localização dos polos), então aperecerão algumas consequências dessa conjectura. No modelo, todas as partículas carregadas que encontram as linhas de campo magnéticas da Terra, e têm as especificações feitas nos cálculos, migrarão para os polos. Esse resultado não é observado, já que somente quando há um fluxo maior de vento solar é que acontecem as auroras polares e os distúrbios nos equipamentos eletromagnéticos do planeta. Sem essa aproximação, as cargas ficariam aprisionadas nas linhas de campo, subindo e descendo, de forma que o fenômeno só ocorreria num fluxo muito grande de cargas, o que estaria mais condizente com as observações.

- Magnetosfera sem influência da heliosfera

Com essa aproximação, a magnetosfera é homogênea nos lados diurno e noturno, fazendo com que as partículas não tenham escape quando entram nas linhas de campo magnético. Se a influência da heliosfera fosse considerada, a magnetosfera funcionaria como um escudo, com as partículas do vento solar saindo pela cauda formada no lado noturno, o que também está de acordo com a proteção magnética que se sabe existir no planeta.

Porém, para um estudo simplificado, com enfoque no conteúdo de força magnética sobre cargas e na descrição do fenômeno das auroras po-

lares, o modelo permite entender a migração das partículas para os polos magnéticos terrestres.

4 SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Neste momento, o modelo construído para explicar a ocorrência das auroras somente nos polos terrestres será utilizado em uma sequência didática para o ensino do conteúdo de força magnética sobre cargas no terceiro ano do ensino médio. Os objetivos gerais e específicos de cada aula serão elucidados, assim com uma descrição das oito aulas desenvolvidas para essa sequência.

4.1 OBJETIVOS

4.1.1 Objetivos gerais

Como objetivo geral para o presente módulo de ensino, destaca-se:

- Contribuir com a formação crítica e científica dos alunos a partir de uma abordagem que promova a construção de uma imagem mais coerente da Física.

4.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos para o presente módulo de ensino, pode-se listar:

- Compreender que a Física é uma construção humana;
- Apresentar caráter crítico com relação ao conhecimento físico;
- Entender que a Física utiliza-se de modelos para descrever fenômenos.
- Realizar as etapas de modelização de um fenômeno real.
- Testar a plausibilidade e a validade dos modelos estudados;
- Usar-se de diferentes interpretações para um mesmo processo;
- Aplicar o conhecimento adquirido sobre a influência do campo magnético sobre uma carga no fenômeno de auroras polares;
- Dominar a relação vetorial entre a velocidade da carga, o campo magnético do meio e a força magnética sofrida pela carga;
- Aplicar o conhecimento adquirido a partir da problematização de uma situação a outras situações físicas.

4.2 DESENVOLVIMENTO DAS AULAS

AULA 1 - COMO A FÍSICA ESTUDA OS FENÔMENOS DA NATUREZA?

Tema: Modelos e a construção do conhecimento físico.

Objetivos:

- Perceber a importância dos modelos na Física;
- Detectar os processos físicos envolvidos na formação das auroras polares.

Recursos:

- Computador e projetor;
- Quadro branco e caneta;
- Anexo A: Texto de divulgação: O que é a aurora polar? Como ela acontece?;
- Anexo B: Fluxograma.

Momentos:

Iniciar o módulo de ensino com uma questão escrita no quadro: “Como a Física estuda os fenômenos da natureza?”. Quando os alunos forem apresentando respostas a essa pergunta, o professor irá anotando no quadro palavras-chave. Destacar na lista de palavras aquelas que estiverem associadas com modelos, idealizações, representações, descrição de fenômenos. Discutir que a Física utiliza-se de modelos para descrever fenômenos e fazer previsões sobre eles, e que os modelos são representações do objeto real de estudo. Apresentar exemplos de fenômenos que são modelizados pela Física utilizando imagens em projetor, como de um lançamento oblíquo e do modelo planetário (8 minutos).

Em seguida, questionar se é possível modelizar o fenômeno das auroras polares (2 minutos).

Entregar um texto (anexo A) para leitura individual. Trata-se de uma matéria de divulgação, publicada no site Diário Online, que apresenta algumas informações sobre o fenômeno das auroras polares. Tais informações serão trazidas somente para uma apresentação geral do fenômeno. Os alunos terão cerca de 10 minutos para leitura do texto (10 minutos).

Após a leitura, convidar a turma a dividir-se em grupos de, em média, cinco alunos. Eles terão a atividade inicial de extrair do texto todas as expressões que fazem parte das causas do fenômeno e que identificarem como sendo pertencentes à área da física. Os grupos deverão anotar essas expressões para dividir com a turma posteriormente. O objetivo dessa atividade é o de iniciar uma exploração física do fenômeno, buscando quais são os estudos que precisam ser feitos para a construção do modelo (10 minutos).

Cada grupo listará as expressões destacadas, e estas serão escritas no quadro. Com isso, o professor fará um resumo no quadro, juntamente com a turma, em forma de fluxograma, de como essas expressões estudadas na física estão presentes na formação das auroras polares. Um exemplo de fluxograma está contido no Anexo B (15 minutos).

AULA 2 - AURORAS SÓ NOS POLOS?

Tema: Auroras polares e a Física.

Objetivos:

- Expressar conhecimentos prévios sobre o fato de as auroras ocorrerem somente nos polos;
- Detectar os processos físicos relevantes para a compreensão dessa conjuntura;
- Entender como o vento solar é formado e como afeta o sistema solar.

Conteúdo:

- Atividade magnética do Sol.

Recursos:

- Computador e projetor;
- Quadro branco e caneta.

Momentos:

Lançar as seguintes questões para que os grupos discutam: Como se pode explicar o fato de esse fenômeno só ocorrer nos polos? Em qual(is) etapa(s) do fluxograma pode-se obter essa resposta? Os grupos terão 10 minutos para discutir. O objetivo, nesse momento inicial, não é buscar respostas esclarecedoras, mas proporcionar reflexão e direcionar para o foco do estudo: o conteúdo de força magnética sobre cargas (10 minutos).

Após esse tempo, fazer uma discussão geral entre os grupos para exporem as etapas consideradas importantes e também as suas ideias iniciais. O papel do professor será o de questionar posicionamentos e lançar dúvida sobre o assunto, fazendo com que os alunos sintam a necessidade da aquisição de conhecimentos que ainda não detêm. Ao final, destacar que as etapas determinadas como importantes para a compreensão do problema precisam ser exploradas como parte do processo de modelização do fenômeno (15 minutos).

Como sugere o fluxograma, a exploração do fenômeno começará pelo estudo da atividade magnética do Sol. Prosseguir a aula com uma exposição, através de slides, de como se dá a formação do vento solar, apresentado: uma revisão sobre linhas de campo magnético, externando que, assim como uma carga elétrica altera as propriedades da região a sua volta, formando um campo elétrico, o ferro com propriedades magnéticas (ímã) produz um campo magnético, e que a essas propriedades de cada ponto do espaço, pode-se associar um valor numérico, de forma que as linhas de força auxiliam nessa associação; as camadas do Sol e a sua composição, indicando que o vento solar origina-se da camada superior, a coroa solar, que possui temperatura bastante alta e densidade baixa, de forma que a gravidade do Sol não consegue segurar todas as partículas dessa camada; as linhas de campo magnético do Sol, que transportam as partículas que escapam da coroa, formando o campo magnético interplanetário, e carregando o vento solar; a composição e a extensão do vento solar, apontando que as partículas que o compõem são basicamente prótons e elétrons, com velocidades médias de 400 km/s nas proximidades da Terra; a tempestade solar e suas consequências para a vida na Terra, afirmando que durante tempestades magnéticas do Sol, o fluxo do vento solar pode ser bem mais forte, afetando as atividades de caráter eletromagnético na Terra, como as estações de rádio e os satélites que orbitam o planeta. Retornar, por fim, para o fluxograma e discutir as etapas já aprofundadas e as que ainda precisam ser (20 minutos).

AULA 3 - ASSIM NA TERRA COMO NO ESPAÇO.

Tema: Campo magnético e cargas em movimento.

Objetivos:

- Conhecer o comportamento do campo magnético terrestre;
- Relacionar o campo magnético terrestre com o campo magnético de um ímã;
- Dominar a relação vetorial entre a velocidade da carga, o campo magnético do meio e a força sofrida pela carga.

Conteúdos:

- Atividade magnética da Terra;
- Influência do campo magnético sobre uma carga em movimento.

Recursos:

- Computador e projetor;
- Quadro branco e caneta.
- Vídeo: Experimento de simulação das linhas de campo geomagnéticas.

Momentos:

Após uma breve revisão do que foi feito nas aulas anteriores, o campo magnético terrestre será estudado. Para isso, mostrar o vídeo (figura 29) de um experimento que simula as linhas de campo magnético terrestres, com um ímã, uma bola de isopor e limalhas de ferro (8 minutos).

Figura 29: Experimento em vídeo de simulação das linhas de campo geomagnéticas.



Campo magnético terrestre

789.962 visualizações

2 MIL 180 COMPARTILHAR ...



fq-experimentos
Publicado em 30 de mar de 2013

INSCREVER-SE 96 MIL

Fonte: Disponível em

<<https://www.youtube.com/watch?v=0v7EWKk6MT8>>.

Após isso, relembrar com imagens o modelo de campo magnético terrestre que considera a Terra como um gigantesco ímã, com as linhas de campo saindo do polo norte do ímã (próximo ao Polo Sul da Terra) para o polo sul do ímã (próximo ao Polo Norte da Terra). Abordar também a origem desse

campo e comparar com o modelo que considera a influência da heliosfera no mesmo. Retornar para o fluxograma e discutir as etapas já aprofundadas e as que ainda precisam ser (15 minutos).

Introduzir no quadro o conteúdo de força magnética sobre cargas, seguindo os tópicos: equação da força magnética sobre uma carga em movimento e informações importantes resumidas na equação; regra da mão direita para o produto vetorial; citação de algumas aplicações desse conteúdo (tubo de raios catódicos das TVs antigas, aceleradores cíclotrons e síncrotrons de partículas) (22 minutos).

AULA 4 - CARGAS TAMBÉM SENTEM.

Tema: Campo magnético e cargas em movimento.

Objetivos:

- Relacionar a força magnética sofrida pela carga com uma força centrípeta.

Conteúdos:

- Trajetória de uma carga em um campo magnético;
- Composição da atmosfera terrestre.

Recursos:

- Quadro branco e caneta.

Momentos:

Continuação do conteúdo com os tópicos: exemplo de aplicação da equação a ser resolvido em conjunto com a turma; movimento circular de uma carga em campo magnético uniforme (obtenção do raio e da velocidade angular); movimento helicoidal de uma carga em campo magnético uniforme (obtenção do passo e da velocidade nessa direção); movimento de uma carga em um campo magnético não uniforme e a garrafa magnética; cinturões de radiação de Van Allen e as auroras polares. Retornar para o fluxograma e discutir as etapas já aprofundadas e as que ainda precisam ser (42 minutos).

Formar grupos de quatro pessoas para a próxima aula, e pedir para pesquisarem sobre a composição da atmosfera e as colisões das cargas com essas moléculas, e trazerem como trabalho para a próxima aula (3 minutos).

AULA 5 - CONSTRUINDO UM MODELO.

Tema: Estágios de modelagem: descrição e formulação.

Objetivos:

- Conhecer as etapas de modelagem;
- Descrever os objetos, o processo e as interações do modelo;
- Aplicar a equação da força magnética sobre uma carga para o modelo;
- Usar-se de diferentes interpretações para um mesmo processo;
- Formular um modelo que descreva o aparecimento das partículas do vento solar nos polos geomagnéticos.

Conteúdos:

- Força magnética sobre cargas.

Recursos:

- Quadro branco e caneta;
- Anexo C: Estágio de descrição;
- Anexo D: Estágio de formulação.

Momentos:

Os grupos deverão se reunir. Enquanto isso, fazer uma breve revisão do que foi feito nas aulas anteriores (5 minutos).

Entregar atividade (vide anexo C) que corresponde ao estágio de descrição no processo de modelagem. Como um aprofundamento das etapas do fluxograma já foi feito, guiar os grupos, através de uma discussão geral, a descreverem o conjunto de nomes e variáveis descritivas para o modelo, junto com as interpretações físicas para todas as variáveis, preenchendo as tabelas de acordo com a descrição da página 57. Explicar antes como funciona essa etapa e destacar a importância desse estágio no processo de modelagem, e como ela influencia no modelo obtido ao final, dependendo das escolhas e aproximações feitas (15 minutos).

Iniciar a segunda etapa: o estágio de formulação. Explicar antes como funciona esse estágio. As questões da atividade do anexo D irão guiá-los a aplicarem as leis físicas para o objeto modelado, determinando as equações específicas para o objeto modelado. Passar nos grupos prestando auxílio, e ir ao quadro quando houverem dúvidas generalizadas (25 minutos).

AULA 6 - CONSTRUINDO UM MODELO - PARTE 2.

Tema: Estágios de modelagem: formulação e ramificação.

Objetivos:

- Conhecer as etapas de modelagem;
- Formular um modelo que descreva o aparecimento das partículas do vento solar nos polos geomagnéticos;
- Identificar e explorar os casos especiais do modelo;
- Aplicar as equações obtidas para diferentes ângulos, para cargas positiva e negativa;
- Interpretar os valores obtidos para os casos especiais.

Conteúdos:

- Força magnética sobre cargas.

Recursos:

- Quadro branco e caneta;
- Anexo D: Estágio de formulação;
- Anexo E: Estágio de ramificação.

Momentos:

Continuação da formulação do modelo (10 minutos).

Iniciar a terceira etapa: ramificação. Explicar antes como funciona esse estágio. As questões da atividade do anexo E guirão para a aplicação de casos particulares de ângulos entre \vec{v} e \vec{B} , para prótons e para elétrons. E também para a representação do modelo como na figura 28 (30 minutos).

Recolher as atividades dos grupos. Os que não terminaram, poderão concluir na aula seguinte.

AULA 7 - EM BUSCA DE UM MODELO MELHOR.

Tema: Estágio de modelagem: validação.

Objetivos:

- Conhecer as etapas de modelagem;
- Avaliar se o modelo obtido responde a questão inicial;
- Identificar as limitações do modelos a partir das idealizações feitas.

Conteúdos:

- Força magnética sobre cargas.

Recursos:

- Quadro branco e caneta;
- Anexo F: Estágio de validação.

Momentos:

Tempo para conclusão da etapa anterior, caso necessário (10 minutos).

Iniciar a última etapa: validação. Novamente, serão guiados pelas questões da atividade do anexo F (15 minutos).

Por fim, discutir as limitações do modelo obtido. Propor que os grupos falem sobre a validade do modelo. Guiar a discussão com as seguintes questões: O modelo obtido possui limitações? É suficiente para a descrição do fenômeno? Responde à questão inicial do por quê as auroras ocorrem só nos polos? Quais foram as considerações e aproximações feitas? Essa consideração está de acordo com o objeto real? (15 minutos).

AULA 8 - O QUE APRENDI?

Tema: Retrospectiva e fechamento.

Objetivos:

- Conhecer as etapas de modelagem;
- Auto-avaliar-se quanto à evolução de aprendizagem;
- Compreender como a Física estuda os fenômenos da natureza.

Conteúdos:

- Força magnética sobre cargas.

Recursos:

- Quadro branco e caneta.

Momentos:

Recolher as atividades do processo de modelagem (2 minutos).

Recolher as atividades, e fazer uma retrospectiva de todas as etapas de modelagem, seguindo os passos dos questionários, resolvendo rapidamente as equações, e tirando as dúvidas que surgirem (25 minutos).

Propor discussão e comentários sobre o que os alunos aprenderam com esse processo, e repetir a questão inicial: “Como a Física estuda os fenômenos da natureza?” (18 minutos).

4.3 AVALIAÇÃO

Como avaliação dos estudantes, a partir do que é feito nessa sequência didática, pode-se considerar:

- Elaboração da pesquisa sobre a atmosfera e as colisões de prótons e elétrons com as moléculas que a compõem;
- Desenvolvimento das atividades dos estágios de modelagem como avaliações para cada grupo;
- Dedicção na participação das discussões e do trabalho em equipe.

5 ASPECTOS METODOLÓGICOS

A sequência didática produzida foi aplicada em uma turma de terceiro ano do ensino médio, como será descrito a seguir.

5.1 DESCRIÇÃO DA INSTITUIÇÃO

O conhecimento da escola e de seu contexto é relevante para o planejamento e a análise das aulas, já que a educação não pode ser dissociada dos objetos e das características das comunidades escolares a que se destinam. Na prática, o documento do *Projeto Político-Pedagógico* (PPP) é que estipula quais são os objetivos da instituição e o que a escola, em todas as suas dimensões, pode fazer para alcançá-los, tratando-se inclusive do que será ensinado, e quais serão as metodologias e as diretrizes adotadas para avaliação da aprendizagem.

O Instituto Federal Catarinense Campus Videira, segundo a página do campus, iniciou suas atividades pedagógicas em 6 de março de 2006, como extensão da Escola Agrotécnica Federal de Concórdia (EAFC). O curso técnico Agrícola com habilitação em Agropecuária e ênfase na Gestão da Propriedade Familiar foi o pioneiro da unidade.

Dados históricos do site da instituição apontam que, com a publicação da lei que criou os Institutos Federais, em 29 de dezembro de 2008, as Escolas Agrotécnicas de Concórdia, Sombrio e Rio do Sul foram integradas, e passaram a ser campus do Instituto Federal Catarinense (INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE VIDEIRA, 2018a). A partir de 7 de janeiro de 2010, o Ministério da Educação estabeleceu a relação de todos os campus que integrariam cada um dos 38 IF's criados no Brasil (INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE VIDEIRA, 2018a). Com isso, a unidade que funcionava em Videira como extensão de Concórdia foi elevada à condição de campus Videira do Instituto Federal Catarinense, com autonomia didática, disciplinar, administrativa, patrimonial e financeira. O quadro de servidores é composto por técnicos administrativos e docentes, totalizando 131, e contando com cerca de 1000 alunos entre todas as modalidades de ensino (INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE VIDEIRA, 2018a).

A proposta do IFC,

a partir de uma gestão democrática, é aproximar o diálogo com a realidade local e regional na busca de soluções, em especial, àquelas relacionadas com a educação profissional, reafirmando o compromisso da oferta

de educação pública e gratuita de qualidade em todos os níveis e modalidades para os catarinenses (INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE VIDEIRA, 2018b).

O objetivo do campus Videira é de “proporcionar educação profissional, atuando em ensino, pesquisa e extensão comprometidos com a formação cidadã, a inclusão social e o desenvolvimento regional” (INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE VIDEIRA, 2018b).

O curso de aplicação das aulas foi o Integrado Técnico em Eletroeletrônica, em que o futuro profissional poderá, segundo a página, planejar, executar e avaliar a implementação de projetos e a manutenção de sistemas eletroeletrônicos de operação de máquinas elétricas, distribuição de energia elétrica, sistemas de potência, instalações elétricas residenciais, prediais e industriais, sistemas de comunicação, instrumentação, informática e controle de automação (INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE VIDEIRA, 2018c). A carga horária é de 3586 horas (três anos), incluindo 240 horas para estágio supervisionado, com períodos matutino e vespertino. Há cinco laboratórios de eletroeletrônica (figura 30) e 7 laboratórios de informática (INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE VIDEIRA, 2018c).

Figura 30: Laboratório de instalações elétricas (IFC - Videira).



Fonte: INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE VIDEIRA, 2018c.

Os *princípios Filosóficos e Pedagógicos* do curso, como constam no site,

no contexto mais amplo da prática social, devem contemplar a concepção de homem, de mundo e de sociedade; compromisso social; defesa da escola pública, gratuita e de qualidade; valorização profissional; e defesa das políticas de inclusão social. E, no contexto da prática pedagógica, aponta-se, entre outros, para a superação do autoritarismo; o trabalho coletivo interdisciplinar; o currículo enquanto construção do conhe-

cimento; reflexão sobre a prática e vivência da avaliação qualitativa e processual (INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE VIDEIRA, 2018c).

Uma análise acerca de como esse contexto influencia na proposta de ensino deste trabalho não será feita, visto que: (i) o enfoque aqui é dado à estratégia de construção de modelos, fazendo-se uma reflexão fundamentada na teoria de modelagem de Hestenes, apontando os pontos altos e baixos da sequência didática, de forma a, como sublinha Freire (2001), mediar conhecimento e ação¹; (ii) embora a bagagem cultural dos estudantes influencie no desenvolvimento das aulas e como encararão o conhecimento científico, as ideias sobre o mundo físico que são construídas pelos estudantes dá-se por meio de sua ação sobre esse mundo, e as suas concepções iniciais apresentam padrões típicos que parecem representar uma tendência comum, independentemente de lugar, idade ou língua (VILLANI, 1989); (iii) a sequência didática proposta tem como objetivo apresentar uma imagem mais coerente da Física, com foco no conhecimento científico procedimental, podendo ser aplicada em qualquer turma de terceiro ano do ensino médio, de forma que futuros temas mais voltados à realidade da escola e aos objetivos do seu PPP possam ser trabalhados posteriormente.

Portanto, o esclarecimento do ambiente em que os alunos estão inseridos foi feito para que a reflexão não seja tomada como uma generalização, já que cada turma pode responder de forma diferente a uma mesma proposta, contudo o intuito não é o de guiar tal planejamento especificamente às circunstâncias existentes no campo de aplicação.

5.2 DESCRIÇÃO DA TURMA

As aulas realizadas foram na turma de 3º ano do ensino médio integrado de Eletroeletrônica, com 40 alunos, e deram-se em somente uma sala, que contém quadro branco e projetor. A turma consiste de 14 meninas e 26 meninos, com média de idade de 17 anos.

¹Freire (2001) aponta que o planejamento e o ensino constituem uma atividade cognitiva na qual o professor tem de aplicar conhecimentos de vários domínios: o conteúdo pedagógico refere-se à maneira de ajudar os alunos a compreenderem os conteúdos científicos específicos. E, numa perspectiva de estágio como aplicação da teoria, a atividade reflexiva das situações vivenciadas na prática “pressupõe que o professor fundamente as suas decisões e julgamentos pedagógicos no corpo de saberes profissionais existentes que são reorganizados de acordo com a sua experiência pessoal”. Dessa forma, a reflexão aparece como mediação entre conhecimento (científico e pedagógico) e ação, de modo que o conhecimento dirige a ação e “resulta do processo um professor [...] com mais conhecimentos e maior competência técnica (FREIRE, 2001, pp. 6 e 7).

5.3 CRITÉRIOS DE ANÁLISE

A aplicação das aulas será descrita no capítulo seguinte, assim como uma reflexão da mesma, que buscará apontar as potencialidades e as limitações da sequência didática produzida.

Essa prática pressupõe o uso de atividades reflexivas com finalidades de interpretação das situações vivenciadas e daquilo que o professor aprende, como aprende e o uso que dá ao conhecimento (FREIRE, 2001). Ao se fazer essa avaliação crítica sobre a prática, no corpo de saberes educacionais, almeja-se promover um aperfeiçoamento do planejamento inicial, acrescentando novos fatores que não haviam sido previstos, e adaptando a sequência didática para um produto um tanto mais próximo à realidade da prática escolar do ensino médio.

Para tanto, os aspectos analisados serão: os objetivos elencados inicialmente no planejamento, se puderam ou não ser alcançados; as potencialidades listadas para a utilização da abordagem, se realmente tiveram destaque nessas aulas; e as limitações e dificuldades encontradas com a prática.

6 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DA APLICAÇÃO

A seguir, a forma como se seguiu a aplicação das aulas será descrita e analisada através de reflexões acerca da escolha metodológica e da maneira como a mesma foi desenvolvida ao longo das aulas.

6.1 DESCRIÇÃO DA APLICAÇÃO

- **AULA 1 - COMO A FÍSICA ESTUDA OS FENÔMENOS DA NATUREZA? (15/05/18)**

A aula iniciou-se com uma apresentação, por parte do professor da turma, de mim como estagiária. Completei a apresentação com informações gerais sobre o estilo das aulas e o objetivo das mesmas, seguindo o objetivo geral da sequência didática (contido no início da subseção 5.1.1): o de contribuir com a formação crítica e científica dos alunos a partir de uma abordagem que busque promover uma imagem mais coerente da Física.

Iniciei a aula então com a questão (apresentada em slide): “Como a Física estuda os fenômenos da natureza?”. Os alunos mostraram-se cautelosos inicialmente, porém alguns falaram sobre método científico (com uma sequência de etapas, inclusive), experimentos e equações. Questionei se existe um único método científico, e concluímos sobre a não necessidade de haver uma ordem de etapas e de um método fechado. Guiei a discussão para as equações e as suas obtenções, se são fruto de fenômenos totalmente reais ou de situações idealizadas. Questionei se, ao fazer-se um experimento, espere-se que o resultado seja igual ao obtido pelas equações. Alguns alunos afirmaram que, se não for igual, o experimento está errado, outros disseram que deveria ser igual, porém no experimento há outras “coisas” que influenciam. Inferimos que as equações são resultados de idealizações e simplificações, já que a realidade tem variáveis difíceis de descrever-se. Escrevi no quadro as palavras REAL e IDEAL, com uma seta entre elas, e, nessa seta, escrevi MODELOS, justificando que o processo de descrever um fenômeno real com uma visão idealizada trata-se de criar um modelo, ou seja, de modelizar. Acrescentei que a Física utiliza-se de modelos para descrever fenômenos e fazer previsões sobre eles, e que esses modelos são representações do objeto real de estudo.

Apresentei, através de imagens nos slides, exemplos de fenômenos que são modelizados pela Física, relacionando: chute de uma bola de futebol com modelo de lançamento oblíquo; água passando por um cano com modelo de escoamento de fluidos; sistema solar com modelo planetário de

órbitas circulares; modelos atômicos; objeto preso a uma mola com modelo de massa-mola; e tecnologia eletro-eletrônica com modelo de circuito elétrico. Em cada exemplo, apresentei algumas das idealizações consideradas, sempre questionando qual era o caso real e qual era o modelo.

Em seguida, questionei se é possível modelizar o fenômeno das auroras polares. Um aluno afirmou que deveria ser, pois, caso contrário, eu não estaria propondo aulas sobre esse tema. Pedi a ele outra justificativa. Ele disse que precisaria entender melhor como funciona esse fenômeno, para poder pensar nas variáveis. Prossegui então afirmando que será esse o próximo passo da aula.

Ao entregar texto do anexo A para leitura individual, expliquei que se trata de uma matéria de divulgação para leigos, não tendo, portanto, um compromisso com a apresentação de detalhes minuciosos da ciência por trás do fenômeno. Após a leitura, como havíamos gastado mais tempo do que o previsto para dar início à aula, imaginei que a formação de grupos, nesse momento da aula, fosse atrasar ainda mais o andamento. Dessa forma, a parte de uma nova leitura, destacando no texto as expressões que fazem parte das causas do fenômeno e que sejam pertencentes à área da física, foi feita individualmente.

Pedi que eles fossem falando as expressões que destacaram, na ordem com que se davam, até a formação das auroras, de maneira a montar um fluxograma no quadro, o qual trata-se de uma sequência de acontecimentos. O fluxograma montado foi muito semelhante ao presente no anexo B, porém com alguns detalhes extras entre as setas (verbos ou conjunções ligantes, por exemplo, atividade magnética do sol “gera” tempestades solares “com” elétrons a 400 km/s), já que os alunos mostraram-se mais detalhistas.

• AULA 2 - AURORAS SÓ NOS POLOS? (15/05/18)

Continou-se com as seguintes questões lançadas, ainda em grande grupo: “Como se pode explicar o fato de esse fenômeno só ocorrer nos polos?”; “Em qual(is) etapa(s) do fluxograma pode-se obter essa resposta?”. A maioria dos estudantes afirmou que isso se dá por conta de o campo magnético ser mais forte nos polos magnéticos da Terra. Pedi então para que escrevessem essa hipótese inicial, para que se lembrassem ao final das aulas. Quanto às etapas necessárias, todas foram atribuídas como relevantes para a busca dessa resposta. Em seguida, destaquei que todas elas serão exploradas como parte do processo de modelização do fenômeno. Afirmei ainda que o foco do estudo será a obtenção de um modelo que responda a essa questão inicial, mas que outras questões poderiam ser feitas - como o porquê de haver determinadas colorações e não outras - tendo como resultado modelos com enfoques diferentes.

A exploração do fenômeno começou pelo estudo da atividade magnética do Sol, que se seguiu de forma bastante expositiva, de maneira que os tópicos abordados decorreram-se como previsto no planejamento. Retornamos para o fluxograma no quadro, e discutimos sobre quais foram as etapas estudadas e quais ainda precisavam ser. Por fim, concluí a aula adiantando que as etapas seguintes serão abordadas na próxima aula, e solicitei que formassem grupos de quatro pessoas para as próximas aulas.

• **AULA 3 - ASSIM NA TERRA COMO NO ESPAÇO. (22/05/18)**

Enquanto a turma organizava-se, fizemos uma breve revisão do que foi feito nas aulas anteriores. Relembramos o fluxograma, e as etapas do mesmo que já haviam sido exploradas. Continuamos então, pela sequência, em campo magnético da Terra. Mostrei o vídeo com o experimento de simulação do campo magnético terrestre. Posteriormente, pedi que os alunos comentassem sobre o que viram no vídeo, e relacionei com as linhas de campo estudadas na aula anterior, perguntando sobre uma possível relação entre os campos magnéticos de um ímã e da Terra. Os alunos responderam serem similares, com as mesmas linhas de campo.

Através de imagens no projetor, mostrei o modelo do qual falavam para o campo magnético terrestre. Discuti brevemente sobre a origem do campo da Terra, à luz da teoria do dínamo. Após isso, comparei com o modelo de campo magnético terrestre que considera a influência da heliosfera, e comparamos com o campo real da Terra, distinguindo modelo de realidade.

Voltamos para o fluxograma, e seguimos para o tópico de *polos terrestres*, que busca estudar como as partículas do vento solar vão para os polos. Iniciamos então, no quadro, o conteúdo de força magnética sobre cargas. Relembrei que o vento solar é constituído de partículas carregadas, e que, ao chegar na região de campo magnético da Terra, pela teoria eletromagnética, elas vão sofrer uma deflexão. Depois realizei a discussão, de maneira tradicional, da relação da força magnética sobre uma carga que se move na presença de um campo magnético: $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$; inclusive, ilustrando através da regra da mão direita.

• **AULA 4 - CARGAS TAMBÉM SENTEM. (22/05/18)**

Continuei com essa parte das interpretações importantes presentes na equação. Em seguida, falei sobre as unidades físicas das grandezas envolvidas, definindo a unidade *tesla* como $T = \frac{N}{C \cdot m}$. Comentei sobre aplicação da relação de deflexão em televisões de tubo e aceleradores de partículas.

Logo após, fizemos um exercício de aplicação da equação no quadro, deixando os algebrismos de isolar grandezas para os estudantes fazerem primeiro. O exemplo era de uma câmara de laboratório, com \vec{B} uniforme (com

seu módulo determinado) para fora do plano do quadro/caderno, em que um próton com energia cinética determinada entra na câmara no sentido sul-norte (muitos alunos tiveram dificuldade em desenhar esse vetor de velocidade, e ajudei-os a visualizar esse e outros sentidos usando pontos cardeais). Como se sabe o valor da massa do próton, obtivemos o módulo da sua velocidade, e, sabendo a sua carga, obtivemos a força magnética, o que era pedido no exercício. Os alunos apresentaram bastante dificuldades nos algebrismos, e também demoraram para visualizar o vetor força magnética pela regra da mão direita, então acabamos dispendendo mais tempo do que o que foi previsto para essa etapa.

Quase terminando a aula, vi que não daria tempo de discutir as trajetórias circular e helicoidal da partícula, como havia planejado para o dia, contudo iniciei questionando como seria a trajetória desse próton que entra em uma região de campo magnético. Enfatizei que o campo é uniforme, ou seja, de mesma intensidade em todos os pontos, e fiz analogia com a situação hipotética de eu estar andando com determinado sentido na sala de aula, e diferentes alunos me empurrarem mudando meu trajeto em 90 graus continuamente. Com isso, concluímos que a minha nova trajetória seria um círculo, assim como será a de uma carga em uma região de campo magnético uniforme, com a força magnética fazendo o papel da força de empurrão dos estudantes no caso análogo. Para isso, projetei uma imagem com a relação vetorial em vários pontos da trajetória circular da carga.

• AULA 5 - CONSTRUINDO UM MODELO. (05/06/ 18)

Após uma breve revisão do que foi feito nas aulas anteriores, a aula iniciou-se com a mesma discussão sobre a trajetória circular que a partícula carregada irá fazer ao entrar em uma região de campo magnético. Indaguei sobre qual é a força que faz o papel de força centrípeta nesse caso. Ao concluirmos que a contínua força magnética é que promove a trajetória em círculo, sugeri que as equações dessas duas forças fossem igualadas para obter-se algumas grandezas interessantes para o processo. Busquei esclarecer que só haverá força centrípeta, nesse caso, se houver um ângulo diferente do paralelo entre a velocidade e o campo magnético, de forma que precisa haver uma componente perpendicular da velocidade, e essa é a componente responsável pela atuação da força magnética. Esse ponto pareceu difícil de compreender para os estudantes.

Com relação à igualdade entre as equações das forças centrípeta e magnética, os alunos foram solicitados a fazer os algebrismos primeiramente, para obter: o raio da trajetória, onde analisamos a inversão na proporcionalidade do mesmo com a intensidade do campo magnético; e a velocidade angular, que seria usada posteriormente.

Lembrei-os que pode haver também a componente paralela da velocidade, e discutimos sobre o papel da mesma no processo. Ao refletir com maior esforço, entendemos que ela fará com que a partícula desloque-se com movimento circular de maneira a formar uma espiral, cuja trajetória é denominada de helicoidal. Seguidamente, questionei sobre como calcular o passo da trajetória, ou seja, o quanto ela é deslocada após uma revolução. Os alunos não apresentaram sugestões. Então usei a relação entre velocidade, tempo e espaço, com a equação do período como tempo e o passo como espaço. Como velocidade, foi usada a paralela, e novamente os alunos apresentaram dúvida quanto a essa utilização.

• AULA 6 - CONSTRUINDO UM MODELO - PARTE 2. (05/06/18)

Nessa aula, mostrei, usando o projetor, o tipo de campo magnético não uniforme que forma uma garrafa magnética, a figura 16. Discutimos sobre como se explica o aprisionamento da partícula nessa região. Os alunos apresentaram dúvidas na utilização da regra da mão direita para obter a força magnética em cada ponto das linhas de campo, então tentei articular essa etapa com cuidado, sempre voltando quando algum estudante dizia-se perdido.

Após isso, questionei se havia alguma semelhança entre o campo magnético visto e o da Terra. Os alunos disseram que os dois apresentavam partes de maior intensidade e de menor intensidade: o da Terra mais intenso nos polos e o visto anteriormente nas extremidades. A partir disso, mostrei a figura dos cinturões de radiação de Van Allen, em que as partículas carregadas que chegam na Terra ficam presas nas linhas de campo, oscilando de um lado a outro do polo. Ainda, usando a imagem, comentei que, quando há grande fluxo de vento solar, há produção de uma corrente elétrica, e conseqüentemente de um campo elétrico aonde as cargas seriam defletidas nos polos, eliminando o retorno das mesmas, e fazendo com que entrem na atmosfera nos polos magnéticos.

Tendo discutido isso, retornei para o fluxograma, e solicitei que os grupos fizessem uma pesquisa para trazer como trabalho na próxima aula sobre a composição da atmosfera e o que ocorre com as partículas carregadas quando chegam a ela.

Partimos então para a primeira atividade do processo de modelagem: o estágio de descrição do modelo. Expliquei como se daria essa etapa e qual é a sua importância para o processo. A atividade do anexo C foi feita com os estudantes em grupos, porém a discussão era geral, de forma que fomos passando por cada tópico conjuntamente. Segui a descrição da seção 3.1, lembrando a questão central que o modelo busca responder, e os alunos participaram significativamente das discussões nessa etapa. Faltou concluir

nessa aula a descrição da interação.

• **AULA 7 - EM BUSCA DE UM MODELO MELHOR. (12/06/18)**

Iniciamos a aula com a descrição da interação, e prosseguimos com a segunda etapa da modelagem: o estágio de formulação. Expliquei que nesse estágio usaremos as equações da força magnética e da força centrípeta para obter relações matemáticas específicas para o nosso modelo. Achei importante lembrar que o modelo busca explicar o aparecimento do fenômeno somente nos polos.

Seguimos por cada questão da atividade de forma sincronizada, diferentemente do que foi proposto, que era deixar os grupos trabalharem com autonomia. Como essa seria a última aula, procurei guiá-los de forma mais estreita, para que houvesse um maior aproveitamento dessas atividades em sala de aula.

Na questão 2 da atividade, precisei iniciar o desenho da relação vetorial no quadro, pois os alunos não estavam lembrando como fazer, então os recordei sobre a regra da mão direita. Novamente houve dúvidas quanto às componentes da velocidade, paralela e perpendicular ao campo. Não consegui identificar se se tratava de uma dificuldade geométrica, quanto à decomposição vetorial, ou se era devido especificamente a um não entendimento do papel de cada componente na relação da força magnética.

• **AULA 8 - O QUE APRENDI? (12/06/18)**

Nessa aula, prosseguiu-se com o estágio de formulação. Quando precisavam obter as relações para o raio da trajetória circular, a velocidade angular e o passo, aconselhei que olhassem no caderno os cálculos feitos nas aulas anteriores. E, nas questões que pediam desenho da trajetória, auxiliei-os também indo ao quadro e discutindo com a turma.

O estágio de formulação foi finalizado, e eu fiz uma leitura das questões dos estágios de ramificação e de validação, explicando também do que ambos se tratam. Essas atividades ficaram para os grupos concluírem em casa.

6.2 REFLEXÕES

Uma análise da aplicação da sequência didática permite que se possam fazer reflexões acerca da escolha metodológica e da maneira como a mesma foi desenvolvida ao longo das aulas. Ao se fazer essa avaliação crítica sobre a prática, busca-se promover um aperfeiçoamento do planejamento inicial, apontando os pontos de limitação e os aspectos positivos das aulas.

A escolha do uso da estratégia de modelagem teve como objetivo contribuir com a formação crítica e científica dos alunos, e promover a construção de uma imagem mais coerente da Física. Então esse é o momento de refletir sobre quais foram as potencialidades e as dificuldades encontradas, e ainda, de analisar se o caminho concebido para o uso da modelagem foi interessante para alcançar o objetivo inicial.

Dentre os pontos da aplicação que valem reflexão, observa-se, na aula 1, que, ao serem questionados sobre como a Física estuda os fenômenos da natureza, alguns alunos citaram que a Física utiliza-se do método científico, com uma sequência de etapas. A concepção de método científico está relacionada com as teses empiristas defendidas pelos filósofos ingleses, tal como Francis Bacon, que concebe, em seu *método experimental*, a ideia da observação neutra e rigorosa de informações seguida da determinação de características gerais dos fatos por meio da indução (PINHO ALVES; PINHEIRO, 2010). Essa concepção de ciência mostra-se ultrapassada de acordo com as pesquisas epistemológicas hodiernas, porém os livros didáticos atuais e mesmo as aulas de Física no ensino médio, em geral, trazem consigo ainda esses pressupostos empiristas de como a ciência é elaborada, inclusive referenciando o tal método científico.

Esse tipo de discussão que a questão inicial dessa aula traz permite uma reflexão sobre essas ideias que os alunos já apresentam, e mostrou-se como uma potencialidade da aula para adentrar na questão de que a Física utiliza-se de modelos para descrever fenômenos e fazer previsões.

Ainda relacionado ao questionamento inicialmente feito, outro comentário que apareceu nessa discussão foi o de que o experimento deve dar como resultado o que a equação prevê, caso contrário, está errado. Essa é uma questão procedimental da Física, e traz a concepção de que o modelo (a equação) é a realidade, quando, na verdade, os modelos construídos pelos físicos apresentam uma série de idealizações e simplificações para representar e descrever o fenômeno real, assim como estabelece a teoria de modelagem de Hestenes (1987). E, novamente, essa discussão apresentou-se também como uma potencialidade para estabelecer relações com a estratégia de modelagem que é apresentada em seguida.

Outro ponto potencialmente interessante nas aulas e observado na aplicação foi a construção do fluxograma, ainda na aula 1. Os alunos fizeram a leitura de divulgação científica para serem introduzidos ao tema das auroras polares, e elencaram expressões que alegavam pertencer à área da Física e estar relacionadas com a formação das auroras, montando com elas uma sequência de acontecimentos até a formação do fenômeno.

Essa atividade mostrou-se interessante para que os estudantes percebessem inicialmente o que precisavam estudar para começarem a construir

um modelo explicativo. Além disso, o fato de terem o fluxograma disponível em todos os momentos das aulas, podendo voltar a eles e rever quais são as etapas do estudo e o que já havia sido estudado, teve potencial de situá-los durante as etapas de modelagem. A produção do fluxograma, também pôde ser capaz de fazer o recorte para a questão que se pretendia explicar com o modelo, que era o fato de as auroras ocorrerem somente nos polos, podendo transmitir a ideia de que isso é uma questão de escolha, e que a efetividade do modelo depende da faceta a qual ele pretende elucidar. Ademais, caso o planejamento prevesse que os grupos pudessem ter autonomia para criar seus próprios modelos para o fenômeno, a atividade do fluxograma seria um importante facilitador.

No início da aula 2, foi lançada para a turma a questão: “Como se pode explicar o fato de esse fenômeno só ocorrer nos polos?”. A maioria dos estudantes afirmou que isso se dá por conta de o campo magnético ser mais forte nos polos magnéticos da Terra. Porém, na descrição do modelo, o campo magnético da Terra é considerado como sendo uniforme, e, ainda assim, há migração das partículas carregadas para os polos.

Como não houve tempo para terminar todas as atividades das etapas de modelagem em sala de aula, esse ponto não teve a discussão merecida, de forma que provavelmente os estudantes não lembrarão de sua hipótese inicial para comparar com a explicação dada pelo modelo construído, ou talvez até tragam essa mesma resposta caso sejam questionados novamente sobre isso. Essa limitação pode ser aperfeiçoada possivelmente com uma reestruturação do tempo destinado a cada etapa das aulas, para que discussões como essa possam ser feitas ao final.

Nas aulas 3 e 4, o conteúdo de força magnética sobre cargas foi introduzido, e os alunos sentiram algumas dificuldades por depararem-se com uma equação envolvendo produto vetorial. Houve dúvidas no uso da função *seno* para tomar o módulo da força magnética e também para utilizar corretamente a regra da mão direita e visualizar a relação entre os vetores. Para tentar esclarecer essas dúvidas, resolvemos um exemplo, com bastante calma, e essa etapa da aula levou mais tempo do que o que foi planejado. Por isso, as atividades finais do modelo não foram terminadas em aula. Percebe-se então que seria preciso aumentar mais uma ou duas aulas para tratar da equação de força magnética, das suas interpretações e de alguns exercícios para sua utilização.

Outra dificuldade que os alunos apresentaram, tanto nas aulas 3 e 4 quanto na etapa de formulação do modelo, foi no entendimento dos efeitos das componentes paralela e perpendicular da velocidade com relação ao campo. Durante a formulação do modelo, eles apresentavam dúvidas sempre que era preciso determinar se era $v \sin \theta$ ou $v \cos \theta$, nos cálculos da trajetória

helicoidal, ou seja, ficou dúvida quanto ao papel da componente perpendicular na atuação da força magnética e da componente paralela na promoção do passo na trajetória.

Talvez, propor mais exercícios durante as aulas que tratavam desse tópico, necessitando uma maior reflexão dos efeitos de cada componente da velocidade, pode contornar essa limitação percebida na sequência didática.

Devido à questão do tempo curto nas últimas aulas para a construção do modelo através das atividades com as etapas de modelagem, o modelo, em si, para explicar a ocorrência das auroras somente nos polos, não foi tão explorado, e, mesmo apresentando um grande potencial para o aprendizado do conteúdo de força magnética sobre cargas, não se dispôs do tempo necessário para que os alunos amadurecessem o seu processo de construção propriamente dito. Análises quanto ao que os alunos colocaram nas atividades não poderão ser aqui analisadas, de forma que somente o que foi percebido durante as aulas poderá ser debatido.

Porém a mensagem de que os cálculos estavam sendo feitos para um caso idealmente escolhido foi aparentemente bem recebida e assimilada, tendo em vista os comentários dos alunos durante as etapas que foram realizadas em sala de aula. Quando eram questionados, por exemplo, sobre como estava sendo considerado o campo magnético no modelo, as respostas eram a de um campo uniforme e diferente do campo real da Terra. No estágio de descrição, as discussões também levavam os alunos a comentarem somente as características dos objetos, do processo e da interação que eram importantes para a formação das auroras, mas aparentando compreenderem que se tratava de representar um objeto real, que apresenta outras propriedades também, mas que não são fundamentais para se estudar esse fenômeno especificamente.

Com isso, pode-se direcionar para os objetivos e as vantagens, elencadas no primeiro capítulo deste trabalho, quanto ao uso da modelagem como estratégia de ensino. Apartir delas, pode-se destacar que, no âmbito de uma análise da aplicação: (i) as aulas propiciaram uma aproximação dos saberes físicos escolares à realidade observada pelos alunos através da sua relação com o mundo fora da sala de aula, já que se usou de conhecimentos físicos para responder questões sobre a formação das auroras polares; (ii) os estudantes puderam se deparar com uma visão mais coerente da Física, de forma que estavam envolvidos em atividades mais consistentes com a atuação dos cientistas, através da construção de modelos, assim como expõe Brewe (2008); (iii) como as discussões trazidas fugiam dos exercícios tradicionais de aplicação de fórmula, as aulas apresentaram-se com potencial de manter os estudantes focados principalmente nos princípios fundamentais da física, o que, para Brewe (2008), pode incentivar os estudantes a atentarem-se aos aspectos conceituais na análise de situações físicas.

Agora, como a exploração do modelo apresentou limitações quanto ao tempo para seu devido tratamento em sala de aula, a mudança na natureza da resolução de problemas, através da aplicação de modelos quantitativos, não explorou devidamente o uso de múltiplas representações, já que os estudantes não tiveram o tempo necessário para procurarem fazer, por eles mesmos, os gráficos com as trajetórias e também as relações vetoriais pedidas. Essas etapas foram feitas com mais auxílio do que foi planejado, não revelando todo o seu potencial do ponto de vista de múltiplas representações.

Além disso, como as respostas escritas pelos estudantes nas atividades de modelagem não foram analisadas, os seguintes pontos apontados pela literatura (VEIT e TEODORO, 2002; HESTENES, 1987, respectivamente) não puderam ser verificados: (i) o de a instrução por modelagem facilitar a construção e a generalização de relações e significados, contribuindo para o desenvolvimento cognitivo dos estudantes; e (ii) o de promover o desenvolvimento da intuição física dos estudantes, o qual precisaria também de mais atividades com esse cunho para ser constatado nos estudantes, por tratar-se de uma competência adquirida em longo prazo.

Ainda, caso o planejamento propusesse que os estudantes construíssem seus próprios modelos para o recorte do fenômeno, outras potencialidades, apontadas por Veit e Teodoro (2002), poderiam ser discutidas: (i) a de exigir que os estudantes definam e exponham suas ideias mais precisamente; e (ii) a de propiciar oportunidades de os alunos testarem seus próprios modelos cognitivos, detectando e corrigindo incoerências.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à importância que os modelos têm na construção do conhecimento científico, a abordagem de modelagem torna-se uma ferramenta interessante para o ensino de Física, principalmente para aproximar os saberes físicos escolares da realidade observada pelos alunos através da sua relação com o mundo fora da sala de aula, e também os modelos na construção da Ciência dos modelos no ambiente escolar.

Para explicitar as características essenciais dos modelos físicos e as etapas presentes em seus processos de construção, e ainda guiar as atividades da prática de ensino, adotou-se o referencial de Hestenes (1987) sobre a construção de modelos na Física e no contexto do ensino. Em seus textos, o físico americano formula uma teoria instrucional que busca consolidar e organizar o conhecimento procedimental da Física, para que seja também ensinado aos estudantes. Para isso, ele elaborou uma estratégia de desenvolvimento de modelos que é composta de quatro estágios a serem implementados sucessivamente, formando as etapas de modelagem: (i) descrição, (ii) formulação, (iii) ramificação e (iv) validação.

Apresenta-se, neste trabalho, uma discussão fenomenológica das auroras polares, com o aprofundamento dos aspectos físicos envolvidos, já que, sem uma compreensão do comportamento do fenômeno, não há como estabelecer as variáveis e as interações pertinentes para a construção do modelo. Essa etapa é importante também para aprofundamento por parte do professor que se deseja utilizar dessa abordagem para trabalhar o conteúdo de força magnética sobre cargas através da temática das auroras polares no ensino médio.

Porém, o fenômeno aurora polar pode ser estudado com diversos enfoques em termos de objeto. Pode-se tratar da sua origem no astro principal do sistema solar, com conhecimentos de astronomia, termodinâmica e eletromagnetismo. Pode-se abster a como se dá o fenômeno nas proximidades da Terra, buscando-se compreender a ocorrência dele somente nos polos. Pode-se ainda pensar em termos de óptica, na formação das luzes no céu. Além de outros aspectos que fogem mais da área da física, como o turístico e outros.

Para esse trabalho, fez-se uma exploração do tema, abordando os tópicos mais importantes para o processo de modelagem que se busca nesse trabalho, desde a origem, no Sol, até as colisões na atmosfera terrestre. O recorte feito para o processo de modelagem foi a fuga das partículas carregadas do vento solar para os polos terrestres, e fez-se um modelo que se propõe a explicar o fato de as auroras só ocorrerem nos polos. Com isso, a faceta,

em termos de conteúdo físico, é a força magnética sofrida por uma carga em movimento.

Os estágios de modelagem de Hestenes (1987) são especificados para esse fenômeno, ressaltando-se que essas etapas tratam-se de escolhas, eficientes ou não, dependendo das questões que o modelo propõe-se a responder. O mesmo é utilizado em uma sequência didática de oito aulas para o terceiro ano do ensino médio e aplicado em uma turma do curso técnico integrado de Eletroeletrônica no IFC - Videira.

A forma como se deu a aplicação das aulas é descrita e analisada através de reflexões acerca da escolha metodológica e da maneira como a mesma foi desenvolvida ao longo das aulas, permitindo-se apontar as potencialidades e as limitações da sequência didática produzida. Ao se fazer essa avaliação crítica sobre a prática, no corpo de saberes educacionais, buscou-se promover um aperfeiçoamento do planejamento inicial, aproximando-o de um produto um tanto mais moldado à realidade da prática escolar do ensino médio.

Investigações de cunho metodológico, com propostas de ensino, são de suma importância para a prática escolar do professor e também da perspectiva acadêmica. Tornam-se uma fonte de pesquisa para professores que se pretendem utilizar de estratégias alternativas, além de promoverem discussões acerca da escolha metodológica e de suas implicações para o ensino/aprendizagem de Física, contribuindo, cada vez mais, com uma aproximação entre a prática pedagógica e a pesquisa em ensino de Física.

A partir das reflexões feitas sobre as aulas planejadas e aplicadas neste trabalho, pôde-se identificar que, mesmo tendo apresentado algumas limitações, como a distribuição do tempo, as questões conceituais oriundas das componentes da velocidade com relação ao campo magnético, e a pouca exploração do modelo propriamente dito, os estudantes puderam se deparar com uma visão mais coerente da Física, de forma que estavam envolvidos em atividades mais consistentes com a atuação dos cientistas, através da construção de modelos. Suas respostas e comentários levaram a essa percepção.

Dessa forma, o objetivo geral da sequência de aulas foi possivelmente alcançado. Ainda mais perceptível seria se se pudesse trabalhar mais tópicos de Física utilizando-se dessa metodologia, ou ainda, se fosse possível fazer uma análise do que foi respondido pelos estudantes nos questionários das atividades ou então em uma prova ao final.

Claramente, alterações podem ser feitas no planejamento inicial, tendo-se em consideração as reflexões da aplicação: o tempo destinado ao conteúdo de força magnética sobre cargas, antes da construção do modelo, e, conseqüentemente, mais tempo para a exploração do modelo e de suas limitações nas últimas aulas; uma extensão na autonomia dada aos grupos para as respostas aos questionários que guiavam a construção do modelo, ou mesmo,

total autonomia em todo o processo de elaboração, o que exigiria mais aulas; uma discussão mais eficiente no tratamento das diferentes componentes da velocidade, talvez com a inclusão de exercícios e problemas que necessitem mais da compreensão do papel de cada uma delas.

Com essa perspectiva, finaliza-se este trabalho com a mesma motivação inicial: promover aulas de Física que tenham algum significado para o estudante, aproximando a ciência de sua realidade e também da produção do conhecimento pelos cientistas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, B. A. M.; MARTIN, I. M. Medição do campo magnético da terra pelo método da tangente. **Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA**, v. 13, 2007.

BRASIL. **Parâmetros Curriculares Nacionais para o ensino médio**. Brasília, DF: Ministério da Educação, 1999.

BRASIL. **Base Nacional Curricular Comum: ensino médio**. Brasília, DF: Ministério da Educação, 2015.

BRAZIL ROCKET. **Você sabia que a aurora boreal pode ter cores diferentes? Aqui estão as mais raras**.

[http://www.brazilrocket.com/pt/](http://www.brazilrocket.com/pt/voce-sabia-que-a-aurora-boreal-pode-ter-cores-diferentes-aqui-esta)

[voce-sabia-que-a-aurora-boreal-pode-ter-cores-diferentes-aqui-esta](http://www.brazilrocket.com/pt/voce-sabia-que-a-aurora-boreal-pode-ter-cores-diferentes-aqui-esta)

Acesso em: 21-06-2018.

BREWE, E. Modeling theory applied: Modeling instruction in introductory physics. **American Journal of physics**, AAPT, v. 76, n. 12, p. 1155–1160, 2008.

CIENTECNO. **Seu acelerador de partículas**. <http://www.cientecno.com/site/2012/03/19/seu-acelerador-de-particulas>. Acessado em: 29-04-2018.

DELIZOICOV, D. Problemas e problematizações. **Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora**. Florianópolis: ED. da UFSC, 2001.

EISBERG, R.; RESNICK, R. Física quântica. **Rio de Janeiro: Editora Campus**, 1979.

ENERGIA SOLAR. **Sol**.

<https://pt.solar-energia.net/definicoes/sol.html>. Acesso em: 19-06-2018.

EXPLICATORIUM. **Aurora Polar**.

<http://www.explicatorium.com/universo/aurora-polar.html>.

Acesso em: 24-04-2018.

FÍSICA E VESTIBULAR. **Força magnética sobre uma carga móvel imersa num campo magnético**. <http://fisicaevestibular.com.br/>

novo/eletricidade/eletromagnetismo/
forca-magnetica-sobre-uma-carga-movel-imersa-num-campo-magnetico/.
Acesso em: 19-06-2018.

FOUREZ, G. et al. **Abordagens didáticas da interdisciplinaridade**. 2002.

FREIRE, A. M. Concepções orientadoras do processo de aprendizagem do ensino nos estágios pedagógicos. **Colóquio: modelos e práticas de formação inicial de professores, Faculdade de Psicologia e de Ciências da Educação, Universidade de Lisboa. Lisboa, Portugal**, p. 1–25, 2001.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física, vol. 4. **Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora SA**, 2009.

HEIDEMANN, L. A.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. Ciclos de modelagem: uma proposta para integrar atividades baseadas em simulações computacionais e atividades experimentais no ensino de física. **Caderno brasileiro de ensino de física. Florianópolis. Vol. 29, nesp 2 (out. 2012), p. 965-1007**, 2012.

HESTENES, D. Modeling methodology for physics teachers. In: AIP. **AIP conference proceedings**. [S.l.], 1997. v. 399, n. 1, p. 935–958.

INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE VIDEIRA. **Conheça o campus**. <http://videira.ifc.edu.br/institucional/>. Acesso em: 21-06-2018.

INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE VIDEIRA. **Sobre o IFC**. <https://videira.ifc.edu.br/institucional/sobre-o-ifc/>. Acesso em: 21-06-2018.

INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE VIDEIRA. **Técnico em eletroeletrônica: sobre o curso**. <http://videira.ifc.edu.br/tecnico-eletroeletronica/>. Acesso em: 21-06-2018.

JENNIFER, F. **Brasil Escola: Espectros de Emissão e de Absorção e Leis de Kirchoff**. <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/espectros-emissao-absorcao-leis-kirchoff.htm>. Acesso em: 21-06-2018.

KARTTUNEN, H. et al. **Fundamental astronomy**. [S.l.]: Springer, 2016.

LARMOR, J. How could a rotating body such as the sun become a magnet. **Rep. Brit. Assoc. Adv. Sci.**, p. 159–160, 1919.

MACHADO, J.; VIEIRA, K. S. Modelização no ensino de física: Contribuições em uma perspectiva bungeana. In XI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. Curitiba, 2008.

MARTINAND, J.-L. Introduction à la modélisation. **Actes du séminaire de didactique des disciplines technologiques**, p. 1994–95, 1996.

MUNDO EDUCAÇÃO. **Camadas da Terra**. <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/as-camadas-terra.htm>. Acesso em: 19-06-2018.

MUNDO EDUCAÇÃO. **Campo magnético**. <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/campo-magnetico.htm>. Acesso em: 19-06-2018.

MUNDO EDUCAÇÃO. **Raio da trajetória de uma carga no campo magnético**. <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/raio-trajetoria-uma-carga-no-campo-magnetico.htm>. Acesso em: 19-06-2018.

NARDI, R.; GATTI, S. R. T. Uma revisão sobre as investigações construtivistas nas últimas décadas: concepções espontâneas, mudança conceitual e ensino de ciências. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, Universidade Federal de Minas Gerais, v. 6, n. 2, 2004.

NELSON, O. R.; MEDEIROS, J. R. D. Assim na terra como no céu: a teoria do dinamo como uma ponte entre o geomagnetismo e o magnetismo estelar. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n. 4, p. 4601, 2012.

OLIVEIRA, R. A. d.; SILVA, A. P. B. d. História da ciência e ensino de física: uma análise meta-historiográfica. **Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino/Luiz OQ Peduzzi, André Ferrer P. Martins e Juliana Mesquita Hidalgo Ferreira (Org)**. Natal: EDUFRN, 2012.

PEDUZZI, L. O. Q.; ZYLBERSZTAJN, A.; MOREIRA, M. A. As concepções espontâneas, a resolução de problemas e a história e filosofia da ciência em um curso de mecânica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 14, n. 4, p. 239–246, 1992.

PIAGET, J. **A Epistemologia Genética**. [S.l.]: Petrópolis: Vozes, 1971.

PINHEIRO, T. F. **Aproximação entre a ciência do aluno na sala de aula da 1a. serie do 2o. grau e a ciencia dos cientistas: uma discussão**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina.

PINHO ALVES, J. Atividade experimental: uma alternativa na concepção construtivista. **VIII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física**, 2002.

PINHO ALVES, J.; PINHEIRO, T. d. F. **Instrumentação para o Ensino de Física A**. [S.l.]: Florianópolis: UFSC/EAD/CED/CFM, 2010.

POLON, L. C. K. **Todo Estudo: Atmosfera**.
<https://www.todoestudo.com.br/geografia/atmosfera>. Acesso em: 21-06-2018.

POPPER, K. R. **A lógica da pesquisa científica**. [S.l.]: Editora Cultrix, 2004.

REALE, G.; ANTISERI, D. **História da filosofia, v. 7: de Freud à atualidade**. [S.l.]: São Paulo: Paulus, 2006.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; WALKER, J. Fundamentos de física 3: eletromagnetismo. **LTC–Livros Técnicos e Científicos Editora SA**, p. 163–164, 1996.

ROCHA, M. G. S. A astronomia no ensino da física. Porto:[sn], 2002.

ROSA, C. W. da; ROSA, Á. B. da. Ensino de física: objetivos e imposições no ensino médio. **Revista Electrónica de Enseñanza de las ciencias**, v. 4, n. 1, 2005.

SILVA, M. H. Uma proposta para o ensino médio: elementos básicos do plasma. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

SILVA, M. R. Currículo, ensino médio e bncc-um cenário de disputas. **Retratos da Escola**, v. 9, n. 17, 2016.

SOUZA, E. S. R. A teoria da modelagem de david hestenes: Considerações no ensino de física. 2015.

TAMIR, P. Practical work in school science: an analysis of current practice. **Practical science**, Open Univ. Press Philadelphia, p. 13–20, 1991.

TAVARES, M. Aprendendo sobre o sol. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 1, 2000.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros. Vol. 3: física moderna: mecânica quântica, relatividade ea estrutura da matéria**. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.

VEIT, E. A.; TEODORO, V. M. N. D. Modelagem no ensino/aprendizagem de física e os novos parâmetros curriculares nacionais para o ensino médio. **Revista brasileira de ensino de física. São Paulo. Vol. 24, n. 2 (jun. 2002), p. 87-96**, SciELO Brasil, 2002.

VILLANI, A. Reflexões sobre o ensino de física no brasil: práticas, conteúdos e pressupostos. **Revista de Ensino de Física**, v. 6, n. 2, p. 76–95, 1984.

VILLANI, A. Idéias espontâneas e ensino de física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 11, p. 130, 1989.

WIKIPÉDIA. **Elétron**.

<https://pt.wikipedia.org/wiki/El%C3%A9tron>. Acesso em: 21-06-2018.

ZÊNITE. **Auroras**. <http://www.zenite.nu/auroras/>. Acesso em: 24-04-2018.

ZYLBERSZTAJN, A. Concepções espontâneas em física: exemplos em dinâmica e implicações para o ensino. **Revista de Ensino de Física**, v. 5, n. 2, p. 3–16, 1983.

ANEXO A – Texto de divulgação: O que é a aurora polar? Como ela acontece?



INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE
PROJETO: AS AURORAS POLARES E O
ELETROMAGNETISMO
PROFESSOR DA TURMA: Jaquiel Salvi Fernandes
ORIENTADOR: Paulo José Sena dos Santos
CONDUTORA: Letícia Martendal
NOME(S): _____

Aula 1: Como a Física estuda os fenômenos da natureza?

Leitura de matéria de divulgação

O que é a Aurora Polar? Como ela acontece?

Aurora Polar é um fenômeno visual que acontece somente em regiões polares, pois são provocadas por causa do impacto de partículas de vento solar com a alta atmosfera da Terra. Quando esses espetáculos naturais acontecem, luzes coloridas são formadas e começam a se mover no céu durante horas. Apesar das auroras polares acontecem somente durante o período noturno, elas são provocadas por causa do Sol.

Em todo globo terrestre apenas 11 regiões têm o privilégio de receber as auroras polares. Nos hemisférios norte: no Canadá, Alasca (EUA), Groenlândia (Dinamarca), Islândia, Noruega, Suécia, Finlândia e Rússia. E ao sul: na Nova Zelândia, Argentina e Antártida. Os meses de setembro e março são as principais épocas do ano para que o fenômeno aconteça.

Como ocorre a Aurora Polar

Essas auroras polares são provocadas pela atividade magnética do sol. Isso porque a estrela central do Sistema Solar é envolvido por uma espécie com temperaturas de milhões de graus Celsius. Essas espécies são responsáveis por emitir partículas energizadas para todos os lados durante as “tempestades solares”, que a cada 11 anos costumam se intensificar.

Em todo momento o Sol envia energia para um ponto da superfície que é chamada de coroa estelar, responsável por irradiar fótons e elétrons a cerca de 400 quilômetros por segundo, que ao se aproximar do nosso planeta são atraídos pelo campo magnético da Terra.

Os polos terrestres são os únicos lugares na qual essas partículas se aproximam, e as auroras ocorrem após as substâncias chegarem até a atmosfera da Terra e os elementos entrarem em contato com o oxigênio e nitrogênio. Com isso, as auroras polares são provocadas através da reação dos gases que irradiam nesses locais e suas luzes podem alcançar até dois quilômetros.

As cores da Aurora Polar

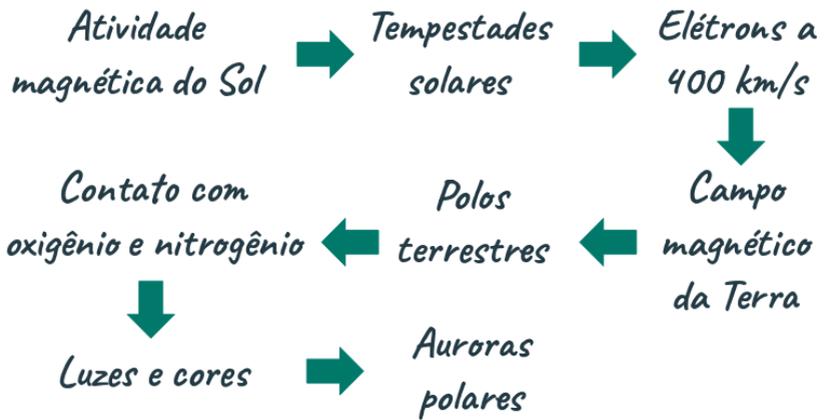
Rosa, verde e azul são algumas das cores que a aurora emite, porém, para definir essa coloração depende da altitude em que o vento solar, que normalmente costuma alcançar entre 100 e 800 quilômetros, colidem com gases da Terra. Por exemplo, para a aurora emitir cor avermelhada, o impacto precisa ser bastante próximo do nosso planeta.

A coloração fica amarelada e verde se a colisão chegar entre 100 e 300 quilômetros. Quando ultrapassa esse número as luzes brilhantes são vistas em um tom vermelho mais vivo. Azul e violeta só é possível ver quando o embate acontece quase no limite da ionosfera, ou seja, mil quilômetros.

Para os químicos, esse fenômeno se parece com a ionização estimulada dentro das lâmpadas fluorescentes. Já para os biólogos, as auroras polares são importantes para a vida terrestre, já que o campo magnético diminui a radiação do Sol, e isso permite que o ser humano sobreviva.

Fonte: DIÁRIO ONLINE. O que é a Aurora Polar? Como ela acontece? Disponível em <<http://www.diarioonline.com.br/tedoide/viral/noticia-426406-o-que-e-a-aurora-polar-como-ela-acontece.html>>. Acessado em: 25-04-2018.

ANEXO B – Fluxograma



ANEXO C - Estágio de descrição



INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE
 PROJETO: AS AURORAS POLARES E O
 ELETROMAGNETISMO
 PROFESSOR DA TURMA: Jaquiel Salvi Fernandes
 ORIENTADOR: Paulo José Sena dos Santos
 CONDUTORA: Letícia Martendal
 NOME(S): _____

Aula 5: Construindo um modelo.

Etapas de modelagem: estágio de descrição

Nesse estágio, as descrições do modelo são estabelecidas.

1. Quais são os objetos responsáveis pelo aparecimento das auroras somente nos polos?

2. Descrição desses objetos:

	<p>Tipo (caráter físico):</p> <p>Composição:</p> <p>Variáveis:</p>
	<p>Tipo (caráter físico):</p> <p>Composição:</p> <p>Variáveis:</p>

3. Descrição do processo:

Sistema de referência	
Variáveis de movimento	

4. Descrição da interação:

Agentes	
Tipo de interação	
Variável de interação	

5. Considerações adicionais:

ANEXO D – Estágio de formulação



INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE
PROJETO: AS AURORAS POLARES E O
ELETROMAGNETISMO
PROFESSOR DA TURMA: Jaquiel Salvi Fernandes
ORIENTADOR: Paulo José Sena dos Santos
CONDUTORA: Letícia Martendal
NOME(S): _____

Aula 5: Construindo um modelo.

Etapas de modelagem: estágio de formulação

Nesse estágio, aplicam-se as leis físicas de interação e de movimento para determinar as equações específicas do modelo.

1. Quais são as equações físicas que envolvem as variáveis do modelo? Comente sobre cada uma delas.
2. Considere uma partícula de carga q entrando na área de campo magnético constante e uniforme da Terra com uma velocidade que faz um ângulo θ com relação a \vec{B} , tendo uma componente paralela e outra perpendicular ao campo. Faça um desenho dessa relação vetorial.
3. A força magnética que irá agir na carga será devida a qual componente da velocidade? Faça um desenho representando essa componente da velocidade, o campo magnético e a força magnética.
4. Essa força atuará na carga como um tipo específico de força. Qual? Com isso, qual será a trajetória da partícula ao considerar somente essa componente da velocidade?

5. Encontre a relação de forças que se pode obter a partir da resposta anterior, e resolva a equação para o raio e para a velocidade angular ($\omega = \frac{\text{componente da velocidade}}{r}$). Interprete essas equações relacionando com o fenômeno.

6. Adote o sistema de referência discutido na etapa de descrição e refaça aqui o desenho da questão 3, assim como a trajetória da partícula para a componente da velocidade considerada até agora.

7. Agora comente sobre o papel da outra componente da velocidade.

8. Use a equação do período, $T = \frac{2\pi}{\omega}$, para calcular o passo, sabendo que $p = (\text{componente da velocidade}) \cdot T$. Interprete a equação obtida relacionando com o fenômeno.

9. Refaça o desenho da questão 6, agora com a trajetória completa, considerando também essa outra componente da velocidade. Interprete a trajetória relacionando com o fenômeno.

10. Obtenha a equação para a velocidade com que a partícula sobe ou desce pela linha de campo da Terra e para o tempo que leva, considerando uma distância d qualquer. Interprete relacionando com o fenômeno.

ANEXO E – Estágio de ramificação



INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE
 PROJETO: AS AURORAS POLARES E O
 ELETROMAGNETISMO
 PROFESSOR DA TURMA: Jaquiel Salvi Fernandes
 ORIENTADOR: Paulo José Sena dos Santos
 CONDUTORA: Letícia Martendal
 NOME(S): _____

Aula 6: Construindo um modelo – Parte 2.

Etapas de modelagem: estágio de ramificação

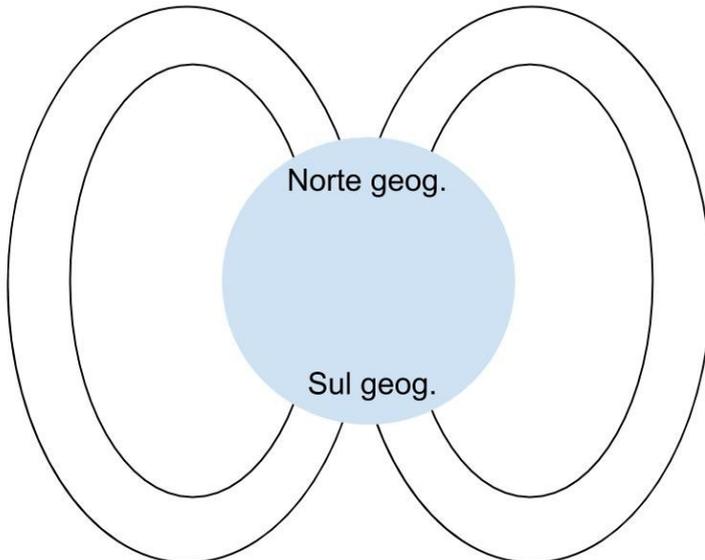
Nesse estágio, as propriedades e os casos especiais do modelo são estudados.

1. Aplique as equações do **raio**, da **velocidade angular**, do **passo**, da **velocidade** de translação, e interprete os resultados para os seguintes casos:

OBS: considerar os dados $B=40\mu T$, $v=400\text{ km/s}$, $q_p=-1,6\times 10^{-19}\text{ C}$,
 $m_p=1,67\times 10^{-27}\text{ kg}$, $q_e=-1,6\times 10^{-19}\text{ C}$ e $m_e=1,67\times 10^{-27}\text{ kg}$.

- a) Próton, $\theta=0^\circ$.
- b) Próton, $\theta=90^\circ$.
- c) Próton, $\theta=45^\circ$.
- d) Próton, $\theta=225^\circ$.
- e) Elétron, $\theta=0^\circ$. Comparar com próton.
- f) Elétron, $\theta=90^\circ$. Comparar com próton.
- g) Elétron, $\theta=45^\circ$. Comparar com próton.
- h) Elétron, $\theta=225^\circ$. Comparar com próton.

2. No caso de prótons, as partículas que incidem no campo magnético terrestre, com velocidade que tenham um ângulo $0^\circ < \theta < 180^\circ$ com relação a \vec{B} (isso só pode ocorrer quando vêm pelo lado noturno da magnetosfera), seguem em movimento helicoidal uniforme para qual dos polos? E os com $180^\circ < \theta < 360^\circ$ (pelo lado diurno)?
3. No caso de elétrons, as partículas que incidem no campo magnético terrestre, com velocidade que tenham um ângulo $0^\circ < \theta < 180^\circ$ com relação a \vec{B} , seguem em movimento helicoidal uniforme para qual dos polos? E os com $180^\circ < \theta < 360^\circ$?
4. Desenhe na figura abaixo as trajetórias para prótons e elétrons nos dois casos, indicando os vetores \vec{B} , \vec{v} e o ângulo θ .



5. Escolha um dos casos em que há movimento helicoidal para um dos polos, e determine o tempo que a partícula levará para chegar ao polo, supondo uma distância de duas vezes o raio terrestre ($R_{Terra} = 6371 \text{ km}$).

ANEXO F – Estágio de validação



INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE
PROJETO: AS AURORAS POLARES E O
ELETROMAGNETISMO
PROFESSOR DA TURMA: Jaquiel Salvi Fernandes
ORIENTADOR: Paulo José Sena dos Santos
CONDUTORA: Letícia Martendal
NOME(S): _____

Aula 7: Em busca de um modelo melhor.

Etapas de modelagem: estágio de validação

Nesse estágio, faz-se uma avaliação empírica do modelo ramificado ou comparações dos resultados com dados já existentes.

1. Explique se, a partir desse modelo, as auroras ocorrem só nos polos.
2. O modelo obtido possui limitações? Quais foram as considerações feitas no estágio de descrição que limitam a validade do modelo? Comente sobre as consequências de cada uma delas.
3. A partir desse modelo, e utilizando a pesquisa feita há algumas aulas sobre a atmosfera terrestre, comente sobre o que ocorre com as cargas ao chegarem nos polos magnéticos terrestres. Comente também se é possível a ocorrência desse fenômeno em outros planetas e também produzido artificialmente.